OKOSVÁROS-TECHNOLÓGIÁK XII.

Szenzorok és kommunikációs technológiáik

Jakab László – Fehér Gábor – Vida Roland

Nemzeti Közszolgálati Egyetem Budapest

SZÉCHENYI 2020

Magyarország Kormánya

Európai Unió
Európai Szociális Alap

BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

OKOSVÁROS-TECHNOLÓGIÁK
A technológia fejlődésének irányai és hatása
XII. kötet

Sorozatszerkesztő:

Sallai Gyula

Jakab László – Fehér Gábor – Vida Rolland

SZENZOROK ÉS KOMMUNIKÁCIÓS TECHNOLÓGIÁIK

Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Közigazgatási Továbbképzési Intézet
Budapest, 2020

A kötet a Nemzeti Közszolgálati Egyetem **KÖFOP-2.1.2-VEKOP-15-2016-00001 „A jó kormányzást megalapozó közszolgálat-fejlesztés”** projektje keretében, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamosmérnöki és Informatikai Karán létesült **„Okos város – okos közigazgatás”** kutatóműhelyben (2017/162/BME-VIK) készült.

Szakmai lektor:
Sallai Gyula, professor emeritus, BME-VIK

Szerkesztette:
Vida Rolland, egyetemi docens, BME-VIK

A kézirat lezárásának dátuma:
2017. december 31.

© Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Közigazgatási Továbbképzési Intézet, 2020
© Jakab László, 2020
© Fehér Gábor, 2020
© Vida Roland, 2020

A mű szerzői jogilag védett. Minden jog, így különösen a sokszorosítás, terjesztés és fordítás joga fenntartva. A mű a kiadó írásbeli hozzájárulása nélkül részeiben sem reprodukálható, elektronikus rendszerek felhasználásával nem dolgozható fel, azokban nem tárolható, azokkal nem sokszorosítható és nem terjeszthető.

TARTALOMJEGYZÉK

1. Bevezetés ... 7
1.1. Bevezetés a szenzorok világába ... 7
1.2. A tanulmány felépítése ... 11
2. Fizikai mennyiségek és azok meghatározása ... 12
2.1. Hőmérséklet ... 12
2.2. Nyomás ... 16
2.3. A mozgáshoz kapcsolódó mennyiségek érzékelése ... 17
2.4. MEMS érzékelők technológiája ... 19
2.5. MEMS eszközök: nyomásmérők, gyorsulásmérők, magnetométerek ... 21
2.6. GPS – Global Positioning System ... 27
2.7. Ultrahangos gázérzékelők ... 27
2.8. Optikai gázérzékelők ... 29
2.9. Áramlásmérők ... 30
3. Mikrokontrollerek ... 31
3.1. A mikrokontrollerek felépítése ... 31
3.2. Mikrokontroller perifériák ... 32
3.3. Mikrokontrollerek programozása, operációs rendszerek ... 36
4. Szenzor kommunikáció ... 38
4.1. Vezetékes kommunikáció ... 38
4.1.1. Controller Area Network - CAN ... 38
4.1.2. Fieldbus – Terepbuszrendszer ... 40
4.1.3. Ipari Ethernet rendszerek ... 41
4.2. Vezeték nélküli kommunikáció, kis távolságokra ... 44
4.2.1. GFSK moduláció ... 45
4.2.2. Bluetooth átvitel ... 46
4.2.3. ZigBee átvitel ... 48
4.2.4. További rövid hatótávolságú protokollok ... 59
4.3. Vezeték nélküli kommunikáció távolra, LP-WAN protokollok ... 51
4.3.1. Cellás LP-WAN megoldások ... 52
4.3.2. Szabad frekvenciás LP-WAN megoldások ... 55
4.3.3. LP-WAN hálózatok biztonsági kihívásai ... 60
4.3.4. Az LP-WAN hálózatok helyzete és kilátásai ... 61

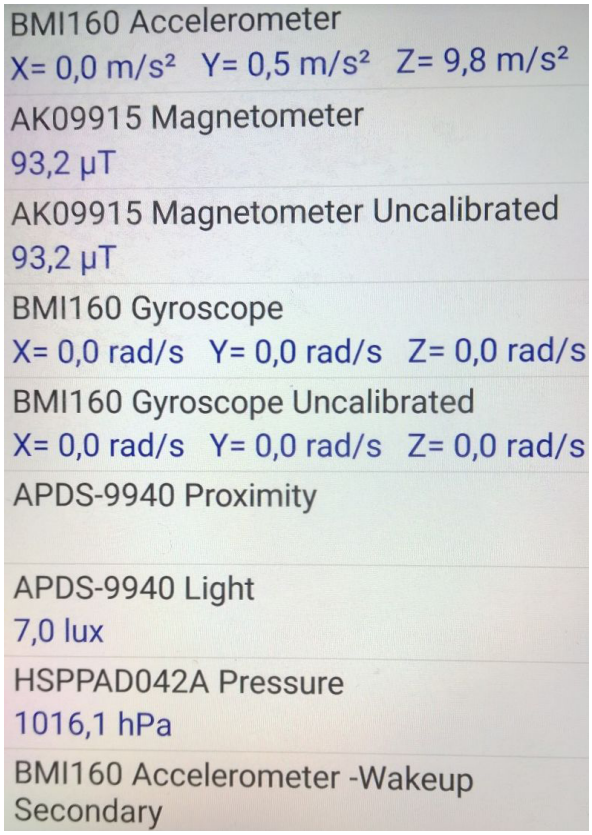
5. Szenzorok energiagazdálkodása 62
5.1. Energiamegtakarító mechanizmusok 62
5.2. Alternatív energiaforrások 63
5.2.1. Foto-elektromos átalakítók 64
5.2.2. Piezoelektromos átalakítók 64
5.2.3. Termikus energiaátalakítók 65
Irodalomjegyzék 66

1. BEVEZETÉS

1.1. Bevezetés a szenzorok világába

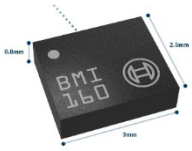
Érzékelőket mindannyian igénybe veszünk a környezetünk különböző fizikai paramétereinek monitorozására; a leggyakrabban érzékelt fizikai mennyiségek jellemzően a hőmérséklet, a légnyomás vagy a mozgáshoz kapcsolódó mennyiségek, mint például a sebesség, a megtett út, a gyorsulás, az emelkedés, a pozíció a térképen, az épületben vagy éppen az utcán a városban.

Az 1.1 ábrán egy mai átlagos okostelefonban levő érzékelők típusait gyűjtöttük össze, kiegészítve gyártói információkkal. Ezek valamennyien a majd később részletesen tárgyalt *MEMS*-típusok *(Micro-Electro-Mechanical System, mikro-elektro-mechanikus rendszer)* közé tartoznak.



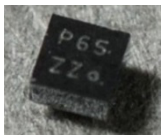
Mobiltelefon érzékelői

(Forrás: A szerző fényképe)



BMI 160, Bosch gyorsulásmérő és giroszkóp

(Forrás: A gyártói adatlapról)



AK09915 Magnetométer

(Forrás: A gyártói adatlapról)

APDS-9940 környezet és megvilágítás detektor, fénymérő

(Forrás: A gyártói adatlapról)

HSPPA nyomásmérő

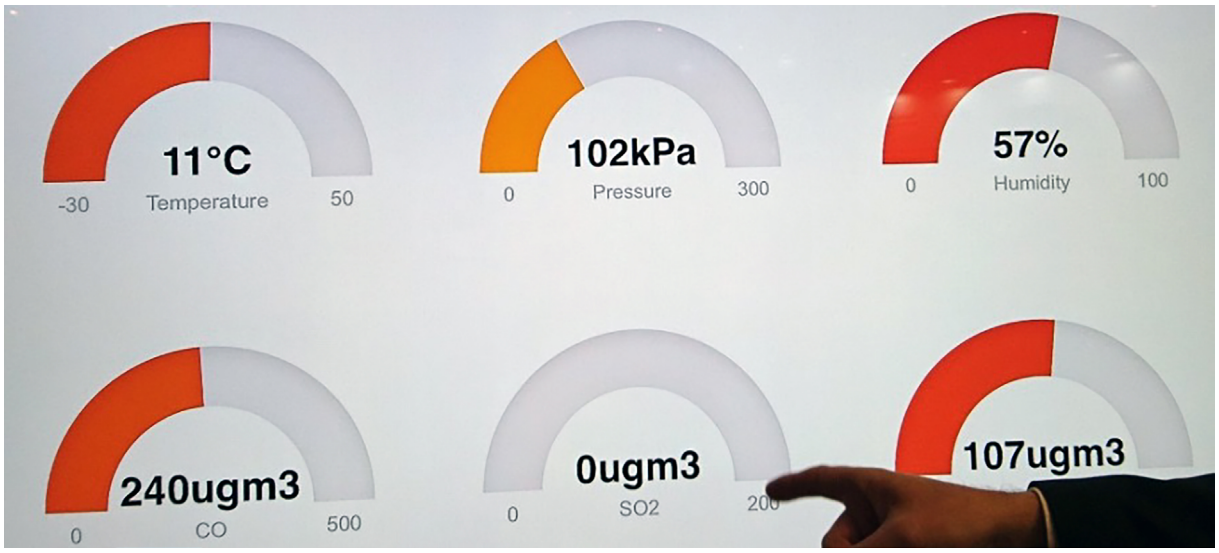
(Forrás: Gyártói adatlapról.)

1.1. ábra:Mobiltelefonban található jellemző érzékelők fajtái

Egyéb érzékelőfajták lehetnek: áramlásmérők, gázérzékelők (légszennyezésmérők) vagy páratartalom, talajnedvesség, megvilágítás, zaj és pulzus meghatározására alkalmas eszközök.

Egy másik okosváros példát hozva, az 1.2. és 1.3. ábrán a T-Systems CityBoard rendszerének kijelzőjét láthatjuk, ami a városi szinten (Zágráb, Barcelona, Bonn) gyűjtött adatokat valós időben mutatja be.

1.2. ábra: T-Systems CityBoard rendszere valós időben, folyamatosan frissülő adatokkal. Grafikonok Zágráb, Barcelona és Bonn elektromos autó töltőállomásairól, légszennyezéséről, parkolóhelyeiről, hulladéktárolóiról, baleseti és egyéb információkról
(Forrás: A szerző felvétele)

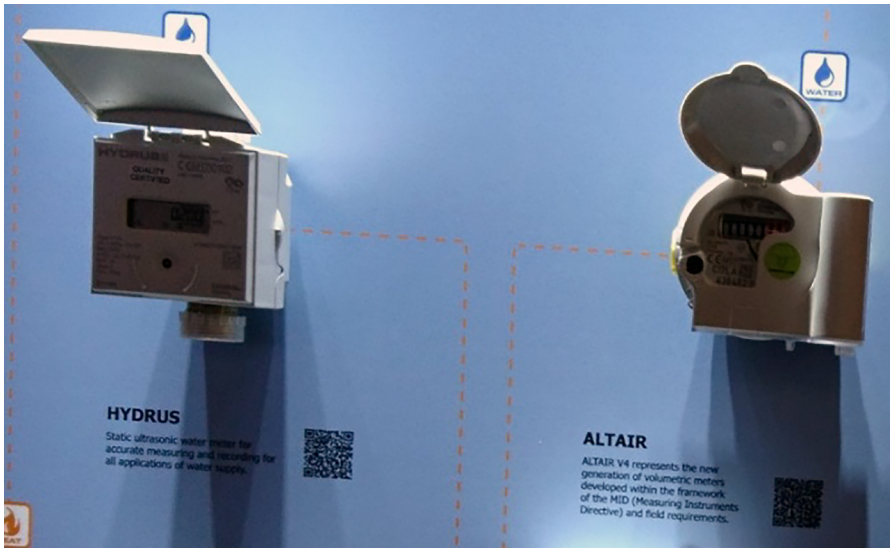


1.3. ábra: Bonn levegőminőségének adatai: hőmérséklet, nyomás, páratartalom, szénmonoxid, kéndioxid és nitrogéndioxid értékek a CityBoard rendszerből
(Forrás: A szerző felvétele)

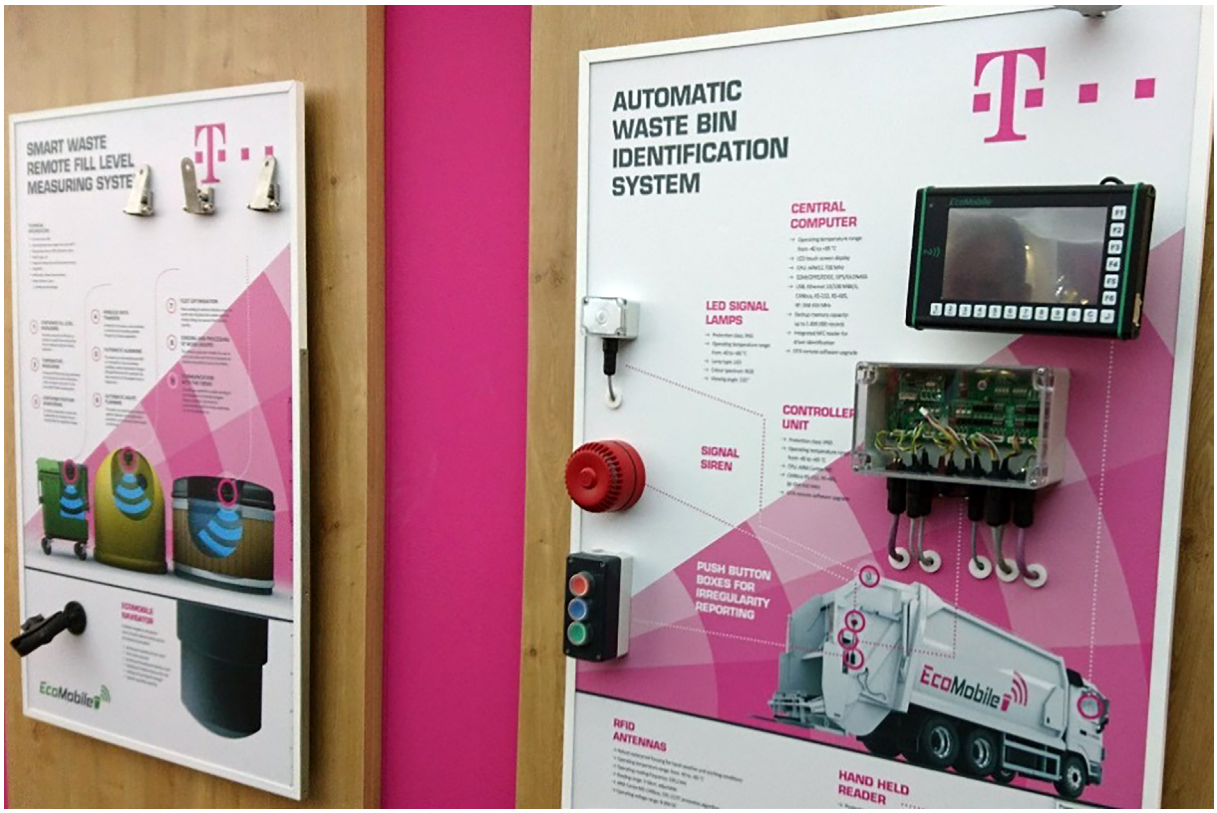
Az érzékelők működési elvei nagyon különbözőek lehetnek. Közös azonban valamennyiben, hogy érzékelőinket nem egyszerűen tájékozódásra, például annak megállapítására szeretnénk használni, hogy hány fok van a szobában. Ez jellemzően a szobahőmérő esete, mely valamilyen hőmérsékletváltozás hatására térfogatát, méretét változtató folyadékot tartalmaz egy vékony, átlátszó üvegcsőben elhelyezve. A folyadékoszlop hossza mellé egyszerű skálát illesztve és az eszközt megfelelően kalibrálva a szobahőmérséklet leolvasható. Mi azonban az érzékelőket nemcsak mérésre, de az adatok rögzítésére, továbbítására és feldolgozására is használni szeretnénk. Az előző példával élve, hagyományos, analóg módon értelmezve a feladatot, a szemrevételezéssel leolvasott adatot papíron rögzítjük, felírjuk, a mérést valamilyen időközönként megismételjük, az idő függvényében rögzített adatokat feldolgozzuk, diagrammon ábrázoljuk, az eredményekből pedig következtetéseket vonunk le. Például azt, hogy leghidegebb a szobában hajnali 5 órakor van, legkésőbb erre az időszakra kell tehát időzíteni a fűtés bekapcsolását. Természetesen be is avatkozhatunk, felkelhetünk korán bekapcsolni a fűtést vagy három órával korábban befűteni a kályhát. Vagy küldhetünk postán levelet a távhőszolgáltatónak, hogy a kora reggeli időtartományban emelje meg a fűtési melegvíz hőmérsékletét.

Teljesen világos azonban, hogy az itt leírt módszer több száz éve ismert és alkalmazott, de emberi beavatkozás nélkül, automatikusan nem képzelhető el. A jelenlegi korszerű technikák és technológiák ugyanezeken a lépéseken keresztül, de emberi beavatkozás nélkül, automatikusan, az adatok rögzítésének, feldolgozásának, továbbításának módját akár konfigurálhatóan, vagyis megváltoztathatóan tudják a folyamatot biztosítani. Ezért olyan érzékelőkre van szükségünk, amelyek valamilyen mérendő fizikai mennyiséget könnyen digitalizálható, számsorokká alakítható módon mérnek, kis méretben, kis energiafogyasztás mellett, megbízhatóan, más rendszerekkel összeépíthető, integrálható módon. Ilyenek jellemzően a MEMS-érzékelők, amelyek legnagyobb mennyiségben például mobiltelefonokban találhatók. A későbbiekben ezért részletesen ki fogunk térni a MEMS-eszközök felépítésére, félvezető technológiájára, működésük alapjaira.

Okosváros-alkalmazásokhoz nem feltétlenül a mobiltelefonok miniatűr, extra kis méretű érzékelőire van szükségünk. Itt is követelmény a digitális adatformátum és a kommunikációs képesség, de emellett a masszív felépítés, a széles hőmérséklettartományban való működés, a környezetállóság, az alacsony energiafogyasztás és a nagy megbízhatóság is szükséges. Erre példákat az 1.4. és 1.5. ábrán láthatunk.



1.4. ábra: Ultrahangos áramlás- és vízmennyiségmérők okosváros-rendszerekhez
(Forrás: A szerző felvétele)



1.5. ábra: A T-Systems közösségi hulladéktárolók monitoringjának elemei a CityBoard rendszerhez, vezeték nélküli érzékelőkkel

(Forrás: A szerző felvétele)

A bevezetés végén még egy érdekes alkalmazást említsünk meg. Az 1.6. ábra utcai parkolóhelyfigyelő rendszere az úttestbe épített magnetométer érzékelőket használ, amelyek szintén vezeték nélkül kommunikálnak a mobiltelefonon vagy tableten is használható alkalmazással.

1.6. ábra, Utcai parkolóhely figyelő rendszer, mely az úttestbe épített magnetométerek segítségével érzékeli, hogy a parkolóhely szabad-e és erről vezeték nélküli kommunikációval információt küld a felhasználónak; szintén T-Systems-fejlesztés

(Forrás: A szerző felvétele)

1.2. A tanulmány felépítése

A *Szenzorok és kommunikációs technológiáik* kismonográfia része egy több elemből álló monográfiasorozatnak, mely a szenzorok és szenzorhálózatok felépítéséről, működéséről és alkalmazási lehetőségeiről szól. Ennek a sorozatnak első elemeként jelen kismonográfia először áttekinti magukat az érzékelhető fizikai mennyiségeket, bemutatja az ezekhez kapcsolódó szenzorokat, majd érinti a digitalizáló, feldolgozó mikrokontroller egységeket, azok tápellátását, végül pedig az adatok továbbítására, az érzékelőkkel szükséges kommunikáció megvalósítására használt módszereket és eszközöket foglalja össze.

A sorozat második eleme egy olyan kismonográfia lesz, ahol az egyéni szenzorok helyett a vezeték nélküli szenzorhálózatokat helyezzük középpontba. Bemutatjuk a szenzorhálózatok kialakításának szempontjait, ismertetjük a különböző szenzorhálózati topológiák előnyeit és hátrányait, bemutatunk számos speciális alvásvezérlési, illetve útvonalválasztási protokollt, melyek a szenzorhálózat energiahatékony működését hivatottak támogatni.

Ezek után a harmadik kismonográfia a szenzorhálózatok biztonsági kihívásaira fókuszál az okos városokban. Itt szó lesz úgy a személyes adatok védelméről (privacy), mint a szenzorok korlátozott erőforrásaihoz szabott speciális hitelesítési és titkosítási megoldásokról. Végül, de nem utolsó sorban, a negyedik kismonográfia a szenzorhálózatokra építhető különböző közszolgáltatások bemutatását célozza meg, valós esettanulmányokon keresztül.

Ezen kismonográfiák célközönsége az okos város és az e-közigazgatás fejlesztésének témakörében érintett vagy a témakör iránt érdeklődő önkormányzati vezetők, képviselők és szakemberek, az állami tisztviselőkről szóló 2016. évi LII. törvény 1. § szerinti állami tisztviselők, egyetemi hallgatók, továbbá képzésükben, illetve továbbképzésükben részt vevő oktatók, a digitális technológia adta lehetőségek iránt érdeklődő kutatók és fejlesztők. Célunk a tárgykörök tematikus, jól követhető módon való bemutatása e célközönség számára.

A Szerzők[1]

---

[1] *Prof. Dr. Jakab László*, a BME Villamosmérnöki és Informatikai Karának egyetemi tanára, dékánja (2016-2019), az Okos város - okos közigazgatás kutatóműhely szakmai vezetője. Villamosmérnök diplomáját a BME-n szerezte meg 1981-ben. A műszaki tudomány kandidátusa 1992-ben, habilitált doktor 2013-ban, az MTA doktora címet pedig 2014-ben szerezte meg. Jelenleg az Elektronikai Technológia tanszék munkatársa.

Dr. Fehér Gábor, a BME Villamosmérnöki és Informatikai Kara Távközlési és Médiainformatikai Tanszékének egyetemi docense, tanszékvezetőhelyettes. PhD fokozatát a BME-n 2004-ben szerezte. Kutatási területe a Tárgyak Internete, szenzorhálózatok kommunikációs technológiái, illetve a hálózat- és információbiztonság.

Dr. Vida Rolland, a BME Villamosmérnöki és Informatikai Kara Távközlési és Médiainformatikai Tanszékének egyetemi docense, a Nagysebességű Hálózatok (HSN) Laboratórium vezetője. PhD fokozatát a párizsi Université Pierre et Marie Curie egyetemen szerezte 2003-ban. Kutatási területei közé tartoznak a szenzorhálózatok, a járműhálózatok, a Tárgyak Internete és ezek alkalmazásai az okosváros rendszerekben. Az BME-n futó Okos város villamosmérnöki mellékspecializáció felelőse. Tagja az IEEE Smart Cities Steering Committee-nek, az IEEE Sensors Council Administrative Committee-nek, az IEEE Sensors 2019 és IEEE Sensors 2020 nemzetközi konferenciák tudományos programbizottságának elnöke, az IEEE International Smart Cities Conference 2020 elnöke, és az IEEE Sensors Letters tudományos folyóirat szerkesztője.

2. FIZIKAI MENNYISÉGEK ÉS AZOK MEGHATÁROZÁSA

Ebben a fejezetben bemutatunk néhány fontosabb fizikai mennyiséget (pl. hőmérséklet, nyomás, páratartalom, légszennyezettség, gyorsulás), melyek mérése sok alkalmazás esetében fontos, kiemelve azt is, hogy ezeket a mennyiségeket milyen különböző megoldásokkal lehetséges mérni és a különböző mérési megoldásoknak milyen előnyei, hátrányai vannak. Külön figyelmet szentelünk a MEMS- (mikro-elektromechanikai) érzékelők felépítésének és működésének.

2.1. Hőmérséklet

A tárgyak vagy a környezetünk hőmérsékletével kapcsolatban nagyon konkrét elképzelésünk van. Mindenki pontosan tudja, érzékeli, hogy mit tekint melegnek vagy hidegnek. Hőmérőket elterjedten használunk a környezetünkben szinte mindenhol (lásd 2.1. ábra).

2.1. ábra: Konyhai hőmérők. A bal oldalon egy analóg, mutatós, sütő hőmérő 50–100 °C közötti mérési tartománnyal. Mellette egy ugyancsak mutatóval ellátott hűtőhőmérő, ami -30 °C és +30 °C közötti tartományban mér. Közöttük elöl egy digitális kijelzésű hőmérő, ami széles tartományban, akár +150 °C hőmérsékletig is használható, például forró sütőolaj ellenőrzésére.

(Forrás: A szerző felvétele)

A 2.1. ábrán figyeljük meg, hogy az analóg mérők esetén a hőmérséklet mennyiségét a mutató mozgásává kell alakítanunk, míg a digitális esetben olyan elektromos jelre van szükségünk, ami digitalizáció és megfelelő adatfeldolgozás után a mérőeszköz folyadékkristályos kijelzőjén megjelenik.

A hőmérséklet meghatározása, illetve bármikor megismételhető fizikai méréssel történő jellemzése történetileg messzire vezethető vissza, és lehetséges volt a mögöttes, mélyebb fizikai jelenségek megértése nélkül is. Gondoljunk csak a mai napig is elterjedten használt, és már korábban is említett, folyadékos (régebben higanyos) hőmérőkre, amelyek a hőtágulás elvén működnek. Mi most nem a történelmi utat járjuk be, hanem kezdjük a fizikai alapoktól.

A hőmérséklet a testek belső energiájának mértéke. Mit is értsünk ezen? Az *energia* a fizikában egyenlő a *munkavégző képességgel*. 1 Joule energia nagyjából annyi energiának felel meg, ami egy 10 dkg-os tárgy 1 m magasra emeléséhez szükséges. Ennyi lesz a tárgy munkavégző képessége is, amit vízerőművekben (vagy régebben vízimalmokban) ki is tudunk használni. A belső energia, ahogy a neve is utal rá, nem cserélhető vagy váltható át minden esetben és teljes mértékben közvetlen mechanikai munkára, bár a hőerőgépekben, korábban a gőzgépekben, manapság pedig a belső égésű motorokban is ez történik. Az viszont már elég régóta ismert, hogy mechanikai munkával a testek hőmérséklete növelhető. Gondoljunk csak a súrlódás elvén működő tűzgyújtásra még az emberiség őstörténetéből, de a kezünket is szívesen dörzsölgetjük a hidegben, kesztyű hiányában. Persze, ennek pontos mértéke nem volt könnyen meghatározható. Ma viszont már tudjuk, hogy 1 kalória 4,2 Joule energiának felel meg, ezt a hő mechanikai egyenértékének nevezzük, és éppen James Prescott Joule angol fizikus határozta meg.

Most, persze, egy új fogalommal is találkoztunk, a *kalóriával*. A kalória is az energia mértékegysége, ételek esetén a fogyókúrázók tudják ezt a legjobban. Az ételekkel a szervezetbe bevitt energia korlátozásával, vagyis hétköznapi szóval élve: éhezéssel, lehet a legjobb eredményt elérni. A kalória azonban éppen a hőmérsékleti, hőtani vizsgálatok útján kerül definiálásra: 1 kalória az az energiamennyiség, ami 1 gramm víz hőmérsékletét 1 fokkal (Celsius-fokkal) emeli. Nem akarunk fogalmi és mértékegységrendszer összefüggésekbe bonyolódni, de egyelőre jegyezzük meg, hogy a „Celsius-fok” kérdésre még majd vissza kell térnünk.

Csak az érdekesség kedvéért említjük meg, hogy egy pihenő ember napi energiaigénye körülbelül 2000 kcal (kilokalória)/nap. Ez az energia mennyiség 100 liter víz hőmérsékletét emelné meg 20 Celsius-fokkal.

Ahhoz, hogy valamilyen szemléletes képet tudjunk kialakítani a belső energia fogalmáról egy nagyon egyszerű modellhez kell fordulnunk, ez pedig a kinetikus gázelmélet úgynevezett *ideális gáz modellje*. Ehhez legjobban a nemesgázok (neon, argon) közelítenek, folyadékok és szilárd testek esetén a leírás lényegesen komplexebb, bonyolultabb. Az ideális gáz alkotóelemei egyszerű golyók, amelyeknek tömegük van és egymással, illetve a gáz térfogatát határoló kamra falával rugalmasan, energiaveszteség nélkül ütköznek. Sebességük, illetve sebességük eloszlása egy adott állapotban a hőmérsékletre jellemző. Az egyes gázatomok energiája, idealizált esetben, gravitációtól mentes térben, azok mozgási energiájával egyezik meg. A gáz teljes belső energiája pedig egyszerűen az azt alkotó atomok energiájának az összege.

Meg kell jegyeznünk, hogy a véletlenszerű és nagyszámú ütközések miatt a gázatomok sebessége különböző, a sebességek eloszlása egy úgynevezett Maxwell–Boltzmann eloszlásfüggvénnyel írható le. Lesznek atomok melyek alacsony, mások pedig nagy sebességgel mozognak, átlagsebességük azonban jellemző a hőmérsékletre, átlagos mozgási energiájuk pedig lineáris függvénye a hőmérsékletnek. A mozgási energiát ábrázolva a hőmérséklet függvényében azt fogjuk tapasztalni, hogy az egyenes mínusz 273 foknál metszi a tengelyt, vagyis az ideális gáz belső energiája az abszolút

nulla fok környékén a nullához tart. A gázok hűtése tehát lényegében nem más, mint a gázt alkotó elemek sebességének a csökkentése.

Ahogy említettük korábban, még beszélnünk kell a hőmérséklet mértékegységéről, az eddig már sokat emlegetett *Celsius-fokról*. A hőmérséklet-mértékegységek korábban tapasztalati úton kerültek bevezetésre, valamilyen fizikai jelenséghez rendelve fix pontokat a skálán. A Celsius-skála a svéd csillagász-matematikus Anders Celsius nevéhez kötődik, aki a víz fagyás-, illetve forráspontját jelölte meg referenciapontként, hiszen ezek tengerszinten magasságon jó közelítéssel mindenütt azonosak. A fagyásponthoz a 0, a forrásponthoz pedig a 100 fokot rendelve, a két hőmérséklet közötti tartományt pedig ennek megfelelően egyenletesen száz részre osztva kapjuk meg a „mérési utasítást". Hőmérőinket így tudjuk kalibrálni (beállítani), de ellenőrizni is. Konyhai digitális hőmérőnket jeges vagy forrásban lévő vízbe mártva a mutatott hőmérséklet értéke könnyen ellenőrizhető. Idővel kiderült, hogy a víz halmazállapot-változásának hőmérséklete a külső nyomástól is függ, ezért szerepel az előző meghatározásban a tengerszint. Így a külső légnyomás függvényében a tizedfok pontos konyhai digitális hőmérőnk olvadó vagy forrásban lévő vízben az elvárttól kismértékben eltérő értéket is mutathat. Érdekesség különben, hogy Anders Celsius eredetileg a víz fagyáspontját jelölte 100 fokkal, a forráspontot pedig nullával, és ezt a javaslatot így is fogadta el a Svéd Tudományos Akadémia 1742-ben. A skálát aztán pár évvel később, Celsius halála után fordították meg, Carl Linné botanikus javaslatára.

Az Egyesült Államokban a mai napig legelterjedtebben a Fahrenheit-skálát használják. Daniel Gabriel Fahrenheit egy német fizikus volt, aki azt szerette volna, hogy a hőmérsékleti skálán ne legyenek negatív értékek. Ezért a nullának a szülővárosában, Gdańskban 1708-ban mért legalacsonyabb hőmérsékletet választotta (az akkori feljegyzések alapján ez volt az addigi leghidegebb tél a városban, a legalacsonyabb hőmérséklet pedig -17,8 Celsius-foknak felelt meg), a 100-as értéknek pedig a saját testhőmérsékletét. Így a víz fagyáspontja, azaz a 0 Celsius-fok 32 Fahrenheitnek, a víz forráspontja pedig 212 Fahrenheitnek felel meg. A 100 fokos Celsius-skála a 180 fokos Fahrenheit-skálának felel meg, az átváltás fejben szinte lehetetlen.

A fizikai leírásokban a Kelvin-skálát használjuk, Lord Kelvin brit fizikus után. Leegyszerűsítve, ez csak a Celsius-skála nullájának a -273 fokhoz való rögzítését jelenti, a beosztás nem változik. A víz fagyáspontja tehát 273, forráspontja 373, a kellemes szobahőmérséklet pedig 300 Kelvinnek felel meg.

A hőmérsékleti, hőtani világ mennyiségei, mint a Celsius-fok (°C), illetve a kalória és a mechanikai világ mennyiségei, mint a Newton (mint erő) vagy a Joule (mint energia) egységei között egy fizikai állandó, a Boltzmann-állandó teremt kapcsolatot, de ennek részleteitől most eltekinthetünk.

Még át kell tekintenünk, hogy a hő, mint energia, hogyan terjed, egyik test hogyan tudja átvenni a másik hőmérsékletét, illetve a szobában a hőmérsékletkülönbségek hogyan szűnnek meg. Erre a kérdésre szintén a már említett ideális gázmodell ad a legegyszerűbben választ. Az atomok, a molekulák belső energiája valamilyen mozgásban testesül meg, a mozgási energia pedig ütközéssel egyik testről a másikra átadható. Ez történik *hővezetés* esetén, amikor szilárd testekben vagy folyadékokban a „meleg", vagyis a hőenergia a térben szétterjed. Értelemszerűen ez az energia egyenletes szétterüléséhez vezet, a hőmérsékletek pedig kiegyenlítődnek. Az anyagok hővezető képessége nagyon különböző, az elektromos szigetelőanyagok, például az üvegek vagy a kerámiák, a rossz, míg a fémek és még a félvezetők is a jó hővezetők közé tartoznak.

A hőenergia terjedésének egy másik módja a *hőszállítás*, amikor az energia szállítására valamilyen közeget használunk. A számítógép hűtőventillátora például a

levegő segítségével növeli a rendszer hűtési (azaz hőelszállítási) képességét, de a folyadékhűtés is, jellemzően gépjárművekben, hasonló elvet követ.

Harmadikként meg kell említenünk a *hősugárzást*. Azt feltétlenül tudnunk kell, hogy a hősugárzás elektromágneses sugárzás, vagyis lényegében megegyezik a szabadtéri rádiózásban, a televíziózásban használt sugárzással, vagy akár a látható fénnyel. Lényeges azonban, hogy, bár minden test bocsát ki hősugárzást, ennek hullámhossza a test hőmérsékletének függvénye. A hőmérséklet növekedésével a hullámhossz gyorsan csökken. A rádióhullámok a néhány méteres hullámhosszaktól a műholdas TV-közvetítések néhány cm-es hullámhosszáig terjedő tartományt fedik le. A szobahőmérsékleten tapasztalható hősugárzás érzékelésére alkalmas hőkamerák a 10 mikrométer, vagyis a milliméter századrésze tartományban érzékelnek, mérnek. Ahogy a hőmérséklet emelkedik, a vasrúd először vörösen izzani kezd, majd a fénye fokozatosan fehéredik ki. A látható fény hullámhossztartománya a 400–700 nm (nanométer) sávban a napfelszín 5000 Kelvin hőmérsékletének megfelelő. Nem véletlen, hogy látásunk ahhoz az elektromágneses hőmérsékleti sugárzástartományhoz igazodott, ahol a sugárzás a legnagyobb intenzitású. Ha a napunk vörös törpe lenne, rövidebb hullámhosszon sugározna és látásunk is ehhez igazodna.

A hőterjedés három módozata – a hővezetés, a hőszállítás és a hősugárzás – a valóságban általában egyszerre van jelen. Az ilyen rendszerek pontos leírása ezért bonyolult modelleket, a gyakorlatban végeselem-módszereket igényel.

Most, hogy ilyen részletesen áttekintettük a hőmérséklettel kapcsolatos alapokat, térjünk át a mérési elvekre. A legegyszerűbb és a hétköznapokban a legáltalánosabban használt elv a hőtágulás. A hőtágulás a testek méret-, illetve térfogatváltozása, ami általában a szükséges mérési tartományban lineáris függvénye a hőmérsékletnek. Itt meg kell jegyeznünk, hogy a hőtágulás mértéke lehet iránytól függő is, az irányfüggést *anizotrópiának* hívjuk. Folyadékokban természetesen nem az, és a folyadékos hőmérőkben a térfogatváltozást egy egyszerű vékony cső segítségével hossz- vagy folyadékoszlop-változássá alakítjuk. A hőmérő kalibrálása egyszerű: a folyadék hosszát megjelöljük egy skálát készítve, a hőmérőt olvadó, illetve forrásban lévő vízbe merítve, a két jel közötti tartományt pedig 100 részre osztjuk. A probléma az, hogy nem kapunk olyan fizikai jelet, mennyiséget, amit digitalizálni tudunk, vagyis az automatizálható mérési eljárások irányában ez a megoldás nem, vagy csak nehezen, járható.

Szintén széles körben és elterjedten használunk úgynevezett bimetál érzékelőket. Ezek, ahogy az elnevezésükből is következik, két különböző hőtágulási együtthatójú fémből kerülnek kialakításra. Két ilyen fémcsíkot összeragasztva vagy összehegesztve, a hőmérséklet változásának deformáció lesz az eredménye. A hőmérséklet növekedésével a lemezpár a kisebb hőtágulású lemez felé görbül, a hőmérséklet csökkenésével pedig ellentétes hatást tapasztalunk. Ez, persze, újra csak mechanikai mozgás, méretváltozás, de a folyadékos hőmérőkkel szemben ezen az elven például már kapcsolók, elektromos kapcsolók vagy csapok, szelepek is készíthetők. Így működnek a radiátorokra szerelt, a hőmérséklet szabályozására alkalmas termosztátok. A hőmérséklet függvényében a termosztát a radiátorba áramló meleg víz mennyiségét változtatni tudja, így a szoba hőmérséklete beállítható és a külső hőmérséklettől függetlenül állandóan tartható. A hőmérsékletadat digitalizálása, rögzítése és feldolgozása továbbra persze is problémás. A mi szempontunkból fontos okos és intelligens radiátorok irányában még további új megoldásokra van szükség.

Hosszú távú, jó megoldást csak a hőmérsékletértékek valamilyen elektromos jellé alakítása jelenthet. Ehhez az első lépés volt az úgynevezett *termoelem párok* kifejlesztése. A termoelemek két különböző, de megfelelően kiválasztott anyagú fémszál

összehegesztésével keletkeznek. A hegesztési pontot *melegpontnak* nevezzük, ezt használjuk a hőmérséklet mérésére. A szálvégek pedig a *hidegpontok*, ide csatlakoztathatunk feszültségmérőt vagy valamilyen lezáró ellenálláson akár áramot is mérhetünk. A működés elve az, hogy a két, egyébként jól vezető fém elektromos tulajdonságai, például az elektronok, mint töltéshordozók sűrűsége, illetve átlagos energiája különböznek, ami elektronáramláshoz vezet a határfelületen. Ez megbontja mindkét fémben a töltések egyensúlyát, elektromos feszültséget, potenciálkülönbséget eredményezve. A feszültség, amit ebben az esetben *termofeszültségnek* nevezünk, a hőmérsékletnek széles tartományban lineáris függvénye. Értéke az anyagoktól függően 10-50 μV/K; az ilyen eszközök széles, -200 és +1700 fok közötti tartományban alkalmasak hőmérséklet mérésére. A kapott elektromos jel könnyen digitalizálható, digitalizálás után tárolható, továbbítható. Termoelemek különböző kivitelben kaphatóak.

A fémek és félvezetők vezetőképessége, illetve ellenállása függ a hőmérséklettől. A fémek ellenállása a hőmérséklet növekedésével általában nő, aminek az az oka, hogy a magasabb hőmérséklethez magasabb energiájú belső mozgási, haladó, forgó, rezgő állapotok tartoznak, melyek az elektronok áramát akadályozzák. Félvezetők esetében a szabad töltéshordozó koncentráció a hőmérséklettel nő, ezért e félvezető hőmérők, amiket *termisztoroknak* nevezünk, ellenállása csökken, vezetőképessége javul.

Mind a termoelemek, mind az ellenállás, illetve a félvezető hőmérők széles körben alkalmazhatóak intelligens rendszerelemként. A termoelemek külső feszültséget, tápellátást nem igényelnek, ezért előnyösek lehetnek távoli, kis fogyasztású rendszerekben. Az ellenállás-hőmérők is, de a termisztorok különösen jól integrálhatóak komplexebb félvezető struktúrákba, akár integrált áramkörökbe.

2.2. Nyomás

A *nyomás* esetében a fizikai meghatározással sokkal könnyebb helyzetben vagyunk, mint a hőmérséklettel voltunk. A nyomás egyszerűen egy adott felületre ható erő, osztva a felület méretével. Ennek megfelelően mértékegysége Newton/négyzetméter. Persze, a fizika története, illetve a nyomás mérésére használt kezdeti módszerek, különösen a mértékegységek területén, igen változatos képet eredményeznek.

A nyomás, mint fizikai mennyiség mérésére, illetve magyarázatára, az igény először folyadékokban (gondoljunk csak Arkhimédész törvényére), illetve gázokban merült fel. A *hidrosztatikai nyomás* például a folyadékoszlop magasságának függvénye, gyakorlatilag lineárisan. Gázokban a légköri nyomás a levegő sűrűségének változása miatt a magasság függvényében bonyolult összefüggéshez vezet. Mindenesetre az ideális gázmodell segítségével egyszerű és szemléletes képet kapunk a jelenség mikrovilágbeli megértéséhez és magyarázatához. Az ideális gázt alkotó atomok rugalmasan ütköznek a kamra falával, arról visszapattannak, sebességük és ezáltal impulzusuk (ez a tömegük és sebességük szorzata) megváltozik, ami erőhatást jelent a kamra falára. Ez az erő ebből az egyszerű mechanikai képből is meghatározható, az eredmény a térfogat, nyomás és hőmérséklet összefüggését egyszerűen leíró általános gáztörvény lesz. Nekünk most elegendő azt tudnunk, hogy a nyomás mértékegységét először a normál légköri nyomáshoz igazított *atmoszféra*, rövidítve atm, elnevezéssel vezették be, de mérésére a folyadékoszlop magasságán alapuló úgynevezett *Torricelli-csövet* használták.

Folyadéknak vizet használva a normál légköri nyomás körülbelül 10 m magas vízoszlopnak felelne meg, ezért célszerű volt egy nagyobb sűrűségű, nehezebb folyadékot választani, ami a higany lett. A nyomás mértékegysége pedig a higanyoszlop milliméterben

mért magassága, amit *higanymilliméternek (Hgmm)* nevezünk. A normál légköri nyomás így 760 Hgmm-nek felel meg. A dolog nehézsége, a nem éppen egyszerű átválthatóságon felül az, hogy ezek a mértékegységek egyáltalán nem illeszkedtek a nemzetközi sztenderd SI-rendszerbe, ahol a Newton/négyzetméter egység a Pascal nevet kapta, ami viszont körülbelül öt nagyságrenddel kisebb, mint a légköri nyomás. Közbenső megoldásként született mennyiség az 1 bar, ami 100 000 Pascalnak, vagyis 1000 hPa-nak (hektopascal) felel meg, és nem különbözik jelentősen a légköri nyomástól. Ezért az autó- és kerékpárgumikat 2-6 bar nyomásra, a légköri nyomás 2-6-szorosára fújjuk fel, míg az időjárás jelentésben a légnyomást 1000 mbar (millibar) vagy1000 hPa körüli adatokkal szoktuk jellemezni.

Nyomásmérésre a normál légköri nyomástól nem túl távoli értékek esetén egyszerű membránokat használunk elterjedten. A két oldal közötti nyomáskülönbség a membrán görbületét változtatja meg. Ezt azután mechanikai elemekkel kombinálva lehet például a nyomásmérő mutatójának a mozgásává alakítani, de elektromos elemekkel kombinálva kapacitás vagy ellenállás változásként elektromos jellé is konvertálható. Érdekesség, hogy a membrános változatok félvezető technológiai módszerekkel igen kis méretben és nagy pontossággal készíthetőek, de ez már a MEMS-technológia irányába fog mutatni, amire később részletesen kitérünk. Az okosórák például a megtett, megmászott emeletek számát éppen a légköri nyomás változása alapján becsülik, de létezik számos olyan okostelefon-alkalmazás is, ami kiírja az okostelefonban található nyomásérzékelők által mért értékeket. A kijelzés általában 0,1 mbar pontosságú. Érdekességként említenénk meg, hogy a repülőgépek utasterében a 10 000 m-es repülési magasságon a normál 1000 mbar nyomásnál mintegy 30%-kal kevesebb, 700 mbar értékre csökken a nyomás, ezt felszállásnál és leszállásnál is a fülünk elég jól megérzi.

Jelentősen kisebb nyomások meghatározására a membrános technológiák már nem alkalmasak. Elsősorban technológiai okai lehetnek annak, hogy a gázteret a szokásosnál akár 5-10 nagyságrenddel is jobban megritkítjuk. Ez a vákuumtechnológiák területe, napelemek, szemüvegek antireflexiós bevonatának készítése tartozik ide, jelen kismonográfia szempontjából ez azonban nem annyira releváns, ezért nem térünk ki rá.

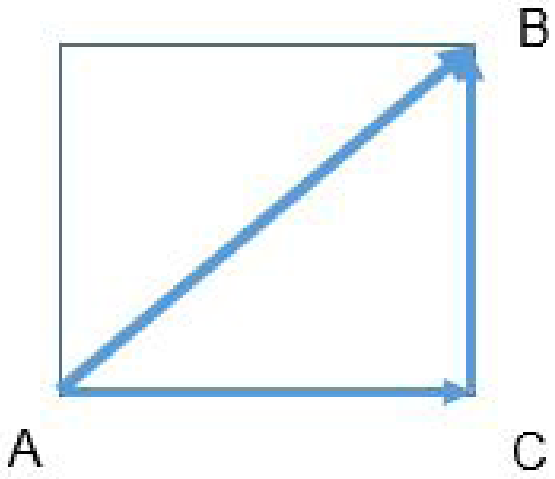
2.3. A mozgáshoz kapcsolódó mennyiségek érzékelése

A mozgások jellemzésére alapvetően a newtoni mechanika, dinamika leírásának összefüggéseit használjuk fel. Az első fontos tudnivaló az, hogy az a test, amelyre semmilyen erő nem hat, egyenes vonalú és egyenletes mozgást végez. Ez különböző vonatkoztatási rendszerekhez képest lehet más és más, de a sebesség mechanikai, például erőmérésekből nem meghatározható. Ez az alaptörvény látszólag teljesen ellentmond a napi tapasztalatnak, hiszen a hétköznapi életben minden magára hagyott test elveszti sebességét. Ez sok nehézséget okozott a fizikusoknak, de a mozgás alapösszefüggéseinek tisztázásához végül a szabadesés vizsgálatán keresztül vezetett az út.

Ma már tudjuk, hogy a feladat megoldása a súrlódás és a közegellenállás hatásának a kiiktatásával lehetséges. Galilei híres pisai kísérleteivel tisztázta, hogy a szabadon eső testek sebessége, illetve a földet éréshez szükséges idejük nem függ sem a tömegüktől, sem az anyaguktól. A testek gyorsulása körülbelül 10 méter/másodperc sebességnövekedés másodpercenként, ami 36 km/óra sebességváltozás egy másodperc alatt. A szabadon eső test ezért 72 km/óra sebességre tesz szert mindössze két másodperc alatt. Ezt *gravitációs gyorsulásnak* nevezzük és, ahogy említettük, tömegtől és anyagminőségtől független.

Nem igaz tehát, hogy a nehezebb testek gyorsabban esnek le, mint ahogy azt annak idején Arisztotelész gondolta. Ha a közegellenállást megszüntetjük, pl. egy vákuumkamrával, a tollpihe és a vasgolyó azonos idő alatt ér földet. A kísérleti tapasztalatok vezettek végül ahhoz az összefüggéshez, miszerint a mozgásállapot megváltoztatásához, vagyis a sebesség vagy az irány változásához erőre van szükség. A sebesség- vagy irányváltozás gyorsulást jelent, vagyis a kapcsolat a gyorsulás és az erő között van, nem pedig a napi tapasztalatnak jobban megfelelő sebesség és erő között. Itt még egy nagyon fontos dologra fel kell hívnunk a figyelmet. Az irányváltozás is gyorsulás, akkor is, ha nem jár abszolút értelemben sebességnövekedéssel vagy -csökkenéssel. Ennek megértéséhez be kell vezetnünk a vektormennyiség fogalmát.

Azokat a fizikai mennyiségeket nevezzük vektormennyiségeknek, ahol a folyamatokban a mennyiség iránya is meghatározó. A vektormennyiségekkel is lehet műveleteket végezni, de például összeadási szabályuk más, mint az irányfüggetlen skalármennyiségeké. Nagyon leegyszerűsítve az állítást, vektorok esetén a 2 + 2 nem feltétlenül 4. Vegyük például az elmozdulás fogalmát. A négyzet alakú szobában az egyik sarokból indulva eljuthatunk a szemközti sarokba két oldal mentén haladva vagy átlósan. A 2.2. ábra alapján az A pontból a B pontba tehát eljuthatunk az átló mentén közvetlenül vagy a C ponton keresztül.



2.2. ábra: A vektormennyiség fogalmának bevezetéséhez
(Forrás: A szerző ábrája)

Az elmozdulásvektor (AB-vektor), ami a kiindulási és a megérkezési pontot köti össze és az érkezési pontba mutat, a két esetben azonos. Viszont a két oldal menti elmozdulás vektor az AC és a CB irányított szakaszok összege, eredménye az átló lesz, bár a megtett út az oldalak mentén, illetve átlósan különböző. A vektorok összegének abszolút értéke tehát nem a vektorok abszolút értékének az összege.

A sebességvektor hossza a sebesség mértékegységében mérve méter/másodperc. Ha az irány változik, akkor a sebességvektor is más lesz, a hossza nem nő, de a megváltozott irányhoz szintén rendelhetünk vektort. A kezdeti és a végállapot vektorának kezdőpontját egybetolva a két végpontot összekötő vektor a sebesség változását jellemzi, hossza szintén méter/másodpercben lemérhető.

Ennél jobban ebbe most nem bonyolódnánk bele. Amit meg kell jegyeznünk, hogy a test körpályán tartásához is erőre van szükség, akkor is, ha annak sebessége abszolút értékben nem változik. Ezt az erőt *centripetális erőnek* hívjuk; a testre hat, és nem tévesztendő össze a *centrifugális erővel*, ami egy forgó rendszerben fellépő, radiálisan

kifelé irányuló tehetetlenségi erő. A kanyarodó buszon nem azért esünk el, mert a centrifugális erő feltaszít, hanem mert nincs meg a szükséges centripetális erő, ami a busszal azonos mértékben minket a bekanyarodásra bírna.

Ezekre az alapvető fogalmakra a MEMS mozgás-, gyorsulás-, irány-, dőlésszög- stb. érzékelők megértéséhez szükségünk lesz.

2.4. A MEMS-érzékelők technológiája

A MEMS [Liu 2011], vagyis a mikro-elektro-mechanikai érzékelők szinte kizárólagosan szilíciumból készülnek. A technológia alapja a szilícium úgynevezett anizotróp marása, ami különböző, az érzékelő szempontjából fontos geometriai, háromdimenziós formák kialakítását teszi lehetővé. Ez azért is figyelemreméltó, mert az félvezető alaptechnológia, úgynevezett planár-, vagyis síkbeli technológia. A hordozón kialakított szerkezetek mérete a hordozóra merőleges irányban kicsi, alapvetően a félvezető technológiában a felületen alakítunk ki mintázatot. MEMS-eszközök esetében azonban látni fogjuk, hogy szükségünk van a harmadik dimenzióra, irányra is.

Másfelől a mérettartományról érdemes tudnunk, hogy a teljes érzékelők mérete a maximum 1 – 2 mm-es tartományba, a finom részletek pedig az 1 – 10 mikron méretek közé eshetnek. Az eszközök minden esetben még a védelmet is jelentő tokba kerülnek; ezzel, illetve valamennyi más alkatrésszel együtt kell elférjenek egy meglehetősen lapos mobiltelefon vagy kisméretű okosóra házában.

A szilícium egy félvezető anyag. Természetes formában nagy mennyiségben az oxidja fordul elő a Földön; a szilícium-dioxid alapvetően homok, legtisztább formájában Ausztrália partjainál bányásszák. Ebből kerül kémiai redukcióval előállításra a szilícium mint félvezető ipari alapanyag. Nagyon lényeges, hogy a félvezető technológiában a kis méretek és a nagy megbízhatóság, illetve a reprodukálhatóság érdekében az alapanyagra vonatkozó szennyezettségi előírások igen szigorúak. Megfordítva ez azt jelenti, hogy az alapanyagnak rendkívül tisztának kell lennie, milliárdod vagy százmilliárdod részben sem tartalmazhat szennyezőket. Ilyen tiszta alapanyagot csak több lépésben, kémiai reakciókon és desztillációkon keresztül lehet kinyerni a tengerparti homokból.

Ezután egy nagyon különleges lépés következik, ugyanis a technológiához egykristályos szilárd alapanyagra van szükségünk. Az egykristályos szerkezet a természetben nagyobb méretben csak nagyon ritkán fordul elő. Ilyen lehet például a kvarc hegyikristály, ami egyébként szintén szilícium-dioxid. Ez az anyagszerkezet azt jelenti, hogy a szilíciumon belül létezik egy olyan geometriai egység, egy kis térfogat, amit elemi cellának hívunk, és amelynek a geometriai eltolásával, vagyis három dimenzióban történő ismétlésével az egész tömbi anyag előállítható. Ez az elemi cella jellemzően 0,5 nm x 0,5 nm térfogatú, ez alapján pedig talán mindenki el tudja képzelni, hogy egy 40 cm átmérőjű és 1,5 m hosszú szilícium rúd mennyi elemi cellát tartalmaz egymáshoz képest kötött geometriai elrendezésben. Az ilyen méretű egykristály rúd előállítása olvadékból történik, speciális nagyberendezésben.

Az egykristályos szerkezetre azért van szükség, mert a technológiában az egyes tulajdonságok irányfüggését ki kell használnunk. Erre az irányfüggésre, mint anizotrópiára, már korábban utaltunk. Az anyag az elemi cella kitüntetett irányainak, például oldalainak megfelelően más-más tulajdonságokat mutat. Ez rendezetlen, amorf anyagok esetén nincs így, ezért az amorf szilícium MEMS-technológiára jellemzően nem alkalmas. Napelemek gyártására viszont használható, bár az ilyen alkalmazásban az olcsóbb alapanyag gyengébb hatásfokot is jelent.

Az egykristály rúd előállításához szükséges nagy tisztaságú szilíciumot a megfelelő mennyiségben egy nagy kerámia tégelybe helyezik és 1414 fokra felmelegítve megolvasztják. Ennek az olvadéknak a felületéhez érintenek egy kisméretű, megfelelő orientációjú úgynevezett egykristály magot. Ennek a felületén indul meg az olvadék fázisból a magon az egykristály növekedés. Lassan, rendezetten szilárdul meg a szilícium, miközben ezt a magot emelik ki az olvadékból, úgy, hogy mindig csak a már megszilárdult felülete érintkezzen azzal. A magot forgatják, az egész elrendezésben a hőmérséklet-eloszlást pontosan tartják, a húzási sebességet ellenőrzik.

Az elkészült egykristály ezután lassan kihűl és megkezdődik a megmunkálása. Szeletek fognak készülni belőle a rúd tengelyére merőleges vágásokkal. A szilícium nagyon kemény, ezért gyémántporral erősített vékony vágótárcsákat használnak a hulladék minimalizálása érdekében. A szeletek éleit lecsiszolják, egyik oldalát kipolírozzák. Az egész technológia egy erős kémiai és fizikai tisztítással ér véget. A szeletek orientációja ismert, a szelethez képest az egyes kristálytani irányok rögzítettek, ezt a technológiához, az anizotróp tulajdonságok felhasználáshoz előzetesen feltétlenül tudnunk kell.

Az izotróp és anizotróp marást a technológiában lényegében a marószer különbözteti meg. Szilícium maratószerei izotróp maratáshoz 3 ml HF (fluorsav) + 5 ml HNO_3 (salétromsav) + 3 ml CH_3COOH (ecetsav) vizes oldata, anizotróp maratáshoz pedig KOH (kálium-hidroxid) vizes oldata szükséges. A különbség fizikai okainak megértéséhez kvantummechanikai fogalmakat kellene bevezetnünk, és ezek alapján megfontolásokat tennünk, ezért most ettől eltekintünk. Mielőtt azonban a marás folyamatát tárgyaljuk, foglalkoznunk kell a felületi struktúrák kialakításához szükséges mintázatkészítés, maszkolás technikájával.

A felületen, illetve annak mélységében szerkezeteket akarunk kialakítani. Nyilvánvaló, hogy egy vékony csatorna marásához meg kell oldanunk a nem marandó felületek védelmét a maratószertől. Ilyen védőréteg lehet például a szilícium-dioxid, amit már korábban más összefüggésben emlegettünk. Az egész félvezető szilíciumtechnológia sikere múlt azon, és az elmúlt évtizedek hihetetlen fejlődése köszönhető annak, hogy a szilíciumnak létezik egy olyan oxidja, ami a szeletek felületén könnyen előállítható, mechanikailag stabil, tömör, hőmérséklet-változásoknak és a maratószerek többségének jól ellenáll.

Az ábrakészítés folyamatának első lépése tehát, hogy a szilícium felületét teljes egészében oxidáljuk. Ez kályhában, magas hőmérsékleten, oxigén és az esetek többségében víz (pára) jelenlétében történik. A vízpára katalizálja a folyamatot, nagyon megnöveli az oxidáció sebességét. Ebben a maszkrétegnek készült szilícium-dioxid rétegben kell egy „ablakot” nyitnunk, amelyen keresztül majd a csatornát kimarjuk[2].

A felületre történő ábrakészítés eljárását *litográfiának* nevezzük, mely elnevezés egy régi nyomtatási módszerre utal. Az elektronikai technológiában sokféle litográfia létezik: elektronsugaras, ionsugaras, illetve röntgenlitográfia. Mi most a legáltalánosabban használt *fotolitográfiát* mutatjuk be. Ez lényegében egy fényképészeti eljárás, amelyhez először a szilíciumszeletet valamilyen fényérzékeny anyaggal vonjuk be, melyet *rezisztnek* hívunk. Megvilágítás hatására ennek megváltozik egy adott oldószerrel szembeni oldhatósága, azaz vagy oldhatóvá, vagy oldhatatlanná válik. A megkívánt ábrát rajz formájában elkészítjük és egy speciális levilágító berendezésben a szeletre, a rezisztre fényképezzük. Nagyon hasonló az egész folyamat a papírképek készítésének módszeréhez, csak az ábra esetünkben nem a fotópapíron, hanem a rezisztrétegben keletkezik. Ezután a nem szükséges rezisztrészeket leoldjuk, és rendelkezésünkre áll egy ablak, amelyen keresztül a szilíciumréteget a felületről lemarhatjuk.

[2] A SiO_2 oxidmarója 28 ml HF (fluorsav) + 113 g NH4F (ammónium-fluorid) + 170 ml víz (+ esetleg HNO3, azaz salétromsav) keveréke.

A szilícium-dioxid réteg megvédi az izotróp vagy anizotróp marás során a marni nem kívánt felületet. A marás során a nem maszkolt részeken a szilícium kémiai reakciók segítségével eltávolításra kerül, de a marási sebesség függvényében különböző alakú vályúk keletkeznek. Ha a marási sebesség irányfüggetlen, vagyis izotróp, akkor egy hosszú csík alakú ablakon keresztül egy félhenger formájú, keresztmetszetű csatorna keletkezik, mivel a marás a felületről kiindulva időegység alatt azonos mennyiségű anyagot távolít el.

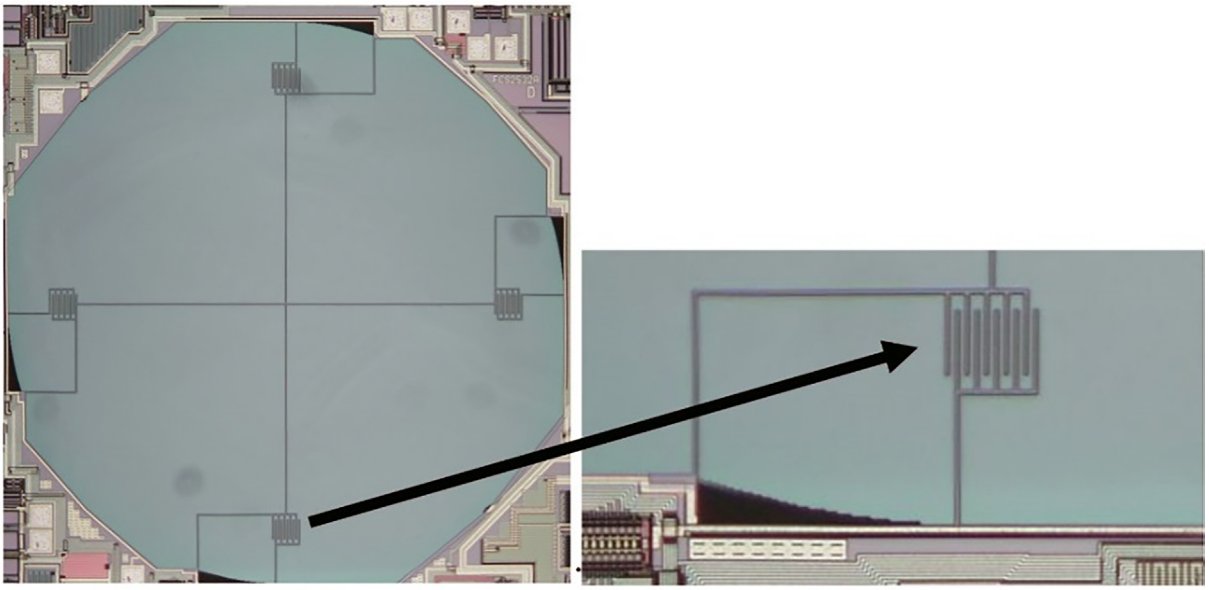
Ha a marási sebesség erősen irányfüggő, például a szeletre merőlegesen százszor nagyobb, mint azzal párhuzamosan, akkor könnyű belátni, hogy négyzet vagy téglalap alakú, keresztmetszetű csatornát kapunk. Ily módon tudunk, megfelelő maszkmintázattal, akár manhattani formájú „felhőkarcoló” rengeteget is mintázni a szilícium felületébe, természetes kis méretben, akár 10 (szélesség) x 10 (hosszúság) x 100 (magasság) mikrométeres oszlopokkal. Egyéb, de természetesen jól meghatározott irányokban közbenső állapotként például „V” alakú, síkfalú vájatok is készíthetőek.

Csatornánk már van, a mozgás érzékelésére mozgó, lengő vagy rezgő mechanikai tömegre van szükségünk, a kérdés tehát az, hogyan készítsük el? A következő lépés lehet a híd vagy félhíd, más néven konzol készítése. Ehhez azonban egy új technológiára is szükségünk van, mivel építkeznünk kell, kis méretekben, de nagyon hasonlóan a hagyományos építészeti eljárásokhoz. Először állványozunk, és egy úgynevezett áldozati réteget készítünk, azaz feltöltjük a csatornát olyan anyaggal, amit majd a végén szelektíven el tudunk távolítani. Erre a rétegre visszük fel a híd vagy félhíd szerepét betöltő szilícium réteget. Rétegfelvitelre általában ritkított, esetleg kémiai szempontból reaktív gáztérben vákuumporlasztásos, vákuumpárologtatásos vagy kémiai gőzfázisú rétegleválasztásos (CVD) módszereket használunk. A felépített, pontosabban az áldozati rétegre ráépített híd vagy félhíd alól kimarjuk az áldozati réteget, a keletkező szerkezet pedig a ráépített réteg vastagsága, pontosabban vékonysága, valamint a tömege függvényében már mechanikai mozgásra képes.

A mozgás átalakítása elektromos jellé ellenállás-hálózatok vagy piezoelektromos rendszerek segítségével történik. A mikroelektronikai technológiai módszerekkel elkészített membrán vagy konzol (félhíd) mozgása az adott elem mechanikai méretváltozásával, deformációjával jár, ami ellenállás-, kapacitás- vagy akár induktivitásváltozást okoz. Ez a méretváltozás a mozgó elemen kialakított elektromos hálózattal, amely természetesen tápfeszültséget igényel, s amelyen keresztül áram folyik, meghatározott pontok közötti feszültség mérésével jellemezhető. Ellenállásokból olyan speciális elrendezés is készíthető (például Wheatston-híd), amellyel az ellenállás, a kapacitás és az induktivitás értéke is nagy pontossággal meghatározható. Egy speciális eset lehet az úgynevezett piezoelektromos jelenség felhasználása; ebben az esetben a mozgó elemre olyan anyagot viszünk fel, amely a mechanikai deformáció, vagyis méretváltozás hatására közvetlenül feszültséget állít elő. Erről a 2.7. alfejezetben még bővebben fogunk szólni.

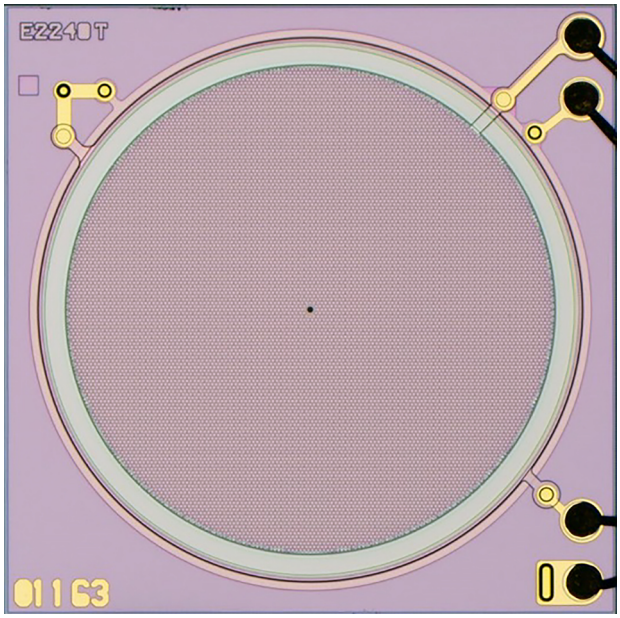
2.5. MEMS-eszközök: nyomásmérők, gyorsulásmérők, magnetométerek

A 2.3. ábrán *egy nyomásmérő* membrán röntgenmikroszkópos felvételét láthatjuk. A membrán átmérője 2 mm; a membrán deformációját érzékelő úgynevezett interdigitális elektródarendszereket négy oldalon alakították ki. Ezeken a fésű formájú struktúrákon keletkező feszültség lesz a membrán deformációra és így a levegő nyomására jellemző mért mennyiség. Jól látszik a képen a szilíciumalapú technológia nagy előnye, miszerint magára a hordozóra az elektromos méréshez és feldolgozáshoz szükséges elemek monolit módon ráintegrálhatóak.



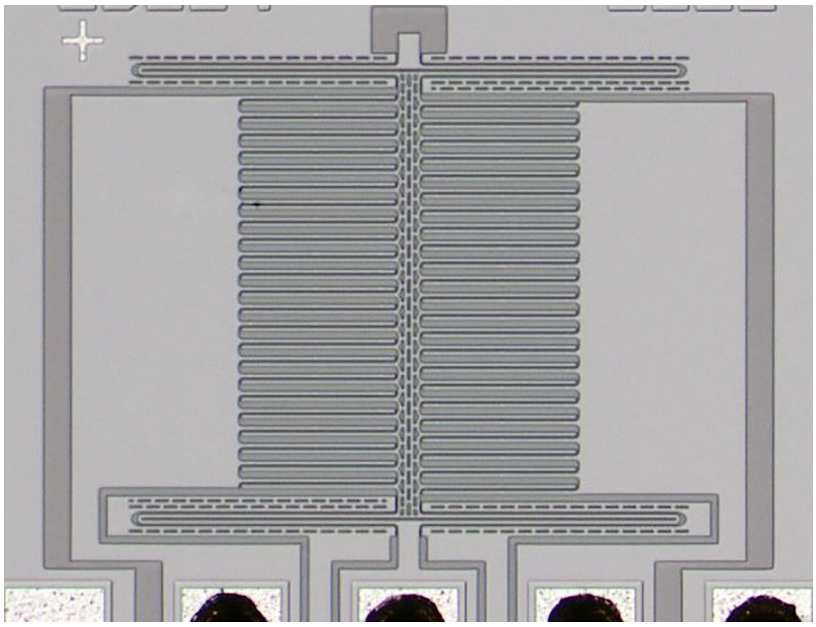
2.3. ábra: Nyomásmérő membrán röntgenmikroszkópos képe
(Forrás: Az EFI-Labs engedélyével)

Ehhez nagyon hasonló a mobiltelefonokban használt mikrofonok felépítése. A hang a levegőben terjedő nyomáshullám. Ennek érzékelésére viszont, a magasabb hangfrekvenciák miatt, amelyek akár 15-17 kHz-ig (17 ezer rezgés másodpercenként) is terjedhetnek, vékonyabb membrán szükséges. A 2.4. ábra érzékelőjében egymás felett három membránréteg is található, ezek viszont lyukacsosak, kicsit a mélysejtre emlékeztető módon, hogy a levegő az alsó rétegeket is meg tudja mozgatni.



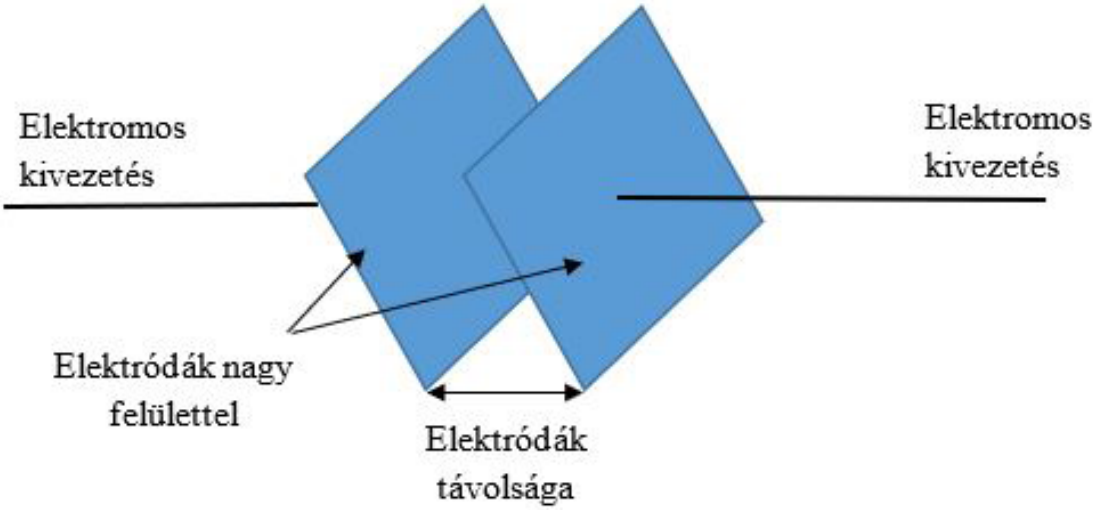
2.4. ábra: Mobiltelefon mikrofon érzékelőjének röntgenmikroszkópos képe
(Forrás: Az EFI-Labs engedélyével)

A mechanikai mozgás érzékeléséhez, akár haladó-, akár forgómozgásról beszélünk, tehetetlen, lengő, mozgó tömegekre van szükségünk. Ilyen, egyetlen irányban haladó gyorsulás érzékelésére alkalmas rendszer részletét láthatjuk a 2.5. ábrán.

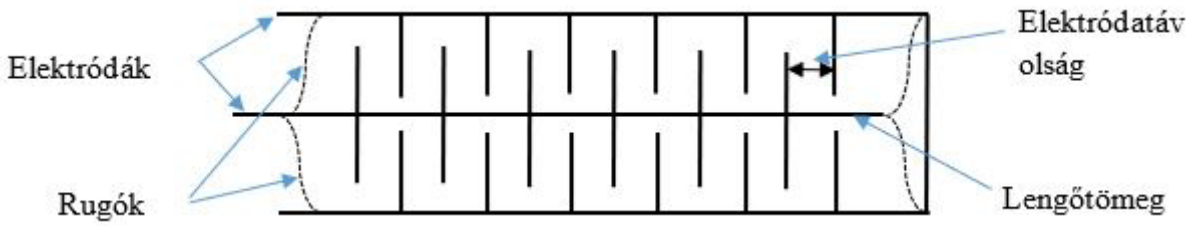


2.5. ábra: Egytengelyű gyorsulás érzékelő felépítése
(Forrás: Az EFI-Labs engedélyével)

Az elektromos jel, amit mérni szeretnénk, ahogy azt korábban már említettük, a mozgó elemek közötti kapacitás. A kapacitás elektromos elektródákból álló kondenzátorok töltéstároló képessége (lásd 2.6. ábra), ami arányos az elektródák felületével és fordítottan arányos az elektródák távolságával. Egy ilyen kondenzátorelrendezést kell megvalósítanunk egy felületen, ahol a felület mérete néhányszor néhány milliméter, a rendelkezésre álló geometriai mélységhez képest, ami 1-10 mikrométer lehet legfeljebb, nagyon különböző. Elterjedten a gyártók az alábbi, 2.7. ábra szerinti struktúrát alkalmazzák.



2.6. ábra: Elektromos kondenzátor felépítése és jellemző geometriai méretei
(Forrás: A szerző ábrája)



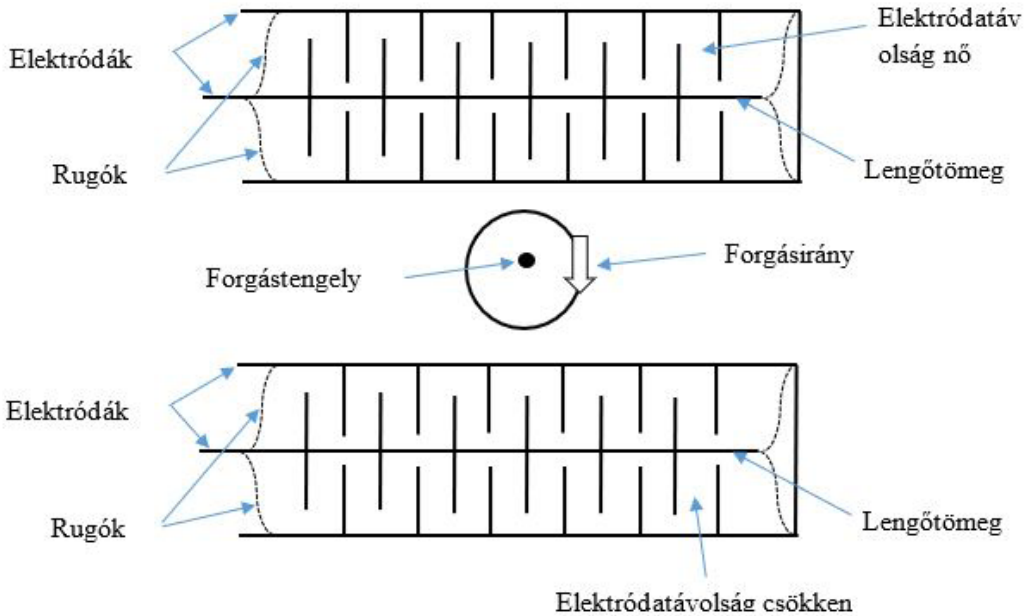
2.7. ábra: Egytengelyes gyorsulásérzékelő felépítése
(Forrás: A szerző ábrája)

A rugókra felfüggesztett belső elektródarendszer az ábra szerint vízszintes irányban tud elmozdulni, az elektródák közötti távolság változik, így változik a kapacitás is. Elektromos hálózatba helyezve a struktúrát ez feszültségváltozássá alakítható. Ezt a szerkezetet láthatjuk a 2.4. ábra röntgenmikroszkópos felvételén is, csak 90 fokkal elforgatva.

Mivel a belső elektródarendszer rugós felfüggesztésű, ezért gravitációs gyorsulás mérésére is alkalmas. Olyan, mint egy rugós mérleg: az elektródarendszernek a tömegéből következő gravitáció irányú lógásából, mint speciális pozícióhoz tartozó kapacitásértékből a gravitációs gyorsulás is meghatározható.

Amennyiben többirányú gyorsulást akarunk mérni, elhelyezhetünk ugyanazon a szeleten egymásra merőleges irányokban kialakított és merőleges irányú elmozdulásra képes szenzorelemeket.

A giroszkópokat elfordulás detektálására használjuk. Hagyományosan a giroszkópok egy speciálisan felfüggesztett tengely mentén forgó tömeget használnak, amely a tehetetlenségi nyomatékának megmaradása miatt, a forgástengelyének irányát akkor is megtartja, ha a környezete elfordul. Kis méreteknél, főleg a mikromechanikai lehetőségeink miatt, ez nem jöhet szóba, itt más megoldást kell találnunk. Vegyük azonban észre, hogy két egymással párhuzamosan kialakított, de egymástól független gyorsulásmérővel az elfordulást már felismerhetjük és mérhetjük. A lényeg az, hogy meg tudjuk különböztetni a haladó irányú gyorsulástól. Az alap MEMS-giroszkóp felépítése a 2.8. ábrán látható.

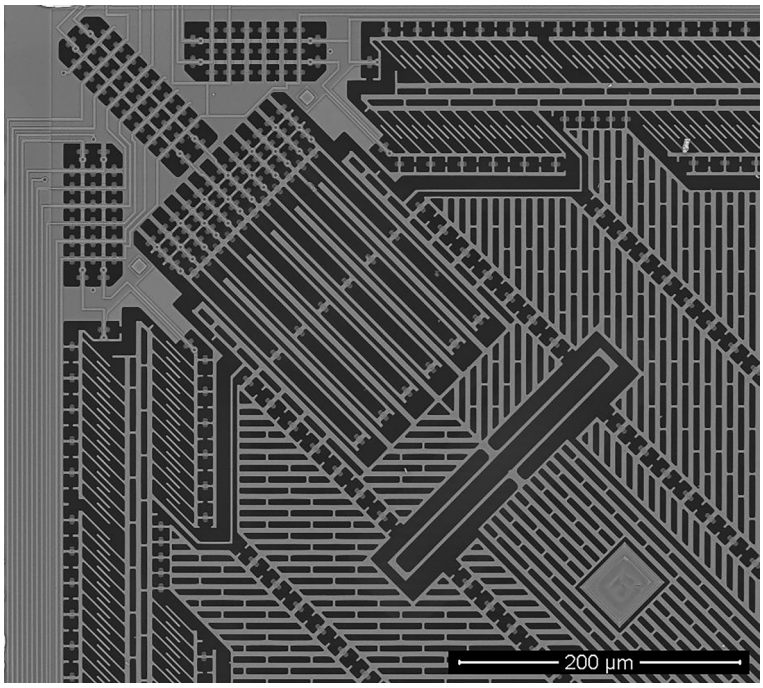


2.8. ábra: Elfordulásérzékelés két egymással párhuzamosan elhelyezett lineáris gyorsulásmérővel (Forrás: A szerző ábrája)

Elfordulás esetén a két gyorsulásérzékelő mozgó, tehetetlen elektródarendszere éppen ellenkező irányba mozdul el, haladó irányú gyorsulásnál pedig azonos irányban. Így az elfordulás megkülönböztethető a haladó gyorsulástól. Természetesen a gyakorlatban a két mozgás egyidejűleg van jelen. Egyetlen ilyen rendszerrel a mozgás teljeskörűen nem jellemezhető, ezért az érzékelőkben egymástól függetlenül alakítják ki a lineáris és a szögelfordulást érzékelő szerkezeteket. Az egymástól függetlenül mért adatokból a mozgás viszont akár mindhárom dimenzióban is leírható. Ilyen rendszer a bevezető fejezetben már említett mobiltelefonba építhető gyorsulásmérő is. A 2.9. ábrán egy hattengelyes, vagyis teljes, háromdimenziós, haladó és forgó mozgás jellemzésére egyidejűleg alkalmas MEMS-érzékelő belső felépítésének egy részletét mutatjuk meg.

A képen jól felismerhetőek a szélekkel párhuzamosan, de egymásra merőlegesen elhelyezett MEMS-egységek, átlósan pedig a kép síkjára merőleges mozgást detektáló fésűs elektródastruktúrák.

A magnetométereket elterjedten használjuk mágneses tér, illetve a mágneses tér változásainak az érzékelésére. A Föld mágneses tere elég erős, gondoljunk csak a hagyományos iránytű használatára, így ennek már kis változása is érzékelhető. Fémek vagy más, nagy tömegű, jól vezető elemek megváltoztatják maguk körül a mágneses teret, de hagyományos induktív detektorokkal is sok alkalmazásban találkozhatunk. Az induktív érzékelőkben a mágneses teret magunk állítjuk elő, és ennek változásait figyeljük, monitorozzuk. Először tisztázzunk néhány alapfogalmat.



2.9. ábra: Gyorsulásmérő és giroszkóp egyben, a belső felépítés egy részlete röntgenmikroszkópos felvételen

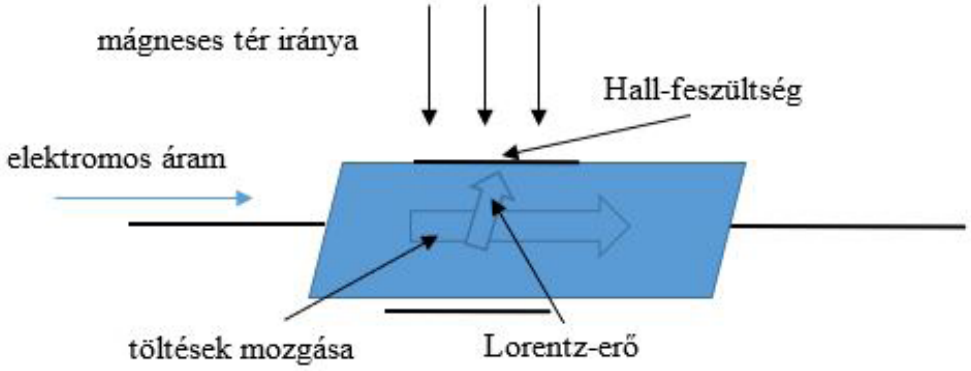
(Forrás: Az EFI-Labs engedélyével)

Az árammal átjárt vezető mágneses teret hoz létre maga körül. Lényeges az áram jelenléte, a mágneses tér „forrása” a töltések mozgása. A mágneses tér arányos az árammal és sok függ a vezető geometriájától. Közel homogén, vagyis állandó erősségű és irányú mágneses tér speciális formájú tekercsekkel, elektromágnesekkel hozható létre. Fontos, hogy a mágneses tér is vektormennyiség. A mágneses tér mértéke a mozgó töltésekre ható erő, ami merőleges a mágneses tér irányára és a mozgás irányára is. A mágneses

tér változása a vezetőkben áramot hoz létre, más szóval indukál. Az indukált áram is arányos a mágneses térrel, ezt használjuk általában a mágneses tér detektálásra, érzékelésére. Bizonyos anyagoknak állandó mágneses tere van, ahogy a Földnek is, ezeket állandó mágneseknek hívjuk. Vannak olyan anyagok, amelyeknek mágneses tere, mágnesezettsége megváltoztatható, az anyag mágneses terének az iránya megfordítható. Ezeket használjuk még a mai napig is mágneses adattárolásra; a számítógépek „hard disc”-je, vagyis merevlemeze is így működik.

A mágneses tér megváltozásának érzékelésére a legegyszerűbb, bár nem túl érzékeny módszer a tekercs. A mágneses tér változása áramot indukál, ezért ezen az elven például automata garázsajtónyitó is készíthető. A tekercset, nagy átmérővel és sok-sok menettel a padlóba integráljuk. Áram is folyhat rajta, akkor a nagy tömegű autó megjelenésekor az áramváltozásokat érzékeljük, vagy használhatjuk a föld mágneses terét, és ilyenkor csak a tér megváltozása által indukált áramot mérjük.

Érzékenyebb módszer lehet a Hall-jelenségen alapuló, félvezető elemeket használó eljárás. A *Hall-effektus* [Hall 1879] azt jelenti, hogy egy árammal átjárt félvezető eszközt mágneses térbe helyezve, annak oldalán a mágneses térrel arányos feszültség mérhető. A jelenség geometriai elrendezése a 2.10. ábra szerinti.



2.10. ábra: A mágneses tér érzékelésére alkalmas Hall-jelenség szemléltetése
(Forrás: A szerző ábrája)

A Hall-effektus a Lorentz-erő hatására jön létre; a mágneses térben mozgó töltésekre, így a félvezetőben az elektromos áramot jelentő szabad töltéshordozókra, a mágneses tér irányára és a töltéshordozó mozgásának irányára is merőlegesen egy erő hat. Ez az erő a pozitív és negatív töltéseket ellentétes irányban téríti el, ezért a félvezető két oldala között a pozitív és a negatív töltések szétválasztásával egy elektromos tér jön létre, amit a két oldal közötti feszültségkülönbséggel jellemezhetünk. Ezen az elven működik a bevezető fejezetben megemlített mobiltelefonba építhető magnetométer.

Itt kell azonban megjegyeznünk, hogy a Hall-jelenségen alapuló mérésnek hátránya, hogy az érzékelőben áramnak kell folynia, vagyis az eszköz a méréshez energiát használ fel, energiát fogyaszt. Ez főleg olyan alkalmazásokban lehet nagy hátrány, ahol az eszköz energiaellátása nem, vagy csak nagyon költségesen, oldható meg. Ilyen lehet az 1.6. ábra parkolásfigyelő rendszere, ahol a detektorok energiaellátása akkumulátorról vagy elemről oldható meg, és az elemcsere periódusa 2-3 év kellene, hogy legyen, a gazdaságosság figyelembevételével. Ebben a helyzetben jobb a passzív, áramot alapesetben nem fogyasztó tekercs alkalmazása. A jelfelismeréshez és a kommunikációhoz azonban mindenképpen szükségünk van energiára.

2.6. GPS – Global Positioning System

Bár a GPS nem egy egyszerű érzékelőkön alapuló rendszer, viszont szinte valamennyi szenzoralkalmazáshoz kapcsolt adat a szenzor helyzete, vagy a szenzor helyzetének a változása, ezért röviden ki kell térnünk a globális helymeghatározó rendszerekre. Ilyen rendszerből ma már több is van, illetve többnek is folyik a kiépítése. Ezek minden esetben műholdas rendszerek, és kültéri helymeghatározásra alkalmasak, ahol a műholdak láthatóságát is biztosítani kell. Egyidejűleg minimum három, de előnyösebben négy műhold adataira van szükség egyszerre a helykoordináták meghatározásához.

A GPS az amerikai rendszer elnevezése, az orosz–indiai a GLONASSZ, az európai a Galileo, míg a kínai a Beidou-2 [Xu 2016].

A műholdak keringési ideje a Földtől mért távolságuk függvénye. A műholdas televíziózásra használt úgynevezett *geostacionárius* műholdak keringési ideje pontosan egy nap, és ezért mindig a Föld egy meghatározott egyenlítői pontja felett állnak, körülbelül 35,7 kilométer magasan. Rádióhullámokkal létrehozott kapcsolat esetén azonban az adó (esetünkben a műhold) kisugárzott teljesítménye és a vevő (például a mobiltelefonunk) érzékenysége a távolság négyzetes függvénye. Feleakkora távolság negyedakkora adóteljesítményt kíván meg. Vegyük azt is figyelembe, hogy a műholdak energiaellátása napelemekkel oldható csak meg, akkor, ha nem a Föld árnyékos oldalán találhatóak. Ezért a GPS-műholdak csak hozzávetőlegesen 20 km magasan keringenek, keringési idejük fél nap, vagyis naponta kétszer kerülik meg a Földet. A teljes Föld területének lefedettségéhez 24 műholdra van szükség; sík terepről az égbolton egyszerre 8-12 műhold látható, ezek közül pedig négy kell a pontos helymeghatározáshoz és egy ötödik akkor, ha a magasság értékekre is szükségünk van. A rendszer nincs túlbiztosítva, mert hegyes terepen, vagy városi környezetben az épületek között, így is nehézségekbe ütközhet a szükséges számú műhold megtalálása. Aki használt már GPS-navigátort, az ismeri ezt a helyzetet.

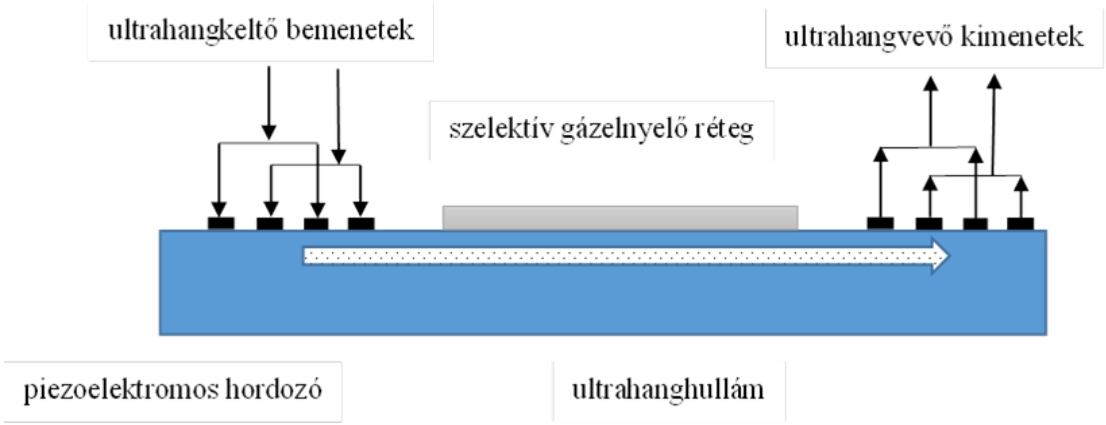
A helymeghatározás alapja a háromszögelés. A térben egy pont helyzete pontosan leírható, ha ismerjük három másik, ismert helyzetű ponttól a távolságát. Egy térbeli pont jellemzésére három számra, úgynevezett koordinátára van szükségünk, ez a Descartes-féle egymásra merőleges tengelyekből álló koordinátarendszer alapja is. A műholdak minden időpillanatban pontosan tudják, hogy hol vannak, és azt is, hogy mikor, mivel minden műholdon található egy atomóra, amelyek egymáshoz szinkronizálva mérik nagy pontossággal az időt. A műholdak másodpercenként többször is egy rövid jelet sugároznak, amely tartalmazza az idő- és helyadataikat. A vevőegység viszont különböző távolságokra van az egyes műholdaktól, ezért az elektromágneses hullámok véges terjedési sebessége következtében az azonos időpillanatban kisugárzott helyadatokat különböző időben kapja meg. Ebből a késleltetésből a vevőegység a műholdakhoz képesti helyét 1-2 m pontossággal meg tudja határozni.

2.7. Ultrahangos gázérzékelők

Az ultrahangos érzékelőket páratartalom- és légszennyezésmérésre, illetve gázérzékelésre használjuk. Jellemzően ezek úgynevezett *felületi hullámú eszközök*, mivel az ultrahanghullámnak egy olyan speciális fajtáját használják, ami a vízhullámokhoz hasonlóan a szilárd test, esetükben a piezoelektromos hordozó szelet felületén terjed. Általában megkülönböztetünk longitudinális és transzverzális akusztikus hullámokat, ahol a hullámban terjedő fizikai méretváltozás, deformáció a hullám terjedési irányával párhuzamos vagy arra merőleges. Ilyen hullám terjedhet egy rúdban, ha a rúd végét a

tengelyével párhuzamosan vagy arra merőlegesen ütjük meg. A felületi hullám a két eset kombinációjának tekinthető, tartalmaz longitudinális és transzverzális komponenseket is, de keltése különösen piezoelektromos közegben nagyon egyszerű, úgynevezett interdigitális elektródaelrende-zéssel, amelynek a merőleges metszetét a 2.11. ábrán is láthatjuk.

A keltett akusztikus hullám az anyagjellemzők alapján meghatározott sebességgel terjed a felületen; ez a vevőoldalon egy a gerjesztésre használt geometriával azonos elrendezésben érzékelhető, így pedig a késleltetési idő is meghatározható. Amennyiben az eszközt olyan anyaggal vonjuk be, amely a detektálandó gázra vagy vízpárára érzékeny, akkor abból nagyobb mennyiséget meg tud kötni, a felületre felvitt réteg tömege pedig megváltozik. Ez pedig változtatni fogja az akusztikus hullám terjedési sebességét, így az eszköz késleltetését is.



2.11. ábra: Akusztikus felületi hullámú érzékelő felépítése
(Forrás: A szerző ábrája)

A gőz (vízpára) és a gáz (szén-monoxid, szén-dioxid, nitrogén-dioxid, kén-dioxid) érzékeléséhez különböző aktív bevonatokra van szükség, ezért ezek egyenkénti érzékelése csak egyedi szenzorokkal lehetséges. A több gáz esetén is használható spektroszkópiai vagy mikrospektroszkópiai módszerekre most nem térünk ki.

A gázérzékelők adott gázra vett nagy érzékenységét, vagyis szelektivitását, sok esetben kémiai reakciók biztosítják. Oxigénkoncentráció mérésére gyakoriak az olyan elektrokémiai cellák, amelyekben egy kémiai redukción keresztül az oxigénből keletkező hidroxilionok válnak egy speciális membránon keresztül haladó szabad töltéshordozóvá. A szenzor által leadott áram az oxigén koncentrációjával lesz arányos. Az eljárás egy olyan elemhez vagy akkumulátorhoz hasonlítható, ahol az egyik elektróda a levegővel nagy felületen érintkezik és a leadott áram a levegő oxigénkoncentrációjával arányos.

Az elektrokémiai szenzorok érzékenysége, amit a membrán gázszelektivitása és az elektróda anyagától függő kémiai reakció biztosít, a különböző gázokra változó. A legérzékenyebb struktúrák a levegőre vonatkoztatva a már említett oxigénre készíthetőek, míg szén-monoxidra, nitrogén-monoxidra, nitrogén-dioxidra, kén-dioxidra az érzékenység két nagyságrenddel rosszabb, de ez még mindig bőven 0,1 térfogatszázalék alatt marad. Csak érdekességképpen: Budapesten 2017. december 26-án a kora reggeli órákban a mért érték 18,3 μg/m^3 volt a nitrogén-dioxidra és 24 μg/m3 az egyéb nitrogén-oxidokra, mindkettő bőven az egészségügyi határérték alatt. Sajnos, a rendeletek az egészségügyi határértékeket gázszennyező tömeg/levegőtérfogat, míg az érzékelőgyártók térfogat/levegőtérfogat arányban adják meg. Csak megemlítjük, hogy az átszámítás anyagfüggő,

és molekulasúly alapján lehetséges. Az elektrokémiai érzékelők élettartama, akárcsak az akkumulátorok és elemek élettartama, véges. A használati feltételektől is függ, de a legkorszerűbb kivitelű szenzoroké a 3-6 évet is elérheti. Kipufogógázok detektálására városi környezetben így is kiválóan alkalmasak.

2.8. Optikai gázérzékelők

A gázérzékelők egy másik nagy csoportját képezik az *infravörös szenzorok*. Ezek optikai elven működnek, egy adott hullámhosszon a gáz fényelnyelését mérik.

Az optikai érzékelők gyakorlatilag fénymérők. Fény detektálására is alapvetően félvezetőket, szilíciumérzékelőket használunk. A félvezetők olyan anyagok, amelyek vezetőképessége a jól vezető fémek és a jól szigetelő dielektrikumok, például az üvegek vagy kerámiák közé esik. Az elektromos áram a töltések vándorlása, vagyis az anyagok vezetőképessége erősen függ az anyagban található szabad töltéshordozók mennyiségétől, koncentrációjától. Fémekben a helyhez kötött atomok, például a rézatomok mellett jelentős mennyiségben találhatóak szabad elektronok, amiket a rézatomok a külső elektronpályájukról adnak a „közösbe”. Ezek az elektronok a réz hordozóban szabadon közlekedhetnek és elektromos térerősség, illetve feszültség hatására vándorolni kezdenek, elektromos áramot hoznak létre. A szigetelőkben, például az üvegben, szinte egyáltalán nincsenek szabad töltéshordozók, így rajtuk keresztül semmiféle áram nem fog folyni. Félvezetők esetén a szabad töltéshordozó-koncentráció alacsony, de létezik, és a töltéshordozó-koncentráció megváltoztatásával, amit áram formájában közvetlenül tudunk érzékelni, akár adalékolással, akár külső fénnyel, számos alkalmazásra nyílik lehetőségünk.

A fény klasszikus fizikai megközelítésben elektromágneses hullám, frekvenciája nagy, a zöld fényé például 600 000 GHz[3] . Csak összehasonlításképpen a műholdas televíziók a 10 GHz, a mobiltelefonok 2 GHz, a szabadtéri sugárzású rádiók 100 MHz[4], a fülünk által érzékelt hanghullámok pedig a 10 kHz[5] tartományba esnek. A hálózati 230 V feszültség 50 Hz, vagyis 50 rezgés per másodperc frekvenciával változik periódikusan. És ezzel a felsorolással át is „szánkáztunk” egy mintegy 15 nagyságrendnyi tartományt.

A fényérzékeléshez áramkeltésre van szükségünk, ez a valóságban meg is történik, de a klasszikus fizikai modellel, a fény elektromágneses természetével a jelenség nem magyarázható. És most jöjjön egy nagyon egyszerű, de alapvetően kvantummechanikai megközelítés.

A fény fotonokból áll. A fotonok kicsi energiacsomagok, egy ilyen csomag nem osztható kisebb részekre és az energiacsomag mérete a fény frekvenciájának függvénye, azzal lineárisan nő. Nagyobb fényfrekvenciákhoz nagyobb fotonenergiák tartoznak. Jegyezzük meg, hogy a fény terjedési sebessége állandó egy adott közegben, levegőben például 300 000 km/másodperc, szilárd, de átlátszó anyagokban általában 200 000 km/másodperc, félvezetőkben pedig nagyságrendileg a 100 000 km/másodperc tartományba esik. A fény hullámhossza fordítottan arányos a frekvenciájával, nagyobb frekvenciákhoz kisebb, rövidebb hullámhosszak tartoznak. A látható fény a 400-700 nm tartományba esik; a hosszabb, kisebb fotonenergiájú hullámhosszakat infravörös, a rövidebb, nagyobb fotonenergiájú tartományt pedig az ultraibolya sávnak nevezzük. Az anyagok a fényt oly módon nyelik el, más néven abszorbeálják, hogy a foton eltűnik és

[3] GHz, gigahertz – egymilliárd rezgés másodpercenként
[4] MHz, megahertz – egymillió rezgés másodpercenként
[5] kHz, kilohertz – ezer rezgés másodpercenként

energiáját az anyagot alkotó részek, például az elektronok átveszik. Fémek esetében az elektronok széles energiatartományban létezhetnek, ezért a fémek a fényt elnyelik, például a látható tartományban átlátszatlanok. A dielektrikumok, üvegek, szabad töltéshordozó híján a fényt nem nyelik el, átlátszóak. Félvezetők esetében a fényelnyelés szabad töltéshordozókat hoz létre, a fotonok elektronokat szakítanak le az atomok külső elektronhéjáról, feltéve, hogy a fotonenergiák erre kellőképpen magasak. Ez szilícium esetében 1100 nm és annál rövidebb hullámhosszakra teljesül, ezért a szilícium kiválóan alkalmas fényérzékelésre, a keletkező többlet töltéshordozó áram formájában detektálható. Érdekességképpen a maximális generált fotoáram szilíciumra 0,6 A/W, azaz egy Watt megvilágítási teljesítmény mellett 0,6 Amper fotoáramot mérhetünk!

A gázok fényelnyelése a molekula- és elektronszerkezetük függvénye. Nem meglepő az eddigiek alapján, hogy bonyolult molekulák és a hozzájuk tartozó elektronelrendeződések jellemezhetőek fényelnyelési spektrumukkal, hullámhosszfüggő abszorbciójukkal. Ennek mérése bonyolult és drága mérőberendezéseket igényel, de lehetőségünk van a spektrumból egy vagy két hullámhosszat kiválasztva olyan érzékelőt készíteni, ami csak az adott gázra detektál koncentrációt. Ezek az infravörös gázérzékelők, mivel az anyagjellemző hullámhosszak általában a közeli infravörös (1000-2000 nm) hullámhosszsztartományba esnek.

Itt kell megemlítenünk, hogy az érzékelő oldalon az esetek többségében szükség van a megfelelő hullámhosszak szűrésére, például a mérés szempontjából zajként jelentkező környezeti fény leárnyékolására. Ehhez speciális optikai dielektrikum szűrőket alkalmazunk.

A fényelnyelést használjuk ki az okosórákba épített pulzusmérők esetében is. Itt a fényforrások zöld színű LED-ek, fénykibocsátó diódák, és a csuklóról visszavert fényt mérjük az idő függvényében. A fényelnyelés az érben áramló vér mennyiségével arányos, a visszavert fény intenzitásának változását az idő függvényében felvéve, annak periódusa meghatározható.

2.9. Áramlásmérők

Láthattuk eddig, hogy az érzékelők, működési elvükben, felépítésükben és technológiájukban rendkívül változatosak. Jelen fejezetben még a bevezetőben is említett alkalmazások közül az 1.4. ábra áramlásmérőire kell kitérnünk. Ezek indukciós vagy ultrahangos elven működhetnek.

Az indukciós áramlásmérők olyan áramló közegek esetén használhatóak, amelyek vezetőképessége nem nulla. Állandó mágneses térbe helyezve az áramló folyadékot, az abban indukált áram a folyadék sebességével arányos lesz; ennek mérésével a folyadék sebessége meghatározható. Ha ismerjük az áramlási térfogatot, akkor megfelelő adatfeldolgozás után a felhasznált mennyiség térfogata is nagy pontossággal rögzíthető.

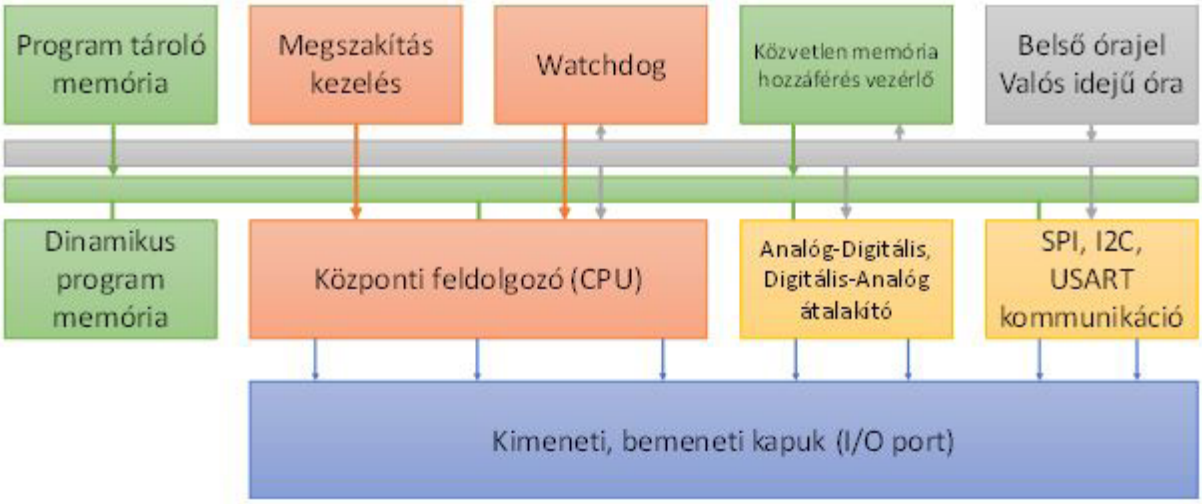
Ultrahangos rendszerekben nincs szükség áramvezetésre, egy ultrahangforrást (20-30 kHz frekvenciájú hanghullám) helyezünk el az áramló folyadék egy rögzített pontján. A hang detektálására mikrofonokat használunk, egyet az áramló folyadékban a forrás előtt, egyet pedig mögötte. Az áramlással szemben haladó hullám detektorhoz viszonyított sebessége kisebb, mint az áramlás irányába haladó hullám sebessége, ezért az később éri el a detektort. A két detektor érzékelésének időkülönbségéből az áramlás sebessége nagy pontossággal meghatározható.

3. MIKROKONTROLLEREK

A szenzor, mint érzékelő eszköz, általában képtelen magában teljesíteni az elvárt feladatokat, a megfigyeléseket ugyanis nem elegendő csak mérni és észlelni, hanem a mérési adatokat el is kell juttatni a megfelelő feldolgozásra, hogy az adatból értékes információ és akár később tudás lehessen. Éppen ezért a szenzorok mellett szükség van egy kommunikációs eszközre is. Sőt, a mérések és a kommunikáció összehangolásához szükség van egy központi egységre is, amely a vezérlő szerepét látja el. A mai szenzorokban ezt a vezérlő szerepet egy mikrokontroller látja el. A mikrokontroller tulajdonképpen a nevében is tükrözi, hogy olyan kontroller, amely méretében kicsi. Ugyanakkor funkcióját tekintve teljes értékű kontroller, azaz képes egymaga, további funkcionális elemek nélkül, a folyamatok vezérlésére.

3.1. A mikrokontrollerek felépítése

A mikrokontrollerek nem azonosak a mikroprocesszorokkal, hiszen utóbbiakban kizárólag a műveletek végrehajtására szolgáló egységet találjuk, míg a mikrokontrollerek magukba foglalják a programkód tárolásához és külön a futtatásához szükséges memóriaterületeket, valamint az alapvető perifériameghajtókat is [Bai 2015]. A mikrokontroller így egy adag tárolómemóriából, egy adag kódfuttatáshoz szükséges memóriából, regiszterekből, művelet-végrehajtó egységből, órajel-generátorokból és a perifériákhoz vezető kommunikációs meghajtókból áll össze.



3.1. ábra: Mikrokontrollerek általános felépítése
(Forrás: A szerző ábrája)

Bár mindegyik mikrokontroller tartalmazza az összes felsorolt architekturális elemet, méretük és teljesítményük nagyon sokféle lehet. Azt, hogy pontosan milyen paraméterekkel kell rendelkezzen egy mikrokontroller, azt az alkalmazás határozza meg. Sok alkalmazás esetén lényeges lehet a jelentős számítási kapacitás, míg másoknál jelentős

tárhelyet kell biztosítani, vagy éppen nem igényel sem nagyobb számítási kapacitást, sem memóriát, így a gazdaságosság és méret lesz a legfontosabb paraméter.

Az első mikrokontroller 1971-ben került piacra a Texas Instruments által. Akkor még az volt a cél, hogy egy számológép összes funkcionalitását egyetlen lapra tegyék fel. Az első mikrokontrollerek órajele 200 kHz körüli érték volt, és az utasításokat egyetlen órajel alatt futtatta, így 200 000 utasítást hajtottak végre másodpercenként. A programok elhelyezésére 1 kB memória állt rendelkezésre és a futás közben 64 x 4 bit információt tudtak tárolni.

Ahogy a számítástechnika többi területén, a mikrokontroller eszközök is sokat fejlődtek az utóbbi években. A mai modern mikrokontrollerek már általában 10-100 MHz körüli sebességgel számolnak, a leggyorsabbak 400 MHz körüli sebességgel. A végrehajtást pedig speciális utasításkészletek segíthetik. A tárolókapacitás területén a 32-64 kB a legelterjedtebb méret, de találhatunk 64 MB-os mikrokontrollert is. A futás közbeni memóriaméretnél gyakori a 16 kB körüli megoldás, de extrém esetben 4 MB memóriával is találunk mikrokontrollert.

Gondolhatnánk, hogy minél gyorsabb egy mikrokontroller és minél több memóriával rendelkezik, annál jobb, azonban nem feltétlenül van ez így. Egyrészt az extrém értékeket felvonultató darabok lényegesen drágábbak, mint az átlagos társaik, ahol ráadásul több gyártó is verseng. Másrészt ugyanakkor a nagyobb órajel és aktív memória sokszor nagyobb áramfogyasztást is generál.

A szenzorok alkalmazásának egy jelentős része olyan környezetben történik, ahol nagy darabszámú szenzort kell kihelyezni olyan környezetbe, ahol a tápellátás leginkább elemről biztosított. Ebben a környezetben olcsó és energiatakarékos szenzorokra és mikrokontrollerekre van szükség. A magas órajel többet fogyaszt, mint az alacsony, ezért a mostani magasabb órajeleket is sokszor lefokozzák a fogyasztás érdekében. Ráadásul ezek a mikrokontrollerek nem is állandóan futnak, idejük egy jelentős részét alvó állapotban töltik és csak a szenzoros mérésekhez ébrednek fel. Jellemzően alvó, de ébredésre időzített állapotban fogyasztásuk μW körüli érték. Azok a mikrokontrollerek, amelyeket kimondottan alacsony fogyasztásra terveztek, futáskor sem fogyasztanak pár száz μW értéknél többet MHz-enként.

A mikrokontrollerek és úgy általában a processzorok sebességének mérésére egy elterjedt módszer a Dhrystone-teszt. A teszt egész számokkal végez műveleteket és ennek sebességét teszi összehasonlíthatóvá különböző architektúrákon. A teszt végeredménye egy szám, amely a műveletvégzési sebességre utal, viszonyítva azt egy bizonyos 1978-as számítógép teljesítményéhez. A DMIPS[6] ugyanakkor nem hozható egy az egyben összefüggésbe az elvégzett műveletek számával, bár természetesen van kapcsolat köztük. Egy mai átlagos mikrokontroller sebessége 10-100 DMIPS. Összehasonlításképpen egy felső kategóriás mobiltelefon processzora 10 000 DMIPS körüli érték, míg egy alacsony fogyasztású laptopokba szerelt felsőkategóriás processzor teljesítménye ennek még háromszorosa.

3.2. Mikrokontroller perifériák

A sebességen és a vele összefüggésbe hozható fogyasztáson, valamint a kódméreten kívül nem elhanyagolható szempont a mikrokontroller csatlakoztatási lehetősége a különféle perifériákhoz. Az egyik jelentős periféria éppen maga a szenzor. A másik jelentős periféria pedig a kommunikációs modul lesz, amely napjainkban még nincs integrálva a mikrokontrollerrel. Természetesen találunk ellenpéldákat is, ahol vagy a szenzor, vagy a

[6] Dhrystone MIPS – Millions of Instructions Per Second

kommunikációs modul a mikrokontrollerrel egy tokban helyezkedik el, azonban egyelőre nem ez számít tipikusnak.

A szenzorok illesztése esetében felmerül a lehetőség, hogy a szenzor analóg formában szolgáltatja a mért jelenségről az adatokat. A mai mikrokontrollerek rendelkeznek analóg–digitális átalakítóval, így közvetlenül is be tudják fogadni ezeket az értékeket. Az átalakítás tulajdonképpen feszültségmérést jelent, amelyet akár másodpercenként milliószor mintavételezve, legtöbbször 10 biten kvantálva határoznak meg. Azoknál a szenzoroknál tehát, amelyek analóg értéket szolgáltatnak, de nem feszültség formájában, ott a beolvasáshoz a mennyiséget át kell alakítani feszültséggé aktív elemekkel. Példa erre a fotorezisztor, amely az ellenállását változtatja meg fény hatására. Ennél az elemnél a változó ellenállást egyszerűen a feszültségosztás mintájára feszültséggé kell alakítani. Analóg szenzorok esetében még gyakori megoldás az is, hogy a szenzor a mért mennyiségnek megfelelő időállandójú jelet küld. Ebben az esetben a mikrokontrollernek az időt kell mérnie, amelyre a legtöbb mikrokontroller képes, hiszen rendelkezik nagy felbontású belső órajellel is.

A digitális szenzorok esetében általában a szenzor egy szabványos interfésszel rendelkezik [EADY 2004]. A leggyakoribb mikrokontroller interfészek az univerzális szinkron és aszinkron interfész (Universal Synchronous and Asynchronous Receiver-Transmitter – USART), a soros perifériainterfész (Serial Peripheral Interface – SPI) és az integrált eszközök közötti (Inter-Integrated Circuit – I2C) interfész. Fontos, hogy a mikrokontrollerek ezeket a vezérlőket magukba integrálják, de azok önállóan, a mikrokontroller számítási egységétől elkülönülve működnek. Így, amikor a mikrokontroller éppen más feladatot lát el, akkor is működhetnek bizonyos kommunikációk más perifériákkal. Sőt, legtöbbször a közvetlen memóriahozzáférés is biztosított, azaz az adatok a feldolgozó egység megkerülésével közvetlenül a memóriába kerülnek.

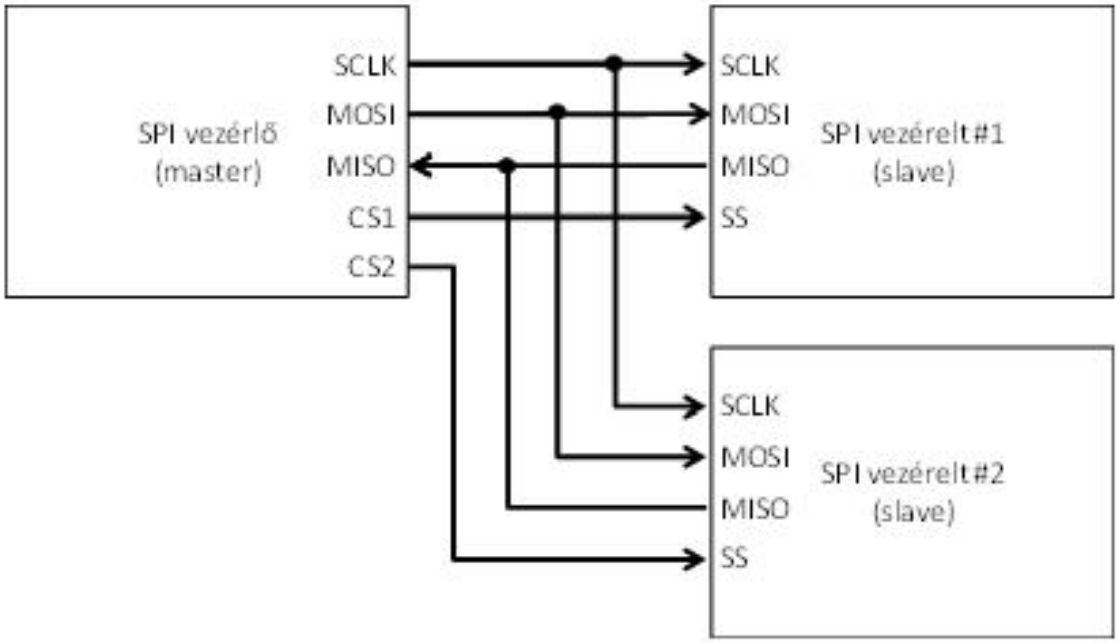
Az USART interfész egy meglehetősen sokoldalú interfész, amely segítségével több különböző adatátviteli protokoll is megvalósítható [Axelson 2007]. Mégis, az egyik leggyakoribb alkalmazása az aszinkron átviteli mód, amelyet egyszerűen legtöbbször csak soros átvitelnek hívunk (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter – UART). Az aszinkron jelző arra utal, hogy nem találunk olyan mechanizmust, amely a kommunikáló feleket szinkronban tartaná, helyette azt mindkét félnek magának kell biztosítania. A kommunikáció két fél között zajlik és mindkét fél rendelkezik egy adó-, illetve egy vevőporttal. A jelszintek meghatározásához még a közös földelésre van szükség, de ezenkívül nem szükséges további összeköttetés. A feleknek a kommunikációt megelőzően, még az átviteli protokollon kívül, meg kell állapodniuk az adatküldés sebességéről, az átvitt bitek számáról és egyéb jelzőbitek használatáról. A kommunikáció beindulásával mindkét fél ezekre az értékekre fog támaszkodni.

Ezt a fajta soros kommunikációt egyszerűsége miatt kedvelik. A kommunikáció sebessége függ a felek képességeitől és az összeköttetés távolságától, de rövid szakaszokon akár az 1 Mbps sebességhez közeli érték is elképzelhető. Nagyobb távolságnál és zajos környezetben a sebesség 9600 Baudra csökkenhet[7]. Jellemzően olyan szenzoregységek vannak UART kapcsolattal csatlakoztatva, ahol a szenzorban szintén van nagyobb mennyiségű adatfeldolgozás és rendelkezik USART modullal. Ilyen például egy GPS modul. Az USART ennél lényegesen többet nyújt a szinkron átvitel lehetőségével. A szinkronizálás megteremti annak a lehetőségét, hogy a kommunikáló felek ne egyeztessenek átvitel előtt vagy akár az átvitel sebessége dinamikusan változhasson.

[7] A Baud a jelarány mértéke; megmutatja, hogy egy adott átvitel során hány modulált jelet továbbítottak egy másodperc alatt. Abból, hogy az adott modulációt használva egy jel hány bit információt hordoz, kiszámítható, hogy adott Baud-érték hány bit átvitelét jelenti másodpercenként.

A kapcsolathoz így még plusz összeköttetésekre van szükség az UART megoldáshoz képest. Az USART modul jelentősége mégis inkább az, hogy segítségével már bonyolultabb átviteli protokollok is megvalósíthatóak.

Nagy sebességű adatátvitel megvalósításához mikrokontrollerek esetében gyakori az SPI-busz (Serial Peripheral Interface) használata. Ebben az esetben a kommunikáció egy vezérlő (master) és egy vezérelt (slave) között zajlik. A kétirányú adatvezeték mellett itt a vezérlő egyben órajelet is biztosít, amely szinkronizálja az átvitelt. A kommunikáció adatküldés és adatlekérés jellegű, mindkét esetben a vezérlő kezdeményez és ő adja az órajelet is hozzá. Az SPI kommunikáció sebessége igen nagy is lehet. Tipikusan 1-8 MHz, de akár ennél nagyobb értékek is előfordulhatnak. Az adatokat ugyanakkor nem lehet messzire szállítani, az összeköttetés tipikusan a mikrokontroller közelében fekvő perifériáig tart. Nagy hátránya még az SPI kapcsolatnak, hogy amennyiben több periféria található, akkor is csak egyetlen vezérlő és vezérelt kommunikáció létezhet egy időben. Ezt az SPI úgy oldja meg, hogy minden egyes perifériához egy külön engedélyező csatlakozás van, és amennyiben az adott periféria nincs engedélyezve, úgy az leválik a vezérlő adat- és órajel-csatlakozásairól. Sok periféria esetén a vezérlőn sok portot kell elkülöníteni erre a célra. SPI kommunikációt elsősorban azok a szenzorok alkalmaznak, ahol nagy mennyiségű adatátvitelére van szükség, legtöbbször azért, mert a szenzor nagyon sűrűn közöl adatot. Ilyen szenzor lehet egy giroszkóp, amely akár másodpercenként több ezerszer is pillanatnyi adatot szolgáltat. Hasonlóan, a kommunikációs modul, amely több Mbps forgalmat is lebonyolíthat, szintén igényelheti az SPI csatlakozást.



3.2. ábra: Az SPI-kommunikáció
(Forrás: A szerző ábrája)

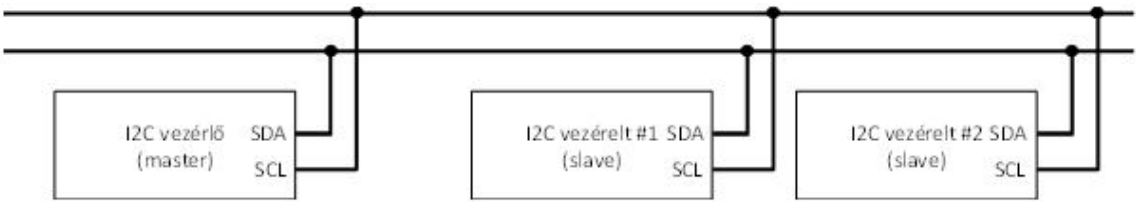
Az I2C (Inter-Integrated Circuit) interfész esetén szintén szinkronátvitelről van szó, a mikrokontroller és a perifériák közötti kapcsolatnál egy adatvezeték és egy órajelvezeték található. Az elrendezés szintén master-slave rendszerben történik, az órajelet a vezérlő szabályozza. Az adatot ugyanakkor már közösen használják, egyetlen vezetéket mindkétirányú forgalomhoz, egymást szükség szerint váltva. Sőt, azért a vezérelt eszköz beleszólhat az órajelbe is, amennyiben az érkező tempót túlságosan gyorsnak találja,

lehetősége van megnyújtani az órajeleket úgy, hogy egy rövid időre magához ragadja az órajelvezeték vezérlését. Különbség az SPI kapcsolathoz képest, hogy a kommunikáció már az adatvezeték segítségével szólítja meg az egyes perifériákat.

A kommunikáció során több periféria is csatlakozhat a mikrokontrollerhez és mindegyikük figyelő állapotban van. Az I2C kommunikáció során a vezérlő először annak az eszköznek a címét közli az adatvezetéken, akit meg szeretne szólítani. Ezt minden egyes csatlakozott periféria értelmezi, de természetesen csak az fog válaszolni az üzenetre, akit megszólítottak. Ezáltal feleslegesek az engedélyező vezetékek.

A kommunikáció sebessége itt is függ a vezérlő és vezérelt távolságától. Összesen három sebességet definiáltak, bár ettől nem szabványos módon el lehet térni. A legkisebb sebesség a 100 kHz-es órajel, amit *normál (normal)* sebességnek nevezünk. A leggyakrabban használt sebesség a 400 kHz-es órajel, ami a szabványban a *gyors (fast)* sebesség. Még ezzel a sebességgel is lehetséges, hogy a periféria a mikrokontrollertől nagyobb, akár 10-20 centiméteres távolságban van. Végül létezik a *nagy sebesség (high speed)*, amely esetben az órajel 3,4 MHz. Ez utóbbi megoldást viszonylag ritkán alkalmazzuk, mert egyelőre az eszközök nagy része nem képes rá.

Az I2C megoldást elsősorban akkor használjuk, ha a mikrokontroller portjainak száma korlátosan áll rendelkezésre vagy a mikrokontrollertől távolabb szeretnénk a szenzort, illetve a szenzorokat elhelyezni. A megoldás előnye, miszerint a perifériák egyedileg megcímezhetőek, egyben hátrány is akkor, ha több eszköznek is ugyanaz a címe az adott alkalmazásnál, hiszen így a kommunikáció lehetetlenné válik. Amikor például egy mikrokontrollerbe több azonos típusú I2C pozícióérzékelő csatlakozik, a szenzoroknak ugyanaz a gyárilag beállított I2C címe lesz, így a mikrokontroller lekérdezésére mindegyik egyszerre válaszolna. Megoldást jelent az eszközök címeinek átkonfigurálása, amennyiben ez lehetséges, illetve ha nem, akkor olyan I2C multiplexer alkalmazása, amely fizikailag elkülöníti az egyes eszközökhöz vezető vezetékeket.



3.3. ábra: Az I2C kommunikáció

(Forrás: A szerző ábrája)

A mikrokontroller perifériakezelése esetén még léteznek egyéb, speciális megoldások is. Az egyik, amelyet érdemes megemlíteni, az a *CAN (Controller Area Network)* interfész. Ezt elsősorban gépjárművekben használják a belső kommunikáció megteremtésére. A mikrokontroller nem a CAN hálózat jeleit állítja elő közvetlenül, hanem egy perifériát vezérel, amely a CAN hálózatra van kötve. A 4.1.1. szakaszban még írunk erről a technológiáról. Jelenleg nem túl gyakori, hogy egy mikrokontroller támogassa a CAN átvitelt. A másik speciális megoldás az USB csatlakozás. Ugyan a számítástechnikában ma az egyik talán legnépszerűbb csatlakozás az USB csatlakozó valamely formája, ugyanakkor a szenzorok világában egyelőre ez egyáltalán nincs elterjedve. A mikrokontrolleren található USB csatlakozási lehetőség inkább egy számítógéppel történő kommunikációs lehetőséget kínál, mintsem egy szenzorcsatlakozást.

3.3. Mikrokontrollerek programozása, operációs rendszerek

A mikrokontrollerek programozása kezdetben nem igazán volt egyszerűnek mondható folyamat, sőt, az első, már mikrokontrollernek tartott típus esetében konkrétan nem is lehetett a mikrokontrollert a felhasználónak programoznia, a kódot a gyártás során rögzítették. Hamar eljutottunk viszont az *EPROM*-ok *(Erasable Programmable Read-Only Memory)* világába, ahol a kódot egy csak olvasható memóriában rögzítették úgy, hogy később ez a terület törölhető és újraírható volt. Kezdetben a törléshez UV-fényt használtak, ma már a memóriaterület elektronikusan törölhető, ez lett az *EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory)*.

Ma a mikrokontrollerekben többnyire *Flash*-memóriát találunk, amely ugyanúgy EEPROM, de a törlés nagyobb blokkokban történik és általában jóval lassabb művelet, mint az egyes bájtok írása és olvasása. A programkód tehát a Flash-memóriába kerül. Több mikrokontroller a Flash-memória mellett rendelkezik még hagyományosnak mondható EEPROM-memóriával is, a mai modern EEPROM területek ugyanis akár már bájtonként újraírhatóak, azaz a törlés nem érinti a teljes területet.

A legelső programozható mikrokontrollerek még nagyon kevés memóriával rendelkeztek a programkód tárolására. Bár már léteztek magas szintű programnyelvek, a programkódot a hely szűke miatt még gépközeli assembly nyelven írták. A programkód számára rendelkezésre álló terület növekedésével aztán megjelentek a magasabb szintű nyelvek is, elsősorban a C nyelv.

Ma a legelterjedtebb programnyelv a programozáshoz a C, de a memóriaterület bősége miatt találunk egyebet is. Egyrészt megjelent a C++ objektumorientált nyelv is a mikrokontrollerek kapcsán, bár ritka, amikor valóban szükség lenne az objektumorientált programozásra ezen a területen. Másrészt megjelentek scriptnyelvek is, amelyek érdekessége, hogy gépi kódra történő fordításuk futási időben történik, azaz a mikrokontroller egy parancsfeldolgozót futtat. A scriptnyelvek közül a *micropython, LUA* és *BASIC* a népszerű, illetve vannak gyártóspecifikus scriptnyelvek is. A scriptnyelvek jelentősége, hogy a mikrokontroller programozása egyszerűvé és maga a program hordozhatóvá válik. A szenzorok illesztése így egyszerűsödik, feltételezve, hogy a szenzor vezérléséhez való kódot már valaki más megírta az adott környezetben. A kódban már csak a folyamat vezérlését kell megírni és kész is a működő szenzor.

A szenzorokhoz általában a gyártó példakódot is szokott biztosítani, amely legtöbbször C nyelven a meghajtó forráskódját is tartalmazza. Emellett sokszor tapasztalható, hogy egy adott típusú mikrokontroller köré csoportosult közösség szintén elkészíti a népszerű szenzorok meghajtókódjait és azokat közkinccsé teszi. Egyik ilyen nagy közösség az *Arduino* köré épült közösség.

Az Arduino 2003-ban jelent meg és egy olcsó belépőt kínált a mikrokontrollerek akkor még drága és nehezen kezelhető világába. Olcsó mikrokontrollert kínált egy egyszerű fejlesztőeszközzel [MARGOLIS 2011]. A kezdeményezés olyan jól bevált, hogy mára több neves gyártó is Arduino-kompatibilis termékekkel jelent meg, illetve 2017 októberétől az ARM gyártóval is partnerséget kötött. Az Arduino magában foglalja a programkód fejlesztési környezetet, amely mára már több, nem is feltétlenül Arduino eszközzel kompatibilis. A legtöbb, nem túl speciális szenzor esetében számíthatunk rá, hogy az Arduino közösség már elkészítette a megfelelő meghajtót.

Egy másik nagy közösség az *Mbed* platform köré csoportosult. Az Mbed nagyon sok ARMmikrokontrollert támogat, sok neves gyártó megtalálható itt, a nagyokat említve: STMicroelectronics, NXP Semiconductors. Szintén jellemző, hogy a különféle szenzorokhoz a közösség elkészíti a megfelelő meghajtókat és az többnyire az Mbed platform

összes támogatott mikrokontrollerén felhasználható. Az Arduino és az Mbed együtt, mint keretrendszerek, szinte az összes mikrokontrollert lefedik.

Lényeges különbség is van azonban az Arduino és az Mbed megközelítése között. Az Arduino esetében a megközelítés továbbra is a *nyers vas (bare metal)* szemléletű, azaz a fordító gépi kódot fordít, majd az közvetlenül az adott mikrokontrolleren fut. Az Mbed ezzel szemben már operációs rendszernek tartja magát, amely, mint egy köztes elem beépül a mikrokontroller közvetlen kezelő regiszterei és a programkód közé. Ez szükséges is, hiszen jóval többféle mikrokontrollert támogat és így, illetve hardver absztrakciós rétegeken keresztül oldható meg leginkább a kompatibilitás a különböző típusok között. Az MbedOS esetében ugyanakkor még nem találkozunk olyan operációs rendszer funkciókkal, amelyet megszoktunk a számítógépes környezetben.

Vannak azonban a valódihoz nagyon hasonló operációs rendszerek mikrokontrollerekre is. Az egyik leglényegesebb funkció, amit kínálnak a többszálas programkódfuttatás, illetve ezen keresztül az adatok feldolgozása akár valós időben. Az *RTOS (Real-Time Operating System)* felkínálja a lehetőséget, hogy a feladatok elvégzéséhez határidőket állítsunk be. Az operációs rendszer ezután prioritások alapján vagy folyamatok megszakításával eléri, hogy a mikrokontroller a kitűzött feladatokat határidőre elvégezze. Éppen ezért az RTOS rendszer legfontosabb eleme az ütemező, amely a feladatokat ütemezi.

A szenzorok esetében ritka az, amikor valóban valós idejű operációs rendszerre lenne szükségünk, bár sok szenzorhoz kell nagyon pontos időzítés. A kommunikáció azonban gyakran igényli párhuzamosan futó folyamatok kezelését és vezérlését, így ezeknek az operációs rendszereknek a speciális, valóban időkritikus szenzorok kezelése mellett inkább a kommunikáció területén van jelentőségük.

4. SZENZORKOMMUNIKÁCIÓ

Mint ahogy azt írtuk, a szenzorok alkalmazásánál a mérési eredményeket legtöbbször nem helyben használják fel, hanem eljuttatják azokat egy másik, gyakran távoli pontra, ahol más szenzorok adataival együtt feldolgozzák azokat és így a mért adatokból információ és tudás épül. A mért adatokat így a szenzor egy kommunikációs csatornán juttatja távolra. A kommunikációt a mikrokontroller vezérli és a kommunikációs modul hajtja végre [Hersent 2012].

Mint ahogyan a számítógépes kommunikáció esetében, itt a szenzorok esetében is nagyon sokféle kommunikációs megoldás lehetséges. Sok esetben léteznek kényszerek, amelyeket az adott alkalmazás, illetve környezete diktál. Egy autó fékberendezésénél például a kommunikációnak gyorsnak és megbízhatónak kell lennie, míg egy mezőre telepített hőmérsékletmérő szenzortól nem követelünk nagy megbízhatóságot és gyorsaságot, viszont várhatóan kis fogyasztásúnak és nagy hatótávolságúnak kell lennie. Az alábbiakban bemutatjuk a legjellemzőbb kommunikációs megoldásokat tulajdonságaik szerint csoportosítva.

4.1. Vezetékes kommunikáció

Akárcsak a számítógépes hálózatok esetében, a vezetékes kommunikáció ma még megbízhatóbb, mint a vezeték nélküli társa. A vezetékben ugyanis nem kell számítani számottevő interferenciára, illetve az átviteli közeghez is csak az fér hozzá, akit vezetékkel bekötöttek. Természetesen a vezetékes kommunikációnak is van hátránya, az egyik legnagyobb talán a mobilitás korlátozottsága. Sőt, mint látni fogjuk, szenzorok esetében a nagyobb távolságok áthidalása sem gazdaságos a vezetékes megoldásokkal. Vezetékes megoldást tehát olyan szenzorok esetében érdemes választani, ahol fontos a megbízható, sőt, akár időkorlátos adatkommunikáció. Elsősorban ezek az ipari rendszerek, ahol robotok irányítása, kritikus folyamatok monitorozása a feladat [Anderson 2014]. Azt azonban meg kell jegyeznünk, hogy ahogyan a vezeték nélküli átviteli technológiák fejlődnek, úgy ezekről a területekről is elkezdett kiszorulni a vezetékes kommunikáció, mert sokszor a mobilitás egyre erősebb követelmény ebben a környezetben is.

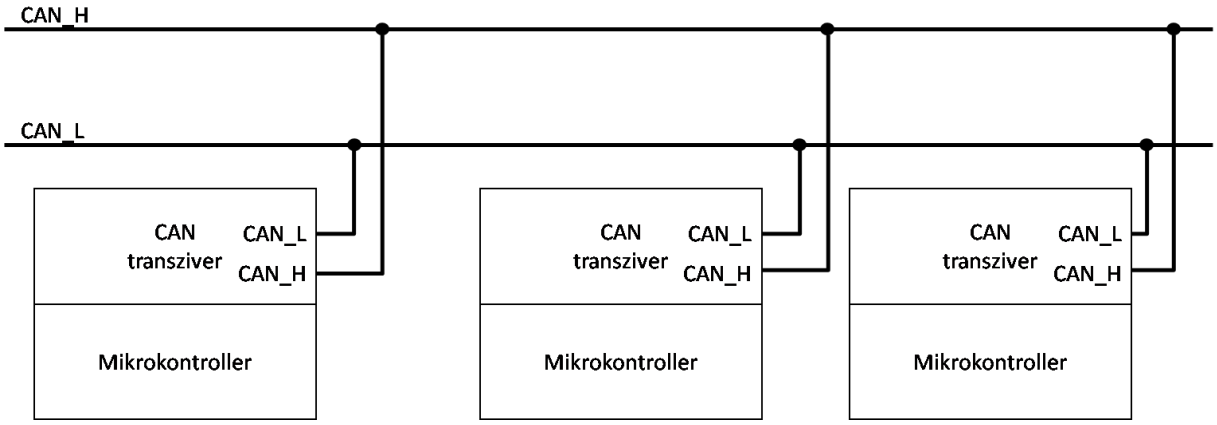
4.1.1. Controller Area Network – CAN

A CAN technológiáról már volt szó a mikrokontrollerek kapcsán, hiszen ezt a technológiát több mikrokontroller is alapból támogatja. Fontos azonban, hogy a CAN esetében a mikrokontroller csak magát a protokollt támogatja, és annak üzeneteit szolgáltatja, a tényleges kommunikációhoz szükséges jelszinteket nem a mikrokontroller állítja elő [Natale 2012], [Voss 2005].

A CAN technológia ma leginkább mint az autókban használt hálózat ismert. Az első CAN-busszal szerelt autó egy 8-as sorozatú BMW volt, amelyet 1988-ban gyártottak. Majd ezt követően egyre több ilyen autó készült. Ma talán nem is gyártanak már olyan autót, amelyben ne lenne CAN kommunikációs rendszer. Ráadásul a CAN technológia nemcsak a gépkocsikban terjedt el, hanem kedvező tulajdonságai miatt az iparban is. A

CAN technológia ugyanis megfelelően magas átviteli sebességet ígér nagy távolságra is, sőt, üzenetprioritásokat is kezel.

A CAN hálózatokban a jeleket a CAN-buszon továbbítják, amely egy érpárból áll, mindkét végén egy meghatározott értékű ellenállással lezárva. Az érpár a CAN-magas (CAN high) és CAN-alacsony (CAN low) nevet kapta. A nagy távolság elérésének érdekében kulcsfontosságú szerepet játszik, hogy a CAN-buszon a jeleket feszültségszint-különbséggel viszik át. Ez azt jelenti, hogy amennyiben a két ér között a feszültségkülönbség nagyobb, mint egy küszöbérték, akkor a bitszint *domináns* és logikai 0-nak vesszük, míg, ha egy adott küszöbértéknél kisebb, akkor *recesszív* bitszintről beszélünk, melynek logikai értéke 1. Ezeket a jelszinteket állítja elő a logikai jelekből a CAN transceiver, pontosabban a recesszív bitszintnél csak hagyja, hogy a buszt lezáró ellenállások kiegyenlítsék a feszültség szinteket.



4.1. ábra: A CAN-kommunikáció
(Forrás: A szerző ábrája)

Mivel a lehetséges interferencia mindkét érpárra ugyanúgy hat, ezért nagyobb interferencia esetén is megmaradnak a feszültségkülönbségek, az átvitel hibátlan marad. A még problémamentesebb átvitel érdekében általában sodort érpárt használnak, illetve gyakori az is, hogy az érpárt még földelik is. Más fizikai korlátok miatt is azonban a busz maximális hossza függ az elérni kívánt sebességtől. Ez a technológia képes 1 Mbps sebesség nyújtására maximum 40 méteres hálózat esetében. 100 méteres távolság esetében az elérhető sebesség 500 kbps-re csökken, majd 5 kilométeres távolságban a sebesség már csak 10 kbps.

A CAN hálózatban minden eszköz lehet akár küldő is és címzett is. A küldő lesz az, aki vezérli a buszt, a címzett pedig, aki az elküldött információt fogadja. Az üzenetküldés a CAN technológia esetében kisméretű keretekben történik, ahol az átvitt adat hossza maximum 8 bájt *(Data frame)*. Az üzeneteknek azonosítójuk van, amely egyben prioritást is jelöl. Ez egy 11 bites érték, azonban szükség esetén további 18 bittel kiegészíthető. Az elküldött üzenet 15 bites CRC[8] védőkóddal van kiegészítve, amely 5 hibás bitet is képes azonosítani.

Fontos még, hogy az üzenetküldés nyugtázási lehetőséggel is rendelkezik. Ha valamelyik kommunikáló modul veszi és feldolgozza az üzenetet, az egy erre szolgáló bittel jelezheti ezt a küldőnek. Fontos, hogy az üzenet azonosítója nem a küldőt vagy a címzettet azonosítja, hanem az üzenetnek, információnak ad tulajdonképpen egy azonosítót. Ezt az üzenetet bárki adhatja és bárki fogadhatja.

[8] Cyclic Redundancy Check – ciklikus redundanciaellenőrzés

A kommunikáló modulok mindig figyelnek a saját kommunikációjukra is. Amennyiben azt tapasztalják, hogy az adásukat valaki megváltoztatja, azaz egy recesszív tulajdonságú bitszintnél domináns bitszintet észlelnek, akkor abbahagyják a kommunikációt, mert ez egy másik, nagyobb prioritású üzenetet jelez. Ez a fajta prioritáskezelés kizárólag az üzenetazonosítókra érvényes, más esetekben az eszközök érzékelik az adatforgalom tényét és megvárják annak befejezését. A CAN-busz esetén tehát a domináns tulajdonság elnyomja a recesszív tulajdonságot. A legnagyobb prioritású üzenet a 0 azonosítójú üzenet, amely csupa domináns bitszintet tartalmaz.

Az üzenetküldés mellett lehetőség van arra is, hogy az egyik eszköz információt kérjen egy másik eszköztől. Erre a kérés típusú üzenet szolgál *(Remote frame)*, amely csak lényegében egyetlen jelzőbitben és az üres adatmezőben tér el az adatküldő üzenettől. A kérésben az adott üzenet azonosítója szerepel, amely információt az eszköz meg szeretné kapni. Amelyik eszköznek birtokában van ez az információ, az válaszolni fog erre az üzenetkérésre.

Teljesen azonos logikai működéssel, de más fizikai jelszintekkel és picit más technikai megoldásokkal létezik a hibatűrő CAN hálózat is, az *FT (Fault Tolerant) CAN*. Itt a jelszinteket úgy alakították ki, hogy amennyiben az egyik vezeték megsérülne, a kommunikáció továbbra is folytatódhasson. A kommunikáció sebessége ugyanakkor ebben az esetben alacsonyabb, mint a nem hibatűrő CAN-busz esetében.

4.1.2. Fieldbus – Terepbuszrendszer

Az ipari alkalmazásoknál az analóg adattovábbítást a terepbusz (Fieldbus) kommunikációs rendszerek forradalmasították az 1980-as években [SEN 2014]. Ebben az időszakban számos terepbusz megoldás jelent meg nagy gyártóktól, azonban a terepbusz név megjelölésen túl ezek a megoldások nagyon különbözőek voltak működésükben és képességeikben. Tulajdonképpen a korábban ismertetett CAN-busz is a terepbuszrendszerek közé tartozik, csupán az alacsony költségei miatt ez a megoldás adaptálható lett a gépkocsigyártásban is.

A terepbuszrendszerek kialakulásakor az akkori számítógépes hálózati technológiák nem voltak képesek kielégíteni az ipari igényeket, amelyek közül a legjelentősebb a valós idejűség. Éppen ezért alakulhattak ki a számítógép-hálózatoktól teljesen eltérő hálózati technológiák. Itt egy érdekes kivétel az ARCNET protokoll, amelyet kezdetben éppen számítógép-hálózatokba szántak és onnan űzte az ipari alkalmazásokhoz az Ethernet protokoll.

A legjelentősebb piaci részesedéssel bíró terepbusz kommunikációs protokoll a PROFIBUS protokoll. Ez 2017-ben az iparban alkalmazott hálózatok teljes piacának a 14%-át teszi ki. Megjegyzésként a többi más, jelentős piaci részesedéssel bíró protokoll, köztük a CAN-buszra épülő rendszerek is, nagyjából 5% részesedéssel bírnak.

A *PROFIBUS (Process Field Bus)* protokoll esetében vezérlők (master) és vezérelt (slave) eszközök vannak összekapcsolva. A vezérelt eszközök között találjuk a szenzorokat, amelyek csak kérésre válaszolhatnak, azaz csak akkor küldhetnek adatot, ha egy kérés érkezik hozzájuk. A vezérlők között a *PROFIBUS FMS (Fieldbus Message Specification)* protokoll zajlik, amely nem determinisztikus kommunikációt valósít meg. A vezérlők egymás között kiosztják, hogy melyiknek van pillanatnyilag joga a kommunikációs vonal használatához és így elkerülve az ütközéseket, adott időben kizárólag ők foglalják a vezetéket. Ezt az eljárást *vezérjelek (token)* egymás közötti küldözgetésével végzik.

A vezérlő és vezérelt eszközök esetében már determinisztikus a kommunikáció, itt a *PROFIBUS DP (Decentralised Peripherials)* protokoll működik. A két protokoll egyébként együtt is használható ugyanazon a kommunikációs csatornán, így nem szükséges külön hálózatot építeni mindkét funkció számára. A kommunikációt az RS-485 átviteli technológia vagy optikai szálas megoldás biztosítja. Létezik még egy harmadik protokoll is, a *PROFIBUS PA (Process Automation)*, amelyet direkt úgy fejlesztettek, hogy iparilag veszélyes helyekre is eljuthasson a hálózat. Ez a fajta kommunikáció nem okozhat tűzesetet vagy robbanást. A kommunikációs vezetékeken egyben a szenzorok vagy beavatkozók táplálása is megoldott, a *Manchester Bus Powered (MBP)* technológia révén. A kommunikációban az üzenetek azonban megegyeznek a PROFIBUS DP protokoll üzeneteivel, így átjátszók segítségével az üzenetek továbbítása egyszerűen megoldható.

Az RS-485 kommunikáció a CAN-buszhoz hasonlóan szintén differenciális jelszinteket használ. A legnagyobb elérhető sebesség a 12 Mbps, amely maximum 100 méteres hossz esetén használható, míg a legnagyobb lefedhető távolság 1200 méter, amely esetén azonban a bitsebesség 9,6 kbps-re esik vissza. Optikai átvitel esetén a távolság megnövelhető akár 15 km-re is. Rendelkezésre állnak olyan eszközök, amelyek az RS-485 jelzéseket lefordítja száloptikai kimenetre és bemenetre, így ezeket használva a két kommunikációs megoldás egyszerűen összekapcsolható. Optikai szálat akkor érdemes választani, ha nagy távolság áthidalása a cél, vagy a hálózat helyszínén olyan erős az elektromos interferencia, hogy az már az amúgy árnyékolt, csavart érpárokon folyó kommunikációt is zavarja. A robbanásveszélyes környezetben használható MBP-kommunikáció esetében a bitsebesség 31,25 kbps, a lefedhető távolság pedig 1900 méter. Ebben az esetben a bitsebesség nem állítható, mindig pontosan ugyanennyi.

4.1.3. Ipari Ethernet rendszerek

Ahogy az 1980-as években az ipari hálózatokban a terepbusz-rendszerek leváltották az analóg rendszereket, úgy történik most ez az ipari Ethernet rendszerekkel, amelyek fokozatosan leváltják a terepbusz-rendszereket. Ahogy azt írtuk, a terepbuszrendszerek megjelenésének idején tulajdonképpen már léteztek számítógépes hálózatok és akkor alakult ki az Ethernet protokoll is, azonban akkoriban ezek a megoldások nem feleltek meg az ipari hálózatok számára, így nem tudtak az ipari szegmensben elterjedni. Mára azonban sokat fejlődött az Ethernethez kapcsolódó technológia, így elhárultak a technikai akadályok és elkezdődött a terepbuszrendszerek kiszorítása az ipari hálózatok területéről.

Az Ethernet protokollt széles körben használják és mára annyira elterjedt a számítógépes hálózatok területén, hogy a nagy versenynek és a sok fejlesztésnek köszönhetően olcsó, gyors és gazdaságos megoldást tud kínálni szinte minden alkalmazásban. Ezek a tulajdonságok képessé teszik, hogy viszonylag gyorsan meghódítsa az ipari hálózatok területét is. A HMS Networks független ipari kommunikációs megoldásokat szolgáltató cég felmérése szerint, míg 2017 elején az ipari Ethernet-megoldások 46%-os részesedéssel bírtak, szemben a terepbuszok 48%-os részesedésével, 2019-re már az Ethernet megoldások részesedése 59% volt, szemben a terepbuszok 35%-os részesedésével. Feltehetően azonban az ipari Ethernet rendszerek sem lehetnek majd mindörökké piacvezetők. Jelenleg 6%-os piaci részesedéssel vannak jelen a vezetéknélküli technológiák, ugyanakkor éppen ez a szegmens produkálja a legnagyobb fejlődési ütemet, amely jelenleg évi 30%.

Az ipari Ethernet megoldások közül két versengő protokoll bír kiemelkedő piaci részesedéssel, ezek az *EtherNet/IP* és a *PROFINET* protokollok. Mindkét megoldásra

természetesen jellemző, hogy Ethernet hálózatot használnak és lehetőség van valós idejű adatátvitelre is.

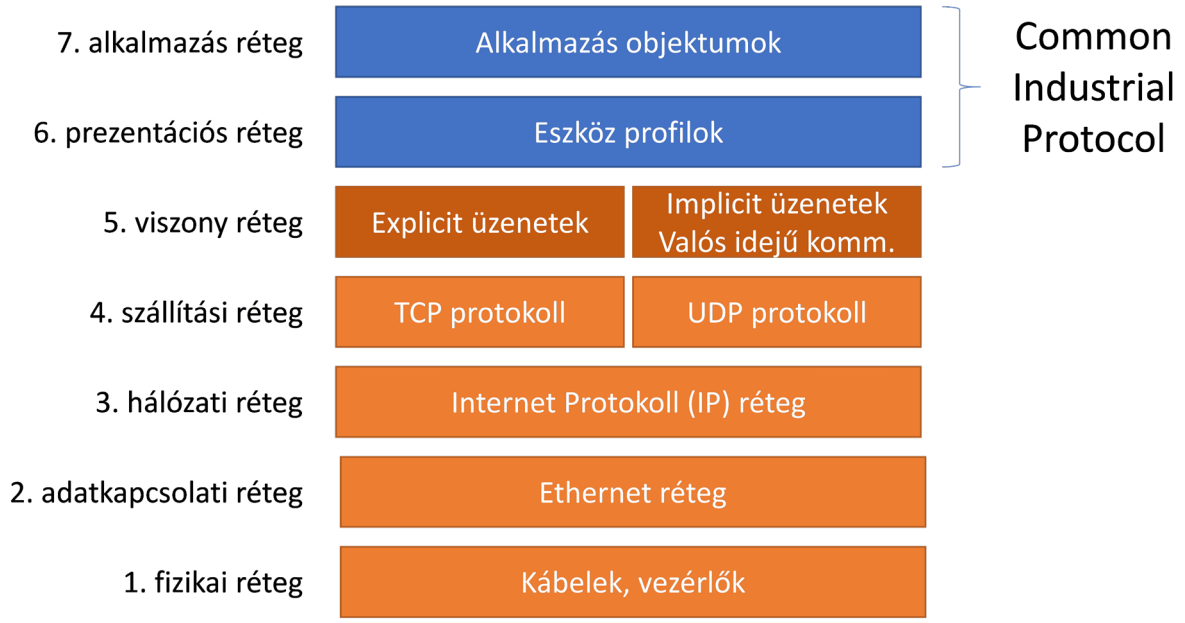
Az *EtherNet/IP*-protokoll *(EtherNet Industrial Protocol)* nem tesz semmilyen módosítást sem a már létező Ethernet és Internet Protokoll (IP) szabványokban, maga a protokoll a TCP/IP feletti rétegekben van. Ez hatalmas előny minden más protokollal szemben, hiszen az Ethernet interfészek és a hálózat felépítéséhez szükséges eszközök ma olcsónak számítanak, nagy sebességet érnek el és biztosítva van fejlesztésük is, hogy a jövőben még gazdaságosabb és még gyorsabb eszközöket gyártsanak. A módosítás hiánya ugyanakkor hátrányt is jelenthet, hiszen, mint írtuk, az ipari hálózatok és az irodai hálózatok jelentősen eltérnek egymástól. A legszembetűnőbb igény a valós idejűség; az ipari alkalmazásoknál elvárjuk, hogy a hálózatban összekapcsolt szenzorok és más eszközök rövid időn belül, nagyjából azonnal válaszoljanak.

Az Ethernet-nek és az IP-nek nincs olyan mechanizmusa, amely ezt garantálni tudná. Az EtherNet/IP azonban kicsit máshogy értelmezi a valós idejűséget, a funkcionalitásból indulnak ki. Állításuk szerint nem a protokollnak kell valós idejűnek lennie, hanem az egész rendszernek. Éppen ezért a valós idejűségre utaló mechanizmusokat nem a kommunikációs protokollban fogjuk megtalálni, hanem az eszközökben, amelyek óráját képes olyan pontossággal szinkronizálni, hogy azok egy megfelelően gyors hálózatban már nagyon gyors, tulajdonképpen valós idejűnek megfelelő válaszidőket produkáljanak. Példaként említve, konkrét számokkal, egy 100 tengelyt vezérlő alkalmazás egy gigabites hálózaton elérheti, hogy az egyes tengelyeket 1 ms alatti idővel lehessen frissíteni. Bár az Ethernet hálózatban a kommunikáció nem determinisztikus, mégis az igen gyors sebesség miatt az 1 ms körüli válaszidő tulajdonképpen teljesíthető.

Az EtherNet/IP protokoll a TCP/IP hálózat fölé épül és ott, az alkalmazási rétegben, a TCP és UDP protokollokat használva valósítja meg a *Common Industrial Protocol*-t *(CIP)*. A CIP egy objektumorientált protokoll. Minden CIP objektum rendelkezik attribútumokkal, amelyek az adatot írják le, szolgáltatásokkal, amelyekkel parancsokat lehet adni, kapcsolatokkal és viselkedésekkel, amelyek az attribútumok és a szolgáltatások közötti kapcsolatot adják meg. A megalkotott objektumcsoportokat ezután ugyanúgy implementálják a hálózat összes eszközén, ezáltal az eszközök együtt tudnak működni.

Azért, hogy több gyártó eszköze is együtt tudjon működni a hálózatban, szabványos készülékprofilokat definiálnak, amelyek adott objektumok csoportjai. Ezeket az objektumokat minden gyártó pontosan ugyanúgy implementálja. Az eszközök a kommunikáció során már nem a vezérlő–vezérelt mintát követik, hanem léteznek adatkibocsátók (producer) és adatfogyasztók (consumer). A fogyasztók megkapják a kibocsátók adatait, ami egy pont–többpont összeköttetésnek felel meg. Ez sok esetben, amikor több fogyasztó is van, hatékonyabb, mint a vezérlő–vezérelt módszer által megvalósított pont–pont összeköttetés többszörözése.

Megemlítjük, hogy a CIP nem csak EtherNet és TCP/IP hálózaton lett megvalósítva, hanem van olyan implementációja is, amely a CAN hálózatokra épül. Ez a DeviceNet protokoll. Sőt, további két más, itt most nem ismertetett kommunikációs protokollra is felépíthető.

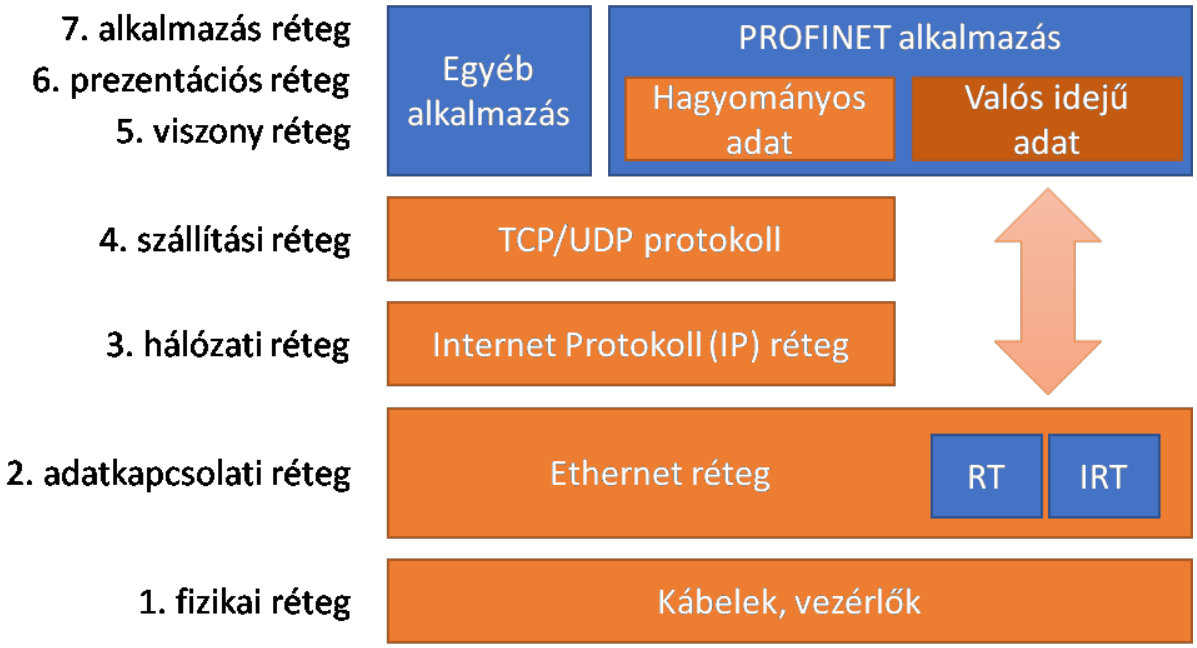


4.2. ábra: EtherNet/IP-protokollrétegek
(Forrás: A szerző ábrája)

A *PROFINET* protokoll is az Ethernet protokollra épül, azonban itt, ellentétben az EtherNet/IP protokollal, cél volt, hogy jobban közelítsék a determinisztikus működést. Három protokollszintet definiálnak. Az első szint a nem időkritikus adat szállítása, ahol a reakcióidő a 100 ms nagyságrend. Ebben az esetben a TCP/IP protokollt használják. Abban az esetben, ha a valós idejűség is követelmény és a válaszidő 10 ms nagyságrendű, akkor a *valós idejű (Real-Time – RT)* protokoll használható, míg az ennél is szorosabb, 1 ms nagyságrendű időkövetelmények esetén az *izokron valós idejű (Isochronous Real-Time – IRT)* protokoll használható.

A hálózatban részt vevő eszközük a PROFINET IO rendszert használják, mely szintén az adatkibocsátó és -fogyasztó modellre épít. A rendszer elemei a *kontroller (IO Controller)*, amely az irányítást végzi, az *eszköz (IO Device)*, amely az irányított eszköz esetleg további almodulokkal és végül a *felügyelő (IO Supervisor)*, amely legtöbbször egy PC és az eszközök paraméterezését és diagnosztizálását végzi.

A PROFINET IO eszközök mind IP kommunikációt használnak, ezért rendelkeznek IP-címekkel is. Az IP-címek általában dinamikusan kerülnek kiosztásra, ezért az egyes eszközöknek van beállított, statikus eszköznevük is. A valós idejű kommunikáció igénye esetén a PROFINET megkülönbözteti az Ethernet kereteket. A megkülönböztetett RT Ethernet keretek magasabb prioritást kapnak, mint a többi keret. Ennél magasabb fokú determinisztikusságot, prioritást nyújt az izokron valós idejű átvitel (IRT). Itt is a pontos kommunikáció alapja a pontos óraszinkronizálás. Ezen túlmenően a rendszer sávszélességet tartalékol a kommunikáció számára. Csak amennyiben az összes IRT keret már elküldésre került, akkor jöhetnek az RT és egyéb kommunikációs keretek. Ráadásul a hálózat topológiája is ismert, így aztán a keretek ütemezésénél ezt is figyelembe veszik.



4.3. ábra: PROFINET-protokollrétegek
(Forrás: A szerző ábrája)

A PROFINET-et és a korábban ismertetett PROFIBUS protokollokat közös cég tartja kézben. A két protokoll között még átjárás is létezik, IO-Proxy-k segítségével a PROFIBUS hálózat felcsatlakozhat a PROFINET hálózatra.

Összességében elmondható, hogy a szenzorok kommunikációjához ipari környezetben egyelőre még túlnyomó többségben vezetékes hálózatokat használnak. Az analóg bekötések mára eltűntek, helyüket a digitális adattovábbítás vette át. Az alapvető technológiákon túl, mint amilyen az RS-232 vagy RS-485, megjelentek bonyolultabb kommunikációk is, mint a CAN és az Ethernet. Az ipari hálózatokban azonban az adatkapcsolat szintű összeköttetésen túl magasabb szinten is definiálnak protokollokat. Ezek a protokollok egészen mostanáig túlnyomó részben a determinisztikus összeköttetést is megvalósító adatkommunikációkra épültek, azonban a jövőben már ennek a helyét az Ethernet veszi át. Az Ethernet esetén cél, hogy azokat az eszközöket használják, amelyeket az irodai eszközök is használnak, így nincs lehetőség a determinisztikus átvitelre. Azonban a jelenlegi valós idejűségi követelmények, amelyek 1 ms körüli reakcióidővel számolnak, az Ethernet gyors adatátvitele segítségével nem determinisztikusan is teljesíthetőek.

4.2. Vezeték nélküli kommunikáció, kis távolságokra

A szenzoros alkalmazások igen nagy részében fontos követelmény a szenzor mobilitása, mozgathatósága. Ez nem feltétlenül jelenti azt, hogy az eszköznek valóban mozognia kell, jelentheti azt is, hogy a szenzor telepítés ad hoc jelleggel történik és a telepítésnél játszik fontos szerepet a mobilitás. Mindenesetre mobilitás esetén szóba se jöhetnek a vezetékes kommunikációs protokollok, helyettük vezeték nélküli kommunikációt kell választani. Emellett szintén nagy számban találunk olyan szenzoros alkalmazást is, ahol a szenzorhálózat nagy területet fed le, illetve sokszor ez a nagy terület emberek által nem lakott és nincsen kiépítve még elektromos hálózat sem. Ilyen esetben is a szenzorhálózat vezeték nélküli kommunikációt fog alkalmazni. Végül pedig, ahogy azt korábban írtuk, az ipari környezetben, ahol gyakorlatilag ugyan van lehetőség a vezetékes kommunikáció

használatára, a nagyobb fokú szabadság, könnyebb átkonfigurálhatóság miatt szintén terjedőben vannak a vezeték nélküli kommunikáció fajtái.

A vezeték nélküli kommunikáció ma praktikusan a rádióhullámok segítségével véghez vitt adatátvitelt jelenti. Egyelőre csak újdonságként, mint egy jövőbe mutató technológia, megjelent a fénnyel történő kommunikáció is, de elterjedtnek egyáltalán nem mondható. Vezeték nélküli környezetben, a közelmúltban a szabadtéri pont–pont összeköttetéseknél használtak fényátvitelt, azonban a rádiós átvitellel szemben csekély előnyt és jókora hátrányt tudott ez a kommunikáció felmutatni, így aztán mindmáig ezek a megoldások még fejlesztésre szorulnak. Beltéri környezetben, a kisebb távolságok és a kedvező környezeti adottságok miatt ma már ígéretesebb a fényre épülő technológia alkalmazása. Mindazonáltal szenzorok esetében egyelőre nehéz az előnyüket hasznosítani és körülményes a követelményeknek megfelelni, így aztán ma szinte kizárólag rádióhullámokra épülő vezeték nélküli kommunikációval találkozunk ezen a területen.

Amennyiben rádióhullámok segítségével viszünk át digitális jeleket az egyik pontról a másikra, *modulációt* alkalmazunk, melynek segítségével az adó úgy formálja a jeleket és egy antenna segítségével kisugározza, hogy azokat a vevőoldalon a *demoduláció* vissza tudja alakítani digitális jelsorozattá. Számos modulációs eljárást ismerünk, azonban nehéz egyetlen megoldásra is azt mondani, hogy a legjobb lenne. Manapság a *QAM* modulációt *(Quadrature Amplitude Modulation)* használják a legtöbb olyan helyen, ahol a teljesítmény fontos, mint a legmodernebb WiFi hálózatok, azonban a vezeték nélküli szenzorhálózatok esetében más tényezőket is számításba kell venni, olyanokat, mint az energiafelhasználás, az egyszerűség vagy az ár. E specifikus tényezők azt eredményezik, hogy a klasszikus vezeték nélküli számítógép-hálózatoktól eltérő modulációs technológiákkal fogunk találkozni ezen a területen.

A következőkben azokat a modulációs eljárásokat és a rá épülő kommunikációs megoldásokat mutatjuk be, amelyek jellemzőek a mai szenzorok esetében.

4.2.1. GFSK moduláció

A moduláció ebben az esetben a *Gauss-féle frekvenciaváltó kódsorozat (Gaussian Frequency Shift Keying – GFSK)* alapján történik. A moduláció során 0 és 1 biteket kódolnak fizikai jellé. Nagyon hasonlóan a *frekvenciamodulációhoz (Frequency Modulation – FM)*, itt is a frekvencia változik, a 0 bit átvitelénél csökken a vivőfrekvencia, míg az 1 bit átvitelénél pedig nő. A GFSK esetében azonban ahelyett, hogy egy 0–1 átmenetes négyszög jelet adnánk a bemenetre, a jelet előbb egy Gauss-szűrő segítségével simítjuk. A szűrő hatására csökken a keletkező fizikai jel spektrumszélessége, amely az átvitel során előnyös.

Az átvitel során a modulációval készített fizikai jelet még általában módosítják az elküldés előtt. Jellemző, hogy a GFSK moduláció nem azon a frekvencián történik, amelyen az átvitel is végbemegy, hanem annál egy sokkal kisebb frekvencián. Az átvitelhez azonban ezt a modulációt egy nagyobb frekvenciájú vivőjelre ültetik. A szenzorhálózatok esetében jellemző, hogy olyan vivőjelet választanak, amely nem igényel frekvenciahasználati engedélyt, ezáltal is egyszerűsítve a szenzorhálózatok működését. Az ilyen frekvenciatartományokat *ISM-sávnak (Industrial, Scientific and Medical – ISM radio bands)* hívjuk. Jellemzően használt ISM-sávok a 2,4 és a 5,8 GHz-es sávok, illetve régiótól függően a 433, a 868 és a 915 MHz-es sávok. Az persze nem igaz, hogy az ISM-sávokat korlátok nélkül használhatnánk, itt is érvényesek szabályok, amelyek korlátozzák többek között az adóteljesítményt, adatsebességet vagy akár a sáv százalékos kihasználhatóságát.

A kisugárzott jel kialakításában még szerepet játszhat az is, hogy bizonyos technológiák esetében a vivőfrekvencia nem állandó, hanem az átvitel során folyamatosan ugrik egyik frekvenciáról a másikra. Az ugrások természetesen mindkét kommunikáló fél számára ismertek, így ez az átvitelt nem zavarja, azonban sokat segíthet olyan szituációk leküzdésében, ahol két egy időben zajló adás elnyomná egymást azonos frekvencián. A frekvenciaugrásos megoldás az *FHSS (Frequency-Hopping Spread Spectrum – FHSS)*.

A GFSK kódolás ma már egyszerűen implementálható, így számos kommunikációs megoldás modulációs megoldása. Az így felépített rádiók általában 1-2 Mbps sebességre képesek és nagyjából a WiFi-vel egyező területet fednek le. Népszerűségüket nagy részben kedvező áruknak is köszönhetik.

4.2.2. Bluetooth átvitel

A Bluetooth kommunikációs protokollt még 1993-ban kezdték fejleszteni az Ericssonon belül, mint rövid távolságú kommunikációs protokollt mobiltelefonok számára. Az első specifikáció már 1998-ban született, amikor a fejlesztésre és a szabványosításra az Ericsson egy külön szervezetet (*Bluetooth Special Interest Group, SIG*) alapított más nagyvállalatokkal közösen.

A Bluetooth szabvány azóta sok verziót megélt, jelenleg az 5. főverziónál járunk. Szenzorhálózatok számára ugyanakkor inkább csak a Bluetooth 4.0 szabványtól vált érdekessé, egészen addig inkább a mobiltelefonok és kiegészítőik számára volt meghatározó kommunikációs megoldás. A Bluetooth 4.0 ugyanakkor számos újítást hozott, többek között a *Bluetooth LE (Low Energy)* protokollt. A protokoll egy teljesen újragondolt megoldás kifejezetten kis energiafelhasználású eszközök, nem is kifejezetten okostelefonok, hanem már inkább szenzorok számára [TOWNSEND 2014]. NEM IS KIFEJEZETTEN A BLUETOOTH PROTOKOLLHOZ KÉSZÜLT, HANEM KORÁBBAN *WIBREE* néven a Nokia fejlesztése volt. 2010-ben azonban a Bluetooth szabvány adaptálta. A Bluetooth ezen specifikációja, a Bluetooth LE (BLE) így nem is kompatibilis a korábbi Bluetooth protokollokkal. A 2016-ban bejelentett és a 2017-es eszközökben már megtalálható Bluetooth 5.0 protokoll az alacsony energiafogyasztású protokollt is továbbfejlesztette, más tulajdonságok rovására választható nagyobb sebesség vagy nagyobb lefedettség vagy nagyobb szállítási kapacitás. A Bluetooth 5.0 újdonságai esetében már kifejezetten a *tárgyak internete (Internet of Things – IoT)* áll a középpontban.

A Bluetooth átvitel alapjaiban a már ismertetett GFSK modulációt használja, valamint a kimeneti jel előállításánál frekvenciaugrást (FHSS) alkalmaznak egy szélesebb spektrumban. A frekvenciaugrás ugyanakkor már adaptív lett (*Adaptive Frequency Hopping – AFH*). Az adaptivitás azt jelenti, hogy az eszközök képesek felmérni azokat a vivőfrekvenciákat, amelyeken az adás valamilyen nehézségekbe ütközik, legyen az természetes akadály vagy valamilyen konkurens adatátvitel, majd ezeket a frekvenciatartományokat a kommunikáció során kizárják a lehetséges választásokból. Alapesetben a teljes 2,4 GHz-es ISM-sávot a Bluetooth 79 db 1 MHz széles alcsatornára osztja, és ezek között történik meg az ugrás. A Bluetooth LE protokoll esetében változtattak az alcsatornákon és itt már 40 db 2 MHz széles csatornát találunk. A BLE esetében az adás elméletileg 1 Mbps átvitelt tud elérni, a legújabb protokoll esetén ez már duplázható az elérhető hatótáv hátrányára. A gyakorlatban azonban ennél kisebb értékeket fogunk kapni.

A Bluetooth LE eszközök esetében viszonylag egyszerű a hálózat szervezése. Az eszközök kétféle szerepkörben tűnhetnek fel, mint központi egységek (central device) és perifériás egységek (peripheral device). A központi egységek az erőforrásban erő-

sebb csomópontok, tipikusan okostelefonok vagy PC-k, míg a perifériás egységek a szenzorok.

Az eszközök kétféleképpen tudnak adatot küldeni. Az egyik az úgynevezett *Advertising Packet* (magyar jelentése: hirdetésadat), míg másik a *Scan Response Data* (magyar jelentése: letapogatási válaszadat). Az Advertising Packet segítségével tudatja az eszköz a környezetével, hogy létezik és elérhető, de egyben adatátvitelre is szolgál. A Scan Response Data már akkor használható, ha egy eszköz kapcsolatban van és egy adott kérésre válaszol. Az előbbi kommunikációs típus így egy broadcast üzenet, azaz az eszköz adását mindenki veszi, aki a közelében van és fizikailag elér hozzá a kommunikáció. Az eszközöket, akik veszik az adást, *megfigyelőknek (OBSERVER)* hívja a protokoll. Az utóbbi típus, mint írtuk, már egy kapcsolatot feltételez. Ebben az esetben az üzenetek két eszköz között haladnak.

A két típus tulajdonképpen egyetlen dialógusban egyesül. A kommunikáció elején a perifériás egység folyamatosan küldi az Advertising Packet üzeneteket, jelezve, hogy kész a kapcsolódásra. Az üzenetek kiküldéséhez a 40 lehetséges alcsatorna közül csak az utolsó 37-39. számú csatornákat használja, amelyek ráadásul nem is a sáv végén találhatóak, hanem úgy helyezték el őket, hogy elkerüljék a népszerűbb WiFi csatornákat. A központi egység pedig folyamatosan váltogatja ezeket az alcsatornákat, keresve a periféria üzeneteit. Amennyiben a központi vezérlő meghallja a perifériás egység Advertising Packet üzenetét, úgy kapcsolódási kérelmet intéz felé. Amennyiben a kapcsolódás megtörténik, a további üzenetek ütemezését átveszi a központi egység, a perifériás egység az ennek megfelelő ütemben válaszol. Az üzenetek a frekvenciaugrásoknak megfelelően a számozás szerinti első 37 csatornában zajlanak. Egy ilyen, már kapcsolódott állapotban lévő üzenetváltást *kapcsolateseménynek (connection event)* nevezünk.

A kis energiafogyasztás egyik kulcsa a kapcsolatesemény, hiszen ebben az esetben a perifériás egység pontosan tudhatja, hogy mikor fog hozzá kéréssel fordulni a központi egység, és az addig hátralévő időt a perifériás egység egyszerűen átaludhatja. Két kapcsolatesemény között minimum 7,5 ms, maximum 4 másodperc idő lehet, ezt a központi egység határozza meg. Egy kapcsolateseményben elvileg tetszőleges számú adatközlés lehetséges, azonban ezt általában a modul implementációja korlátozza. Tipikusan ez az érték 6 db adatküldés egyetlen kapcsolati esemény alatt, bár bizonyos esetekben ennél kevesebb is előfordul. Egyetlen adatküldéssel pedig maximum 20 bájtot lehet átvinni. Ebből látható az is, hogy bár az adatkapcsolat sebessége 1 Mbps, vagy akár 2 Mbps, még a legsűrűbb kapcsolati eseményeket feltételezve is, összesen 133 esemény van egyetlen másodpercben és ott 120 bájtot tudunk átvinni, így a maximális átviteli sebesség eszközönként csupán 15960 bájt/másodperc, azaz kb. 125 kbps.

A Bluetooth LE kapcsolat tipikusan rövid hatótávolságú. Amennyiben a két kommunikáló eszköznek nincs rálátása egymásra, úgy tipikusan 2-5 méter távolságot tud áthidalni. Ezt az eszköz energiafogyasztásának rovására javítani lehet a kimeneti jel erősítésével, azonban a legtöbb felhasználás esetén elegendő ez a rövid távolság is. Amennyiben nagyobb hálózatot szeretnének kialakítani Bluetooth LE egységekből, úgy az egységek úgynevezett *scatternet*be szervezhetőek. Ebben a szerveződésben a vezérlőegységek egy másik hálózat perifériás egységei lehetnek, így továbbítva a jelet az egyik hálózatból a másikba, egészen a végpontig. Sőt, a központi egységeknél a jelet akár a klasszikus Bluetooth technológiával is továbbíthatják, amelyek szintén hasonló scatternet-szerveződésbe helyezhetőek.

Felhasználásukat tekintve a Bluetooth LE egységek nagyon sok helyen fellelhetőek környezetünkben. A Bluetooth 4.0 szabvány megjelentését követően tervezett telefonok

már támogatják ezt az átvitelt és képesek eljátszani a vezérlő egység szerepét. A perifériás egységek egy része csak adatot közlő szenzorként működik és éppen ezért csak az Advertising Packet üzeneteket használja. Ilyen egység például egy időjárásállomás, de amivel többet találkozunk, azok az úgynevezett *jeladó (beacon)* termékek, amelyek folyamatosan jelzik közelségüket más egységek számára. A jelzés segítségével meghatározható tárgyak kisebb pontosságú pozíciója, illetve akár veszélyre is fegyelmeztethetnek. A perifériás egységek másik csoportja vezérelhető is, mert a kommunikáció során az adatkapcsolatuk kétirányú a vezérlővel. A hétköznapi ember legtöbbet az otthonautomatizálás során, illetve fitneszeszközöknél találkozik ezekkel az egységekkel. Többek között ismerünk Bluetooth-on keresztül vezérelhető lámpát vagy Bluetooth protokollos pulzusmérőt.

4.2.3. ZigBee átvitel

A Bluetooth protokoll mellett napjainkban ugyancsak népszerű szenzorhálózati protokoll a *ZigBee*. Felhasználási területét tekintve a Bluetooth LE protokollal versenyez, hiszen itt is egy alacsony energiafogyasztású, kis hatótávolságú, mérsékelt sebességű protokoll kifejlesztése volt a cél. Ugyan a ZigBee első szabványosított változata (2005) későbbi, mint a Bluetooth protokoll, azonban megelőzte a kimondottan szenzorokhoz illeszkedő Bluetooth LE protokollt. Hasonlóan a Bluetooth protokollhoz, itt sem egyetlen cég áll a fejlesztések mögött, hanem egy szövetség, a ZigBee Alliance, amelynek számos tagja van. A protokoll megalkotásakor a legnagyobb, számunkra is ismert cégek a Mitsubishi, a Philips, vagy a Samsung.

A rádiókommunikáció területén a ZigBee protokoll összesen 27 csatornát definiál, azonban ezek 3 különböző ISM-sávban vannak elosztva. Az egyik sáv a nemzetközileg is licensz nélkül használható 2,4 GHz-es sáv. Ebben a sávban helyezkedik el 16 csatorna. A másik két sáv közül csak egy-egy használható az adott területen. Az egyik közülük a 915 MHz-es ISM-sáv, amely Európában nem használható erre a célra. Itt 10 csatornát alakítottak ki. A másik pedig a 868 MHz-es sáv, amely Európában használatos, itt egyetlen csatorna van kialakítva.

A különböző sávokban különböző modulációkat alkalmaztak és így az átvitel paraméterei is eltérőek. Az alacsonyabb frekvenciákon a ZigBee a *Binary Phase Shift Keying (BPSK)* modulációt használja. Ez az egyik legegyszerűbb moduláció, az adatjel 0 vagy 180 fokos fáziseltolást kap az átvitt adatnak megfelelően. Gyakorlatban, ha az átvitt információ a 0 bit, akkor nincs változás a jelalakban, míg 1 bit esetén a jel 180 fokos fázist vált. A BPSK kódolás segítségével ugyanakkor a ZigBee nem ér el nagy sebességet, a 868 MHz-es csatornán 20 kbps, míg a 915 MHz-es csatornán 40 kbps az elméleti maximális sebesség.

A 2,4 GHz-es tartományban a ZigBee *Offset Quadrature Phase Shift Keying (OQPSK)* modulációt használ. Ez a moduláció szintén a kimeneti jel fázisát változtatja meg az átvivendő bitek szerint, azonban itt már 4 különböző fázisértéket találunk. A 4 különböző érték két bit információt hordoz, így egyetlen szimbólummal két bitnyi információt vihetünk át. Ezzel tulajdonképpen ugyanazon a sávszélességen megduplázható az adatátvitel sebessége úgy, hogy közben az átvitel más paraméterei sem változnak. A sebességnövelésnek a komplexitásnövekedés az ára.

Az OQPSK esetében specialitás, hogy szemben az eltolás (Offset) nélküli QPSK modulációval, ahol a fázis akár 180 fokot is változik periódusonként, itt a fázismaximum csak 90 fokot változik félperiódikusonként. Ezt úgy érik el, hogy a két bitnyi információ egymáshoz félperiódussal eltolva van kódolva, és ott a változás a két állapot között ma-

ximum 90 fok. A 2,4 GHz-es tartományban a ZigBee az OQPSK modulációt alkalmazva 250 kbps elméleti átviteli sebességet ér el.

Hálózat szervezésben a ZigBee protokoll az IEEE 802.15.4 szabványra épít. Ez a szabvány a *vezeték nélküli személyi hálózatokról (Wireless Personal Area Network)* szól, ahol kis fogyasztású, csökkentett hatósugarú, alacsony energiájú hálózatok vannak. A ZigBee protokollban az IEEE 802.15.4 szabvány szerint alkotnak kereteket, amelyeket két pont közötti adatküldésre használnak. A keretek sikeres átvitelét a fogadó fél speciális üzenetben nyugtázza. Minden egységnek egyedi 64 bites címe van. Az egységek igyekeznek elkerülni az egyidejű adatküldéseket, azaz ütközéseket. Legalábbis mielőtt adatot küldenének, belehallgatnak a csatornába és csak akkor kezdik el az adást, ha a csatorna üres. Az ütközéseket lehetetlen teljesen elkerülni ezzel a módszerrel, ráadásul, amennyiben valóban történik ütközés, úgy azt a ZigBee nem veszi észre, erre a tényre csak az elmaradó nyugtázásból lehet következtetni. Szintén az IEEE 802.15.4 szabványból átvett funkció az egységek hálózatba léptetése és onnan kizárása.

Topológiáját tekintve a ZigBee hálózat sokféle lehet: mind a *csillag- (star)*, mind a *háló- (mesh)*, mind a *fa- (cluster tree)* topológia egy jellemző kialakítás ZigBee alkalmazások esetén. A közös bennük az, hogy minden ZigBee hálózatban egyetlen *koordinátor (ZigBee Coordinator)* van, ez menedzseli a teljes hálózatot. A többi csomópont vagy *forgalomirányító (ZigBee Router),* vagy egyszerű *eszköz (ZigBee Device)*. A forgalomirányítók továbbítják a hozzájuk kapcsolódó csomópontok között az adatokat a célnak megfelelően.

A hálózatban küldött üzenetek négyféle típus közül kerülhetnek ki: *jelző (beacon)* üzenetek, amelyeket a koordinátor bocsát ki ismétlődően és többek között a szinkronizációt biztosítják a hálózatban; *adat (data)* üzenetek, amelyek az adatokat hordozzák a csomópontok között; *nyugtázó (acknowledgment)* üzenetek, amelyek a sikeres küldés és fogadás tényét közlik; és végül *parancs (command)* üzenetek, melyek segítségével a hálózat vezérelhető. Egységek között a forgalmi prioritás kezelése a jelző üzenetek segítségével lehetséges. Maximum 7 egység lehet kitüntetett állapotban, ezek az egységek dedikált időszeletet kapnak adatkommunikációra. Az időszeletek méretét és idejét a koordinátor közli a jelző üzenetekben. Ugyancsak a jelző üzenetekben jelzi a koordinátor, ha egy adott egység számára üzenete van. Az egység ebben az esetben kapcsolatba léphet és így megkapja a neki küldött adatot. Az adatküldés az egységek felé 15 ms és 252 másodperc közötti időintervallumokban történik. Az egységek a jelző üzenetekből pontos képet kaphatnak arról, hogy mikor számíthatnak kommunikációra, így azt az időt, amíg nem kommunikálnak, alvással tölthetik. A ZigBee koordinátor ugyanakkor dönthet úgy is, hogy nem időzíti a kommunikációt. Ez egyrészt akkor lehet hasznos, amikor minden egység megfelelő tápellátással bír, így nincs szükség az alvásütemezésre. Másfelől akkor is hasznos lehet, ha az eszközök sokat alszanak és csak rövid adatküldésre szeretnének feléledni. Ebben az esetben nincsenek jelző üzenetek, az ütközések elkerülése az ütközés elkerülő eljárás feladata.

A ZigBee protokoll tipikus alkalmazásai az otthonvezérlés és egészségügyi adatok gyűjtése, de találkozhatunk a protokollal ipari környezetben is vagy épületautomatizálásnál.

4.2.4. További rövid hatótávolságú protokollok

A rövid hatótávolságú, alacsony fogyasztású, szenzorkommunikációs protokollok közül manapság a már ismertetett két protokoll, a Bluetooth LE és a ZigBee van legnagyobb piaci részesedéssel és várhatóan ez a közeljövőben is tartósan megmarad, illetve tartva

a tendenciát a Bluetooth LE protokoll még inkább domináns szerepbe kerül. Ettől függetlenül érdemes megjegyezni, hogy a két protokoll mellett ezen a területen is van még pár megoldás, amely akár már ma is és a közeljövőben is nagyobb szerephez juthat. Röviden ezeket a kommunikációs megoldásokat is ismertetjük.

A) WiFi-ah

A WiFi-ah protokoll az IEEE 802.11.ah szabványos protokollja. Maga a WiFi, azaz az alap IEEE 802.11 protokoll nem felel meg a szenzorhálózatok követelményeinek, ugyanis nagyon sok erőforrást igényel a működése. Azonban a szabványban létrehoztak egy kimondottan tárgyak internete- (IoT-) centrikus működési módot is, ezt tartalmazza az IEEE 802.11.ah szabvány. Eltérően a mostani WiFi rendszerektől, a kommunikáció itt a 868 MHz, illetve 915 MHz-es ISM-sávokban történik. Ennek segítségével ugyanis nagyobb lefedettség érhető el. Az energiafelhasználás minimalizálására itt is időzített üzenetekkel fogunk találkozni. Ami megkülönbözteti a protokollt a korábbi protokolloktól, az a hatótávolság nagysága, illetve a sebesség. Itt már egész házakat lefedő hálózatot kialakító hozzáférési pontokról beszélhetünk, ahol az adatsebesség, köszönhetően az alap WiFi-ben is használt modulációknak, jóval többszöröse a Bluetooth vagy ZigBee által elérhető sebességnek.

Bár a szabvány már létezik, az első eszközökre még várni kell.

B) ZWave

A ZWave protokoll szintén az IEEE 802.15.4 szabványra épül, akárcsak a ZigBee protokoll. A fizikai rétegben azonban a ZWave más modulációt használ, itt ismét találkozhatunk a GFSK modulációval, melynek segítségével a 868 MHz és 915 MHz ISM-sávokban 100 kbps elméleti adatsebességet tud elérni. A ZWave a GFSK mellett a még egyszerűbb FSK (Frequency Shift Keying) modulációt is támogatja, ennek segítségével 9,6 Kbps, illetve 40 kbps adatsebesség érhető el. A ZigBee protokolltól megkülönbözteti, hogy jobb hatótávolsággal rendelkezik, bár az elméletileg elérhető adatsebesség kisebb.

A ZWave protokoll mögött szintén egy szövetség áll, olyan cégekkel, akik elsősorban az otthonautomatizálásban érdekeltek. Magyarországon is ismert nagy cégek közül a Bosch, a Honeywell, és a Black & Decker a jelentősebbek. A ZWave termékek is elsősorban az otthonautomatizálás területére fókuszálnak.

C) Thread

A Thread protokoll szintén az IEEE 802.15.4 szabványra épül. Különlegessége, hogy az IPv6 protokoll segítségével a hálózat elemei megcímezhetőek a szenzorhálózaton kívülről is. A kialakított hálózatban fontos szerepet kapnak a hálózat szélén elhelyezkedő forgalomirányító csomópontok. Bár az IPv6 bevezetésével a ZigBee is próbálkozik, egyelőre ezen a területen nem ért el akkora sikereket, mint a Thread protokoll.

A Thread protokoll jövőbeli sikerét az is sejteti, hogy olyan nagy nevek vannak mögötte, mint a Google, a Samsung, az ARM vagy az NXP.

D) ANT és ANT+

Az ANT és továbbfejlesztett változata az ANT+ protokollok elsősorban fitneszeszközök kapcsán kerülnek elő, jellemzően a Bluetooth LE protokoll alternatívájaként. Fizikai felépítésükben annyira hasonlítanak a Bluetooth LE eszközökhöz, hogy a legtöbb Bluetooth LE eszköz egyszerű szoftveres módosítással képes az ANT és ANT+ kommunikációra. A hálózat szervezése ugyanakkor már eltérő. A megoldás különlegessége az *adaptív izokron átviteli módszer (adaptive isochronous network technology)*, melynek segítségével az egységek interferencia nélkül kommunikálhatnak egymással párhuzamosan is. A rádióadások nagyon rövidek és amennyiben mégis interferencia lépne fel, az ütköző egységek módosítják az átviteli időzítést. Az adaptív izokron átviteli módszer nem igényel központilag egyeztetett órát, ami hozzájárul a protokoll egyszerűségéhez és növeli a rendelkezésre álló sávszélesség hasznos kihasználtságát.

A protokollt továbbra is inkább sportszerekben, fitneszeszközökben fogjuk látni, egyezve a protokoll mögött álló cégek profiljával.

4.3. Vezeték nélküli kommunikáció távolra, LP-WAN protokollok

Az eddig tárgyalt vezeték nélküli szenzorkommunikációs technológiák általában azt feltételezték, hogy az energiahatékonyság szem előtt tartása okán a szenzorok csak kis távolságra, egy közeli átjátszó állomásnak küldik el az adataikat. Ez az átjátszó állomás viszont feltételezhetően jóval több erőforrással rendelkezik minden tekintetben (CPU, memória, energia, rádiós interfészek), de sok esetben az is elképzelhető, hogy az átjátszó állomások közvetlenül rá vannak csatlakoztatva az elektromos hálózatra, így az energiatakarékos működés biztosítása ezeknél az eszközöknél már nem feltétlenül szükséges.

Ha egy konkrét, okos városokra jellemző példát szeretnénk említeni, akkor tekinthetjük a kültéri parkolás kérdését. A kültéri parkolóhelyek foglaltságát az aszfalt burkolatba ágyazott szenzorok mérik, akár ultrahangos távolságméréssel, akár optikai vagy magnetométeres érzékeléssel, majd a mérés kimenetének számító információt, miszerint foglalt vagy szabad egy adott parkolóhely, elküldik egy rövid hatósugarú rádiós interfészen (pl. Zigbee vagy Bluetooth Smart) a néhány tíz méterre található átjátszó állomáshoz (gateway-hez). Ez a gateway pedig továbbküldi az egész utcából, az összes közelben levő parkolószenzortól begyűjtött adatokat egy központi adatbázis felé, általában valamilyen cellás mobilhálózati interfészen keresztül (3G, 4G). Ennek a megoldásnak viszont kétségkívül megvan az a hátránya, hogy bár a szenzorok energiatartalékaival kíméletes, rendkívül költséges lehet, hiszen egy átjátszó állomás telepítése minden egyes szenzor közvetlen közelébe, néhány tízméteres távolságra azoktól, egy nagyon költséges infrastrukturálist beruházást feltételez, mely egy nagyobb méretű okos város esetében komoly fejtörést okozhat.

Évekkel ezelőtt felmerült tehát az a gondolat is, hogy a szenzorok energiahatékonyságát ne feltétlenül a kommunikációs távolságok csökkentésével biztosítsuk, hanem az átvitt adatmennyiség minimalizálásával. Sok okosváros-alkalmazás esetében a szenzoroknak nem feltétlenül kell folyamatosan, és valós időben, nagy adatmennyiségeket forgalmazniuk. Egy parkolószenzor esetében például az átvinni kívánt információ csak egy bináris adat, az adott parkolóhely vagy szabad, vagy foglalt. Ráadásul ezt az információt nem kell folyamatosan elküldeni, csak akkor, ha változás állt be a foglaltsági állapotban. Mivel pedig az autók jellemzően hosszabb ideig parkolnak egy adott helyen, bizonyos napszakokban és bizonyos külvárosi utcákban pedig akár órákon át is üresen maradhat

egy parkolóhely, ezért a foglaltsági állapot is csak ritkán, átlagosan óránként egy-két alkalommal változik majd. Ennek megfelelően pedig a szenzorok által átvinni kívánt adatmennyiség nagyon korlátozott. Elképzelhető tehát, hogy ezt a kevés adatot, egy hatékony rádiós kommunikációs technológiával, akár nagyobb távolságokra is, több tíz kilométerre is elküldhetjük, egy távoli nyelőállomás/adatgyűjtő központ felé. Ha ez megvalósítható, akkor jóval kevesebb átjátszóállomás telepítésére van szükség az okos városokban, és emiatt az infrastrukturális beruházás költségei drasztikusan csökkennek majd.

De ez a technológia lehetőséget nyújt olyan precíziós mezőgazdasági alkalmazások számára is, ahol a növénytermesztés vagy az állattenyésztés hatékonyságát a különböző szenzoroktól begyűjtött adatok segítségével lehet jelentősen növelni. Fontos például érzékelni azt, hogy egy adott földterületnek milyen a nedvességtartalma, illetve az ásványi anyag összetétele, hogy ennek függvényében indíthassuk be szükség esetén az öntözőberendezést vagy megfelelő módon adagolhassuk a műtrágyát. A mért paraméterek viszont nem változnak nagyon gyorsan, a méréseket nincs értelme másodpercenként megismételni, és nem is kell azokat valós időben továbbítani. Elegendő egy átlagos mérési adatot küldeni, akár csak óránként egyszer vagy még ennél is ritkábban, az alkalmazás igényeinek ez is megfelel. Másfelől a precíziós mezőgazdasági alkalmazásoknál nem is igazán képzelhető el, hogy a szenzorokhoz közel, néhány tíz méteres távolságban, a termőföldeken vagy a legelőkön átjátszó állomásokat helyezzünk el, hiszen értelmetlen és gyakorlatilag lehetetlen egy olyan jellegű infrastruktúrát kiépíteni, mint amilyen egy városi környezetben adott esetben rendelkezésre állhat.

Számos olyan eset és szolgáltatás létezik tehát, úgy az okos városokban, mint más felhasználási területeken, ahol a szenzorok csak nagyon kis mennyiségű adatot szeretnének küldeni, viszonylag ritkán, ám nagy távolságokra, energiahatékonyan. Ezekre az esetekre dolgozták ki az úgynevezett LP-WAN (Low Power Wide Area Network) [McCLELLAND 2017] rádiós kommunikációs megoldásokat, melyek jelentősebb képviselőit a következőkben részletesebben bemutatjuk.

Az LP-WAN rádiós megoldásokat két különböző kategóriába szokták osztani attól függően, hogy a használt frekvenciatartományokra vonatkozóan milyen szabályozás van érvényben. Ennek megfelelően léteznek úgynevezett cellás IoT (Internet of Things) technológiák, melyek licenszköteles frekvenciákon működnek, és a 3GPP (3rd Generation Partnership Project) szabványosítása alá tartoznak, és olyan megoldások is, melyek szabadon felhasználható frekvenciatartományokban operálnak.

4.3.1. Cellás LP-WAN megoldások

Ebben az alfejezetben két cellás LP-WAN megoldást ismertetünk, az LTE-vel kompatibilis LTE-M megoldást és a keskenysávú IoT (NB-IoT) megoldást.

A) Az LTE-M

A licenszköteles megoldások kategóriájába soroljuk az *LTE-M* (vagy más néven LTE CatM1) technológiát, mely a hagyományos negyedik generációs mobiltechnológia, az *LTE (Long Term Evolution)* egy egyszerűsített változata, a korlátozott erőforrásokkal rendelkező szenzorok számára. Az egyszerűsítés oka az volt, hogy a hagyományos LTE-t teljesen más célokra tervezték, ott az elvárás a minél nagyobb átviteli sebesség és a kis késleltetés volt viszonylag jelentős mobilitás mellett. Ehhez képest a vezeték nélküli szenzorok esetében jóval kevesebb az adatforgalom, sok esetben nincsenek

nagyon szoros késleltetési korlátok, és a szenzorok mozgása is általában korlátozott, kivéve, ha egy szenzor valamilyen mozgó járműre vagy személyre van erősítve és azzal együtt mozog. Ennek megfelelően tehát a mobiltechnológiák nagy átviteli sebességeket támogató megoldásai helyett inkább a minél jelentősebb energiahatékonyság felé tolódik a hangsúly.

Az LTE-M a nagy átviteli sebességet támogató, de ennek megfelelően rendkívül komplex többantennás (MIMO, Multiple Input Multiple Output) kommunikáció helyett csak egyetlen antennát, valamint Half-Duplex[9] FDD[10]-t használ, nem kell tehát egyszerre hallgatnia és küldenie is egy adott eszköznek különböző frekvenciákon. Ez jelentősen csökkenti a memória- és CPU-igényt, illetve egyúttal az árat is.

Jelentős változás a hagyományos LTE-hez képest az energiahatékonyságot segítő PSM (Power Saving Mode) és eDRX (extended Discontinuous Reception) működési módok támogatása.

A PSM üzemmódot kifejezetten olyan eszközökre találták ki, melyek ritka adatközlésekkel operálnak és elfogadható számukra az ebből a működési módból adódó megnövekedett késleltetés. Ebben az üzemmódban a felhasználói eszköz maga dönti el, hogy milyen sűrű időközönként és milyen hosszú időtartamig szeretne aktív lenni, azaz mennyi ideig akar képes lenni csomagokat küldeni, illetve fogadni. A PSM üzemmódban az eszköz gyakorlatilag úgy viselkedik, mintha ki lenne kapcsolva, mindeközben azonban folyamatosan regisztrálva marad a hálózaton. Ennek megfelelően, ha az eszköz felébred és ismét aktív lesz, nem szükséges újra csatlakoznia a hálózathoz. A PSM üzemmód alatt az eszköz nem válaszol a hálózat paging hívásaira. Mindazonáltal az aktív periódusa után egy rövid ideig elérhető marad, azaz hallgatja a paging csatornát. Ennek az időszaknak a hosszát az eszköz maga határozhatja meg, a hálózatot erről egy jelzésüzenetbe elhelyezett időzítő érték segítségével értesíti.

Az eDRX egy másik olyan mechanizmus, mely az eszköz energiafogyasztását csökkenti az alvó periódusok kiterjesztésével. A hagyományos LTE-ben 1,28 mp a hossza egy paging ciklusnak, amely alatt az eszközt értesíteni tudja a hálózat arról, hogy van-e számára bejövő forgalom. Egy alapszintű energiamegtakarítást jelentő mechanizmusként az LTE-hez később definiálták a DRX (Discontinuous Reception) megoldást, melynek segítségével az eszköz 10,24 mp-ig aludhat két egymást követő paging ciklus között. Ezzel az optimalizálással jelentősen csökkenthető egy hagyományos LTE eszköz energiafogyasztása, mindez azonban messze nem elegendő egy szenzor több évig tartó üzemben tartásához. Az eDRX kiterjesztett üzemmód ezzel szemben azt teszi lehetővé, hogy az eszköz meghatározza, hány 10,24 másodperces Hyper Frame (HF) erejéig szeretne alvó üzemmódban maradni, mielőtt újra elérhetővé válik. A HF-ek maximális számát meghatározhatja a szolgáltató, de ennek legalább egy 40 perces időintervallumnak kell megfelelnie, azaz ha egy LTE-M eszköz 40 percig szeretne alvó üzemmódban lenni két aktív periódus között, akkor a hálózatnak támogatnia kell azt.

LTE-M esetében továbbá kisebb a maximális blokkméret is a hagyományos LTE-hez képest (TBS, Transport Block Size), ami egyszerűbb feldolgozást, kódolást és puffer-elést tesz lehetővé. Keskenyebbek az átviteli csatornák (10 vagy 20 MHz helyett csak 1,4 MHz), illetve jelentősen egyszerűsített a rádiós csatorna minőségének a mérése is. Ezáltal nem biztosított az, hogy minden esetben a legjobb minőségű csatornán történjen

[9] Az eszköz mindkét irányban képes kommunikálni, de nem egy időben. Egy adott pillanatban vagy ad, vagy vesz.

[10] Frequency Division Duplexing, frekvenciaosztásos duplexelés, azaz az upstream és downstream irányú forgalom különböző frekvenciákon történő küldése

minden bitnek az elküldése, de jelentős jelzésforgalmat és számítási kapacitást takarítunk meg ezekkel az egyszerűsítésekkel.

B) NarrowBand IoT (NB-IoT)

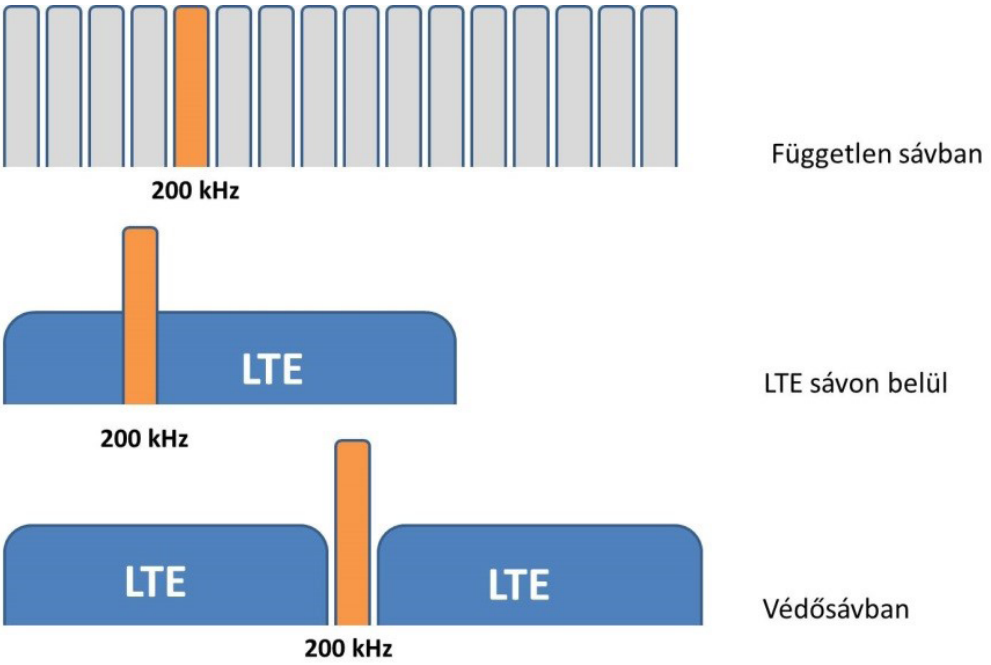
A NarrowBand IoT technológia szintén egy, a 3GPP által kidolgozott szabvány a szenzorok és más korlátozott erőforrásokkal rendelkező eszközök energiahatékony kommunikációjára, ám az LTE-M megoldással ellentétben nem teljesen kompatibilis a meglévő LTE hálózatokkal. Az LTE-M 1 Mbps-os maximális átviteli sebességéhez képest az NB-IoT esetében csak 250 kbps-es maximális sebességgel számolhatunk, a csatorna szélessége 1,08 MHz helyett csak 180 KHz, a késleltetés pedig az LTE-M-nél garantált 10-15 ms-hoz képest akár ennek az ezerszerese, azaz 10 másodperc is lehet. Ez a viszonylag alacsony átviteli sebesség és viszonylag magas késleltetés viszont számos alkalmazás esetében teljesen elfogadható, mint ahogy azt már kifejtettük.

A 2016-ban véglegesített 3GPP Release 13 szabvány 14 különböző frekvenciasávot határoz meg az NB-IoT számára a 700, 800, 850, 900, 1700, 1800, 1900 és 2100 MHz-es frekvenciatartományokban. Ezek mellé a 2017-ben kiadott Release 14 szabvány további 4 NB-IoT frekvenciasávot nevez meg, 450, 1500, 1700 és 1900 MHz-en. A Release 14 további előnyei a helymeghatározás támogatása (UTDOA[11] vagy OTDOA[12] megoldással), a multicast kommunikáció támogatása firmware- és szoftverfrissítésekhez, a mobilitás hatékonyabb kezelése és alacsonyabb küldési teljesítmény alkalmazása az energiahatékonyság növelésére (a hatótávolság rovására).

Mivel a frekvencia szűkös erőforrás, az NB-IoT-t úgy tervezték, hogy a GSM, a WCDMA vagy az LTE hálózatok számára fenntartott különböző frekvenciákon is használható legyen (4.4. ábra). Az egyik lehetőség tehát az, hogy az LTE sávoktól függetlenül, egy korábban a GSM kommunikációra használt 200 kHz széles tartományban implementálják az NB-IoT szolgáltatást. Egy másik megoldás az, hogy az LTE sávon belül egy adott 200 kHz széles tartományt adaptív módon használunk vagy hagyományos LTE vagy NB-IoT kommunikációra. A bázisállomás ütemezője multiplexálja az LTE és az NB-IoT forgalmat ugyanarra a spektrumszeletre, ezzel jelentősen csökkentve az NB-IoT szolgáltatás telepítési költségeit. Az átviteli kapacitást illetően ez nem lehet gond, hiszen az átlagos forgalmat figyelembe véve akár 200 000 NB-IoT eszköz is kezelhető marad egy adott cellán belül. Végül pedig a harmadik lehetőség az, ha az NB-IoT szolgáltatást a WCDMA vagy az LTE spektrumszeletek elválasztását szolgáló védősávok egyikében működtetjük

[11] Uplink Time Difference of Arrival, egy olyan vezeték nélküli lokalizációs megoldás, mely a mobiltornyokban elhelyezett érzékeny vevők segítségére épít a felhasználói eszközök helyzetének meghatározásához.

[12] Downlink Observed Time Difference of Arrival, egy olyan megoldás, melyben a helymeghatározást a felhasználói eszköz saját maga végzi, a saját, illetve a szomszédos cellák bázisállomásaitól érkező jelek feldolgozásával



4.4. ábra: NB-IoT spektrumhasználati lehetőségek
(Forrás: A szerző ábrája)

Úgy az LTE-M, mint az NB-IoT jelenleg még gyerekcipőben jár, de egyre több országban jelennek meg az országos vagy regionális lefedettségű hálózatok. 2017 végén országos szintű LTE-M hálózat volt elérhető az Egyesült Államokban és Ausztráliában, országos NB-IoT hálózat pedig Kínában, Dél-Koreában, Malajziában, Európán belül pedig Írországban, Hollandiában, Olaszországban, Ausztriában és Csehországban is rendelkezésre állt. Törökországban és az Egyesült Arab Emirátusokban úgy LTE-M, mint NB-IoT országos hálózat is elérhető volt.

4.3.2. Szabad frekvenciás LP-WAN megoldások

Az LPWAN megoldások másik kategóriája olyan technológiákat tartalmaz, melyek szabad felhasználású frekvenciákon üzemelnek, és általában gyártóspecifikus (proprietary) szabványok. Ide tartozik a napjainkban egyre nagyobb népszerűségnek örvendő Sigfox és LoRa.

A) Sigfox

A Sigfox technológia egy francia startup cég nevéhez kötődik, és 2009-ben jelent meg. A megoldás célja nagyon nagy távolságok áthidalása volt, nagyon alacsony adatküldési sebességek mellett, energiahatékonyan. Ennek megfelelően a Sigfox számos korlátozást alkalmaz az adatátvitelt illetően: a maximális csomagméret például csak 12 byte, maximum 140 uplink csomag (az előfizetőtől a szolgáltató felé) és maximum 4 downlink csomag (a szolgáltatótól az előfizető felé) küldése lehetséges naponta, és óránként maximum 30 másodpercet tölthet kommunikációval naponta egy Sigfox eszköz. Bár a 12 byte-os csomagméret elsőre kevésnek tűnhet, számos alkalmazás számára bőven elegendő lehet. Egy GPS-koordináta küldése elfér például 6 byte-on, de egy hőmérsékletadat küldésére elegendő lehet 2 byte is. A downlink csomagok mérete fix, 8 byte,

de ez elegendő lehet egy lekérdezés kezdeményezésére a bázisállomás által, a távoli eszköz menedzselésére, vagy bizonyos alkalmazás paraméterek távoli beállítására.

Európában egy 192 kHz szélességű frekvenciatartományban működik, 868,034 és 868,226 MHz között, ami egyike a szabad felhasználású ISM-sávoknak. A világ többi részén a 902 és a 928 MHz közötti frekvenciatartomány különböző részein működik, a helyi szabályozásokat figyelembe véve. A csomagokat nagyon szűk, 100 Hz-es úgynevezett Ultra-Narrowband (UNB) csatornákon, BPSK (Binary Phase Shift Keying) modulációt használva lehet elküldeni, az átviteli sebesség pedig 100 és 600 bit másodpercenként, ami a hagyományos mobilhálózati sebességekhez képest rendkívül alacsony, de bizonyos szenzorhálózati alkalmazásoknak így is elegendő. Egy 12 byte hosszú adatcsomag küldése, 100 bps átviteli sebesség mellett 2,08 másodpercig[13] tart.

Mivel a downlink üzenetek száma erősen korlátozott, ezért küldés után nem vár megerősítő (ACK) üzenetre a downlink csatornán, hanem úgynevezett *Fire and Forget* (küldd és felejtsd el) üzemmódban, ugyanazt a csomagot háromszor küldi el, három különböző uplink csatornán. A Sigfox bázisállomás mindeközben folyamatosan monitorozza a teljes 192 kHz-es frekvenciatartományt, keresve olyan UNB jeleket, melyeket demodulálnia kellene.

A hagyományos mobilcellás hálózatokkal ellentétben egy adott Sigfox eszköz nincs egyetlen specifikus bázisállomáshoz se csatlakoztatva. Az eszköz által küldött üzeneteket az összes olyan bázisállomás megkapja, mely a rádiós hatótávolságán belül van. Ezt a folyamatot hívjuk térbeli diverzitásnak. A Sigfox hálózatok telepítését úgy szokták végezni, hogy átlagosan legalább 3 bázisállomás is meghallhassa egy adott eszköz üzeneteit.

A térbeli diverzitás, kiegészítve a különböző frekvenciák használatából adódó frekvenciadiverzitással, illetve a csomagok többszöri elküldésével, együttesen biztosítani tudják a szolgáltatásminőséget a Sigfox hálózatokban.

A downlink üzenetek küldését a Sigfox eszköz kezdeményezi. A bázisállomás küldési ablaka az első uplink üzenet után 20 másodperccel nyílik meg, és maximum 25 másodpercet tart. A frekvencia, melyen az üzenet érkezni fog az első uplink üzenet frekvenciájából számítható ki, ahhoz hozzáadva egy ismert delta értéket.

A Sigfox hálózatok előnye, hogy kifejezetten energiahatékonyan működnek. A chipgyártótól függően a rádiós kommunikáció alatt egy Sigfox eszköz fogyasztása 10 mA és 50 mA között mozoghat, várakozó (idle) üzemmódban viszont a fogyasztás nagyon alacsony, általában csak néhány nanoamper, azaz gyakorlatilag elhanyagolható. Szintén nagyon előnyös, hogy a Sigfox eszközök és a bázisállomás között nincs szüksége párosításra, nem szükséges szinkronizációs üzeneteket váltani az adatcsomagok küldése előtt, ami egy nagy előny a többi technológiával szemben.

Szintén komoly előnye a Sigfox technológiának a nagy hatósugár, aminek köszönhetően viszonylag kevés bázisállomással, és ezáltal nagyon olcsón kiépíthető egy országos lefedettségű hálózat. Egy adott adóteljesítmény mellett, a rádiós hatótávolságot a küldési sebesség határozza meg. Alacsony átviteli sebességek mellett jelentősen megnövelhető a rádiós hatótávolság, vidéki környezetben ez elérheti akár a 30-50 kilométert. Ez, persze. nagymértékben függ a terepviszonyoktól is, városi környezetben ezért nyilvánvalóan lecsökkennek az adott adóteljesítmény mellett áthidalható távolságok, de még így is biztosítható a 3-10 kilométeres hatósugár. Ugyanakkor a Sigfox előnye, hogy a GHz alatti frekvenciatartomány használata miatt épületeken belül, beltéri környezetben is jó lehet a kommunikáció minősége. Minden Sigfox bázisállomás akár 1 millió csatlakoztatott

[13] A 12 byte hasznos adat (payload) mellett a Sigfox üzenetnek van egy 14 byte hosszú fejléce is, így a teljes üzenet 26 byte, azaz 208 bit

eszközt is képes kezelni, de a hálózat skálázható ennél több eszköz támogatására is, ha egyszerűen megnöveljük a bázisállomások elhelyezésének sűrűségét.

2016-os adatok alapján a Franciaországban telepített SigFox hálózatok a lakosság 92%át, Spanyolországban pedig 94%-át fedik le, de jelen vannak a világ több mint 20 másik országában, több mint 7 millió csatlakoztatott eszközzel.

B) LoRa

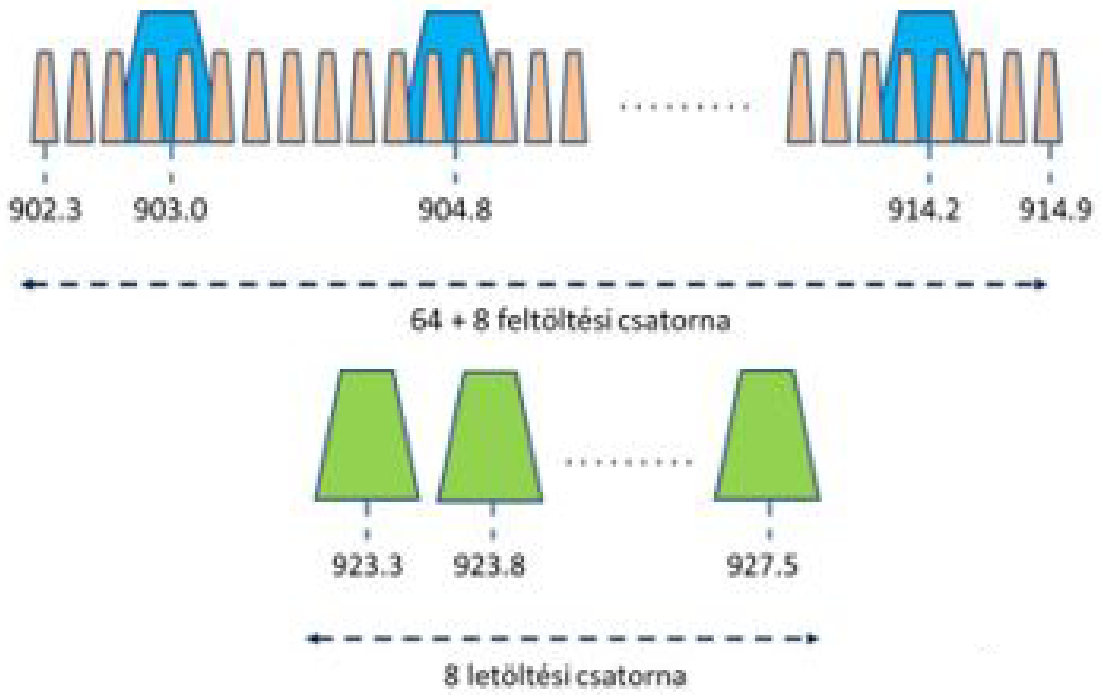
A szintén szabad felhasználású frekvenciákon üzemelő LoRa (Low Power Radio) technológiát eredetileg ugyancsak egy francia cég, a Semtech dolgozta ki, de nagyon hamar több partner is érdeklődött a megoldás iránt. Így alakult meg 2014-ben a LoRa Alliance, mely ma már több mint 500 tagot számlál. Az ismertebb tagok közül megemlíthetünk olyan gyártókat, mint a Cisco, az IBM, a ZTE, a Honeywell, a Bosch vagy a Fujitsu és olyan szolgáltatókat, mint a Bouygues Telecom vagy az Orange. Érdemes megemlíteni, hogy a magyar kötődésű Flashnet nevű cég a LoRa Alliance alapító tagjai között volt.

A LoRa-nál a kommunikációs korlátozások a SigFox-hoz képest enyhébbek, itt az üzenetek maximális mérete 242 byte lehet, az adatátvitel pedig egy 125 kHz széles csatornán történik, a 868 MHz-es ISM-sávban Európában, illetve a 910 MHz-es sávban az Egyesült Államokban. A napi üzenetek maximális száma explicit módon nincs meghatározva, viszont egy adott LoRa eszköz csak az idő 1%-ban használhatja a rádiós csatornát, ez pedig implicit módon mégis korlátozza az elküldhető üzenetek számát.

A LoRa egy szórt spektrumú rádiós technológia, mely egy szabadalmaztatott CSS (Chirp Spread Spectrum) modulációt használ. Ezt a megoldást eddig leginkább radarokban, katonai és űrkutatási projektekben használták, a LoRa az első kereskedelmi célú felhasználása. Sok hagyományos vezeték nélküli rendszer FSK (Frequency Shift Keying) modulációt használ a fizikai rétegben, mert ennek nagyon alacsony az energiafogyasztása. A LoRa által alkalmazott CSS moduláció megtartja az FSK energiahatékonyságát, de jelentősen megnöveli a kommunikációs hatótávolságot. Egy LoRa bázisállomás akár több száz négyzetkilométeres területet is képes lefedni, a tereptárgyak és a környezeti viszonyok azonban jelentősen korlátozhatják ezt a hatótávolságot.

Ha egy kicsivel részletesebben megnézzük a kommunikációs csatornákat, azt láthatjuk, hogy Európában 10 csatornát használnak, ebből 8 csatornán lehetőség van változó átviteli sebességek biztosítására 250 bps és 5,5 kbps között, egy következő csatornán „nagysebességű” 11 kbps-os átvitel biztosítható a LoRa-modulációt használva, az utolsó csatornán pedig FSK modulációs megoldással 50 kbps érhető el. A 8 alapcsatornából 3 olyan van, melyeket minden bázisállomásnak folyamatosan hallgatnia, monitoroznia kell. Ezek a 868,10 MHz-es, a 868,30 MHz-es és a 868,50 MHz-es frekvenciákon találhatóak. A végfelhasználó eszközöknek ugyanakkor képeseknek kell lenniük legalább 16 csatorna használatára.

Észak-Amerikában a 902,3 és a 914,9 MHz közötti ISM-sávban 64 uplink csatornát definiáltak, ezek mindegyike 125 kHz széles és egymástól 200 kHz távolságra helyezkednek el. Emellett van 8 db 500 kHz szélességű uplink csatorna is, 903 és 914,9 MHz között, melyek egymástól 1,6 MHz távolságra helyezkednek el, illetve szintén 8 darab, hasonlóan 500 kHz szélességű downlink csatorna is, 923,3 és 927,5 MHz között.



4.5. ábra: Feltöltési és letöltési LoRa-csatornák az Egyesült Államokban
(Forrás: A szerző rajza)

A kommunikáció szimmetrikus uplink és downlink irányban, hiszen sok esetben a downlink irány is fontos lehet, az átjátszó csomóponttól a szenzorok irányába. Az uplink és downlink üzenetek ütemezését tekintve három különböző eszköz típust határoztak meg.

A *Class-A* LoRa eszközök esetében 1 uplink időszeletet 2 downlink időszelet követ. Az uplink irányú küldés véletlenszerű, mint az Aloha protokollban, viszont csak egy uplink üzenet után lehet downlink irányba küldeni. Hiába van tehát elküldésre váró adat az átjátszónál, meg kell várni a legközelebbi uplink küldést a szenzortól, hogy el lehessen neki küldeni utána a várakoztatott downlink üzeneteket. Ezt a megoldás nyilvánvalóan az energiafogyasztás csökkentése miatt választották, hiszen így a szenzornak nem kell folyamatosan hallgatnia a rádiós csatornát. Elég, ha csak a saját véletlenszerű uplink küldése után marad ébren néhány időszelet erejéig, hogy meghallhassa a számára downlink irányban küldött üzeneteket. A kommunikáció csak unicast, azaz pont–pont jellegű. Ez a működési mód nagyon hasonló ahhoz, ahogy a Sigfox eszközök is viselkednek. Másfelől az uplink üzenet alapján az átjátszó tudni fogja, hogy hol található egy adott szenzor, milyen irányba kell neki küldeni a downlink üzenetet. Ha pedig több átjátszó is van a szenzor hatósugarában, ezek mind meghallják a szenzor által küldött uplink üzenetet, és központosított módon eldöntik, hogy melyikük válaszol majd a downlink üzenettel. Meg kell azonban jegyezni, hogy a LoRa nem igazán alkalmazható pontos lokalizációra, a bázisállomás csak viszonylag nagy, pár száz méteres közelítéssel tudja megállapítani a vele kommunikáló eszközök pozícióját [RAY 2016].

A *Class-B* LoRa eszközök esetében a véletlenszerű uplink küldéseket követő downlink időszeletek mellett további időzített downlink időszeleteket is használnak; sürgős üzenet esetén nem kell tehát megvárni a következő uplink üzenetet, ami kiszámíthatatlan, mikor érkezik majd, hanem lehet közvetlenül küldeni az időzített időszeletek alatt. Ehhez, persze, szinkronizáció szükséges az átjátszó és a szenzorok között, ehhez az átjátszó beacon üzeneteket küld. A kommunikáció itt lehet unicast (pont–pont), illetve multicast (pont-többpont) jellegű.

Végül a *Class-C* eszközök esetében folyamatosan nyitott a downlink ablak, egy ilyen eszköz tehát folyamatosan hallgatja a rádiós csatornát downlink üzenetekre várva, kivéve egy uplink időszelet erejéig, ha éppen adni szeretne. Ez a megoldás nyilvánvalóan jóval több energiát használ, viszont nagyon kicsi a késleltetés downlink irányban, olyan alkalmazások számára, melyek ezt igénylik. A kommunikáció itt is lehet unicast (pont–pont), illetve multicast (pont-többpont) jellegű is.

Fontos különbséget tenni a LoRa és a LoRaWAN kifejezések között, hisz ez sokszor félreértések tárgyát képezi. A LoRa magát a speciális modulációs eljárást jelenti, tehát a rádiós átvitelt a fizikai rétegben. Ezzel szemben a LoRaWAN egy protokoll, mely a LoRa rádiót használó eszközök alkotta nagy kiterjedésű hálózat (WAN, Wide Area Network) működését írja le. Felépítését illetően egy LoRaWAN hálózat a következő elemekből áll:

- *LoRa* rádiós kommunikációt használó végberendezések. Ezek általában olyan szenzorok, mely kis adatmennyiségeket küldenek egy központi feldolgozó egység felé, viszonylag ritkán.
- *LoRa* bázisállomások, melyek több százezer végberendezéssel képesek kommunikálni, viszonylag nagy területeket lefedve. Egy adott végberendezés által küldött adatot több LoRa bázisállomás is érzékelheti párhuzamosan.
- *LoRaWAN* hálózati szerver, mely egyfelől a bázisállomások, másfelől pedig az alkalmazásszerverek között teremti meg az összeköttetést. Ha ugyanaz az adat, melyet egy adott végberendezés küldött, több bázisállomáshoz is megérkezett, ezek mindegyike továbbküldi azt a LoRaWAN hálózati szerver felé, a hálózati szerver viszont érzékeli ezt a duplikátumot, és csak egy példányban küldi tovább az adatot a megfelelő alkalmazásszerver felé. A LoRaWAN hálózati szerver és a LoRa bázisállomások, illetve az alkalmazásszerverek közötti kapcsolat megvalósítható különböző vezetékes, illetve vezeték nélküli kommunikációs technológiával.
- *Alkalmazásszerverek*, melyek egy bizonyos alkalmazás specifikus igényeinek megfelelően tartják a kapcsolatot a különböző végberendezésekkel, távolról szabályozzák azok működését, meghatározzák az adatbegyűjtés folyamatát, a beérkező nyers adatokat feldolgozzák, az ezekből kinyert emelt értékű információt pedig szükség esetén megjelenítik a felhasználók számára, különböző grafikus interfészek segítségével.

A LoRa technológia az utóbbi néhány évben rendkívüli népszerűségnek örvendett és a világ számos országában rohamos iramban kezdett el terjedni. 2017 végén 62 hálózati szolgáltató jelentette be a saját LoRaWAN hálózatának a kiépítését és rendelkezésre állását a világ több mint 40 országában, folyamatban levő telepítésről és tesztüzemekről pedig a világ több mint 350 városában számoltak be.

C) Weightless

A *Weightless* szintén egy LP-WAN hálózatok építését támogató szabványcsalád, melybe jelenleg három ismert szabványváltozat tartozik:

- *Weightless-N:* egy, csak a feltöltést (uplink irányú kommunikációt) támogató ultra narrowband technológia, mely a szabadon felhasználható, 1 GHz alatti ISM-frekvenciatartományokban (Európában 868 MHz, az Egyesült Államokban 915 MHz) működik. A DBPSK (Differential Binary Phase Shit Keying) digitális modulációs megoldásra épül és frekvenciaugratást alkalmaz. Ez egyfelől csökkenti az interferenciák lehetőségét, hiszen a zajos csatornákról az eszköz hamar ki fog ugrani. Másfelől a frekvenciaugratás növeli (valamilyen szinten) a kommunikáció biztonságát is, hiszen egy sikeres lehallgatáshoz ismerni kell nem csak az alkalmazott ugrássorozatot, de a tartózkodási időket is a különböző frekvenciákon.
- *Weightless-W:* egy olyan LP-WAN technológia, mely a white space frekvenciákat, azaz az analóg televíziózás megszűnésével felszabadult frekvenciatartományokat használja ki, hasonlóan az IEEE 802.11af Wi-Fi szabványhoz vagy az IEEE 802.22 kognitív rádió szabványhoz. Szintén frekvenciaugratást használ és TDD (Time Division Duplex) duplexálást, azaz a felfele és lefele irányuló kommunikációt időosztással választja el egymástól (bizonyos periódusokban a teljes frekvenciatartományban csak downstream irányban, más intervallumokban pedig csak upstream irányban történik a kommunikáció).
- *Weightless-P:* a 2012 végén megalakult Weightless SIG (Special Interest Group) által fókuszba helyezett, teljes mértékben kétirányú kommunikációt biztosító keskenysávú technológia, mely működőképes lesz úgy a licenszköteles, mint a szabadon használható frekvenciatartományokban.

A Weightless támogatja, hogy különböző modulációs és kódolási megoldásokkal a bázisállomások a különböző távolságokra levő végfelhasználó eszközökkel más-más átviteli sebességek mellett kommunikáljanak. Az átviteli sebesség tehát függ a távolságtól és a tapasztalható rádiós interferenciáktól, de tipikusan 0,1 Mbps és 16 Mbps között mozoghat.

4.3.3. Az LP-WAN hálózatok biztonsági kihívásai

Az LP-WAN hálózatok biztonságos kommunikációjának biztosítása több szempontból is kihívást jelent. Egyfelől a szenzorok korlátozott erőforrásai (CPU, memória, energia) nem igazán teszik lehetővé a hagyományos, komplex hitelesítési és kriptográfia mechanizmusok adaptáció nélküli alkalmazását. Másfelől a nagy kommunikációs távolságok miatt ezek a technológiák fokozottan ki vannak téve az átvitel hatékonyságának csökkentését célzó támadásoknak.

A szenzorok és szenzorhálózatok biztonsági kérdéseinek, mint ahogy azt a bevezetőben is említettük, egy külön kismonográfiát szentelünk. Ennek fényében itt most nem célunk ezt a területet részletesen tárgyalni, ezért csak röviden érintjük egy adott technológia, a LoRaWAN biztonsági mechanizmusait.

A biztonságos kommunikációt illetően a LoRaWAN protokoll az IEEE 802.15.4 szabvány biztonsági mechanizmusait alkalmazza és az AES-128 (Advanced Encryption Standard) titkosító algoritmust használja, kiegészítve egy Network Session Key és egy Application Session Key használatával. Mielőtt egy végberendezés kommunikálni kez-

dene a LoRaWAN hálózatban, először aktiválni kell azt. Ehhez szüksége van egy egyedi eszközazonosítóra, illetve az előbb említett hálózati és alkalmazási kapcsolatkulcsokra.

Az eszköz egyéni azonosítója (DevAddr) egy 32 bites azonosító, mely egyedi a teljes LoRaWAN hálózatban, és minden, az eszköz által küldött adatkeretben megtalálható. Ezt az azonosítót ismeri a végfelhasználó eszköz, a LoRaWAN hálózati szerver, illetve az alkalmazásszerverek is. Ennek segítségével tudjuk megkülönböztetni a különböző végberendezéseket a teljes hálózatban, ez biztosítja a hálózatnak az adott eszközre szabott megfelelő titkosítási kulcs használatát, illetve az adott eszköztől származó információk pontos értelmezését.

A Network Session Key egy 128 bites AES titkosító kulcs, mely egyedi az adott eszközre, a kulcs értékét csak az eszköz, illetve a hálózati szerver ismeri. Ez a kulcs biztosítja a csomagok integritását a LoRa rádiós átvitel során, illetve a végberendezések és a hálózati szerver közötti kommunikáció biztonságát is. Végül pedig az Application Session Key egy szintén 128 bites AES titkosító kulcs, melyet csak a végberendezés és az alkalmazásszerver ismer. Ennek segítségével lehet tikosítani végponttól végpontig az alkalmazásszintű csomagokat a LoRaWAN hálózaton keresztül történő átvitel során.

A biztonságos kommunikációhoz szükséges, hogy ezeket az azonosítókat és kulcsokat az összes érdekelt fél megismerhesse. Erre két különböző aktivációs mechanizmust használ a LoRa. Az egyik ezek közül az *OTAA (Over-the-Air Activation)*, mely globálisan egyedi azonosítókkal, és a rádiós interfész felett biztosított kézfogásos üzenetváltással (handshaking) történik. A kapcsolat kezdeményezésekor a végberendezés küld egy csatlakozási kérelmet (Join Request) az alkalmazásszerver felé, ebben pedig elküldi a saját, globálisan egyedi azonosítóját (DevEUI), egy alkalmazásazonosítót (AppEUI), illetve egy hitelesítési kulcsot az adatott alkalmazáshoz (AppKey). Az alkalmazásszerver erre egy Join Accept üzenettel válaszol. A végberendezés hitelesíti ezt a Join Accept üzenetet, majd feloldja a titkosítást, az üzenetből kiveszi, és tárolja az alkalmazásszervertől kapott, az adott LoRaWAN hálózatban egyedi eszközazonosítót (DevAddr), majd kiszámolja a Network Session Key és az Application Session Key kapcsolatkulcsokat.

A másik aktivációs mechanizmus az *ABP (Activation by Personalization)*, amely a LoRa eszköz gyártásakor konfigurált eszköz azonosítót (DevAddr), hálózati (Network Session Key) és alkalmazáskapcsolat-kulcsokat (Application Session Key) érinti. Ebben az esetben nincs kézfogás a rádiós interfészen keresztül, a végberendezés rögtön kész a használatra, bármilyen egyéb aktiválási folyamat nélkül.

4.3.4. Az LP-WAN hálózatok helyzete és kilátásai

Az IHS Markit piackutató cég tanulmánya szerint a különböző LP-WAN technológiák éves növekedési rátája több mint 200%-os lesz a következő 4-5 évben, de a szektoron belül azt tapasztalták, hogy 2017 során a LoRaWAN technológia jelentős előnyre tett szert a rivális Sigfox technológiával szemben. Az IHS Markit előrejelzése alapján, publikus LoRaWAN szolgáltatáshoz 2021-ben több mint 300 millió eszköz fog csatlakozni. A cellás IoT technológiák (LTE-M és leginkább az NB-IoT) viszont várhatóan nagyon gyors tempóban fogják behozni a lemaradásukat és 2021-re már várhatóan átveszik a vezető szerepet az LP-WAN hálózati technológiák területén.

5. SZENZOROK ENERGIAGAZDÁLKODÁSA

Mint azt már többször említettük, a szenzoroknak általában korlátozottak az erőforrásaik, és ezen belül az energiatartalékaik, ezért kifejezetten fontos az energiahatékonyságra minél nagyobb figyelmet fordítani a működés minden szintjén. A szenzorok energiát használnak magukra a mérésekre, a mért adatok tárolására, esetleges feldolgozására, illetve a rádiós kommunikációra is. A szenzorok energiaszükségleteit jellemzően nikkel-kadmium (NiCd), nikkel-cink (NiZn) vagy lítium-ion akkumulátorok biztosítják. Bár a különböző megoldások között kisebb-nagyobb eltérések tapasztalhatóak, íme néhány általános fogyasztási adat, melyet a szenzor akkumulátorok tervezésénél biztosítani kell.

A szenzorok áramfelvétele aktív üzemmódban 10 és 50 mA között mozog. Itt fontos megjegyezni azt, hogy a rádiós interfész esetében nemcsak az adással eltöltött idő számít aktív periódusnak, hiszen a rádiós csatorna figyelése esetén is, vevő üzemmódban, szinte ugyanakkora energiafogyasztás tapasztalható. Másfelől bizonyos szenzorok esetén maga az aktív mérés is jelentős, akár több tíz milliamperes fogyasztással járhat.

Alvó üzemmódban, amikor a rádiós interfész kikapcsolt állapotban van, és nem végzünk aktív mérést sem, a szenzorok tipikus áramfelvétele 100 nA és 10 μA között mozog általában. A tipikus feszültség szintek 1,8 V, 3,3 V és 5 V lehetnek, a felvett teljesítmény pedig ennek megfelelően tipikusan 20 mW és 250 mW között mozog. Egy 2000 mAh-s akkumulátor-élettartammal számolva, ha a szenzor folyamatosan aktív állapotban lenne, akkor kb. 40 és 200 óra közötti, azaz néhány napos üzemidővel tudnánk csak számolni, ami a beágyazott szenzorok esetében messze nem elfogadható. Ha viszont úgy számolunk, hogy a szenzorok az üzemidejük 99%-ban alvó üzemmódban vannak, és csak az idő 1%-ban aktívak, akkor akár egy-két éves akkumulátor-élettartammal is számolhatunk. Ez bizonyos esetekben elegendő lehet, de vannak olyan alkalmazások, olyan környezetek, ahol inkább 5-10 éves élettartam az elvárt. Figyelembe véve azt is, hogy ilyen több éves időtartam során az akkumulátorok önkisülésével is számolni kell, mint élettartam-csökkentő körülménnyel, fokozott figyelmet kell szentelni a különböző alternatív, hagyományostól eltérő energiaforrások felhasználására is. Ezekről az 5.2. alfejezetben beszélünk majd részletesebben.

5.1. Energiamegtakarító mechanizmusok

A szenzorok esetén két energiamegtakarító mechanizmus is széleskörűen elterjedt. A *DPM (Dynamic Power Management)* [Dargie 2012] lényege, hogy úgy takarít meg energiát, hogy leállítja a szenzor azon elemeit, melyek aktuálisan nincsenek használatban. A szenzor pazarló energiafelhasználását sok esetben a nem megfelelő szoftver- vagy hardver-konfiguráció okozza, ezekre fokozott figyelmet kell tehát fordítani. Egy mikrokontroller esetén például több különböző alvó üzemmód közül választhatunk, ezeknek az energiafogyasztása pedig jelentősen különbözhet. Az ATmega128L mikrokontroller esetén például hat különböző konfiguráció létezik. *Idle* üzemmódban a CPU leáll, de az SRAM, az időzítők és számlálók, az SPI-port és a megszakítási (interrupt) rendszer tovább működik. Az *ADC Noise Reduction* üzemmódban a CPU és az összes I/O modul leáll, kivéve az aszinkron időzítő és az analóg–digitális átalakító. *Power save* üzemmód-

ban csak az aszinkron időzítő fut, az összes többi komponens alvó üzemmódban van. De ezeken kívül választhatunk még a *Power down*, a *Standby* és az *Extended Standby* üzemmódok közül is.

Szintén a DPM kérdésköréhez tartozik a kommunikációs interfész megfelelő konfigurálása. A két legfontosabb jelenség, ami felesleges energiahasználathoz vezet egy szenzor kommunikációs interfészének használata esetén az úgynevezett hallgatózás (idle listening), illetve az áthallás (overhearing). Hallgatózás esetén a szenzor nem tudja pontosan, hogy mikor fognak neki szánt csomagok érkezni a rádiós csatornán, ezért hosszabb ideig kénytelen hallgatni az üres csatornát. Áthallás esetén a szenzor olyan csomagokat hall meg és dolgoz fel, melyeket alapvetően nem neki szántak, a csomagok feldolgozása tehát felesleges lesz, hiszen a felsőbb rétegben úgyis eldobják majd ezeket az adatokat. Egy megfelelő alvásvezérlő algoritmus használatával ezek a problémák elkerülhetőek lehetnek. Ennek megfelelően a kommunikációs alrendszer is különböző szintű alvó üzemmódokba állítható.

Másfelől a *DVS (Dynamic Voltage Scaling) mechanizmus* dinamikusan változtatja a feszültséget, a *DFS (Dynamic Frequency Scaling) mechanizmus* pedig dinamikusan változtatja az órajel frekvenciáját annak függvényében, hogy milyen a terheltsége az egyes szenzoroknak, jelentős mennyiségű energiát megtakarítva ezzel. Legtöbb esetben az operációs rendszer által beütemezett feladatok nem követelik meg a processzortól, hogy az teljes kapacitáson üzemeljen. Az aktuális és a várt feladatok tükrében tehát érdemes bizonyos alrendszerek működését „lassítani” és ezáltal energiahatékonyabbá tenni. Míg az órajel frekvenciájának csökkentése lineáris energia megtakarításhoz vezet, addig a feszültség dinamikus csökkentése kvadratikus megtakarítást jelenthet. Mindemellett úgy a feszültség, mint az órajel frekvenciájának csökkentése, bizonyos keretek között engedélyezhető úgy, hogy az ne veszélyeztesse a rendszer megbízható működését.

A szenzorok mindazonáltal sok esetben nem önállóan, hanem egy hálózatba szerveződve működnek, ez pedig sok szempontból újabb lehetőségeket nyit meg az energiahatékony működés terén. Mivel a szenzorokat sok esetben redundáns módon helyezik le a megfigyelni kívánt területen, ezért az egymáshoz közel eső szenzorok mérései sok esetben nagyon erős térbeli és időbeli korrelációt mutatnak. Ilyen helyzetben pedig nem célszerű az összes szenzornak folyamatosan ébren lenni és monitorozni a környezetet, a szenzorok egy részét érdemes alvó üzemmódba helyezni. Másfelől egy telepített szenzorhálózat esetén a szenzorok nem feltétlenül küldik el közvetlenül a mérési eredményeiket a központi nyelőállomás felé, hiszen egy távoli szenzor esetén ez jelentős energiafelhasználással járna. Helyette inkább egy többugrásos útválasztó algoritmust használnak, az útvonalak felépítésénél pedig fokozottan figyelembe lehet venni az egyes szenzorok aktuális energiaszintjét, illetve a csomagok többugrásos küldéséből keletkező energiaigény egyenletes elosztását. A szenzorhálózatok energiahatékony működésével egy későbbi tanulmányban foglalkozunk részletesen. Jelen tanulmányban csak az egyedi szenzorok működésének bemutatását céloztuk meg.

5.2. Alternatív energiaforrások

A szenzorok energiaforrásai általában szűkösek, mégis elvárás az, hogy a kihelyezett szenzorjaink felügyelet nélkül működhessenek akár éveken keresztül is. Egy lehetséges megoldás erre a problémára az, hogy a szenzorjainkat felszereljük alternatív energiaforrásokkal, melyek folyamatosan biztosítani tudják a szenzorok zavartalan működését. Ezeket a technológiákat az angol nyelvű szakirodalom az *energy harvesting* kifejezéssel

írja le, melynek a magyar szaknyelvben nincs igazán jó megfelelője, ezért többnyire a magyar nyelvű szakmai anyagokban is az angol kifejezést használják.

A teljesség igénye nélkül a következőkben bemutatunk néhány ilyen alternatív energiaforrást.

5.2.1. Fotoelektromos átalakítók

A fotoelektromos átalakítók a félvezető anyagokban jelentkező fotoelektromos hatás segítségével alakítják át a fényenergiát elektromos energiává [OROSZ 2013]. Ezeknél az átalakítóknál számít természetesen a napelem felületének mérete és az eszközök elhelyezése is. Előbbi a szenzorok kis mérete miatt erősen korlátozott, de azért a mai technológiai megoldások már néhány cm^2-es felület esetén is képesek biztosítani egy egyszerűbb szenzor áramellátását. Abból kiindulva, hogy a Földre érkező napsugárzás energiája kb. 100 mW/cm2, kiszámolható az, hogy egy 10 cm2 felületű napelem esetén, mely a mai szenzorok többsége esetén még egy elfogadható, arányos méretet jelent, a kinyerhető nyers teljesítmény 1000 mW, ami egy 3,3 V-os tápfeszültség esetében 300 mA-es áramot jelent. Ez pedig nagymértékben fedezi egy szenzor teljesítményigényét.

A fotoelektromos átalakítók hatékonysága nagymértékben függ a külső környezeti viszonyoktól. A Föld felszínére érkező napsugárzás nem minden esetben használható ki azonban, hiszen felhős időben, árnyékos helyen vagy beltéri környezetben a fényenergia jelentősen korlátozott. Bizonyos esetekben azonban a mesterséges fényforrásokból, illetve a szórt fényből származó energia is elegendő lehet. Kiterjedt mérési eredményekből [Silva 2012] az látszik például, hogy alacsony hőmérséklet (0 °C alatt) esetén jelentősen csökken az átalakítás hatékonysága, még nagy mennyiségű rendelkezésre álló fényenergia esetén is. A hó és a jég pedig tovább csökkenthetik a napelemek hatékonyságát.

5.2.2. Piezoelektromos átalakítók

A piezoelektromos átalakítók lényege az, hogy az anyag mechanikai deformációja esetén a felületükön töltés halmozódik fel, melynek elvezetésével villamos energiát állítanak elő. Így biztosítható például energia kinyerése a környezeti mozgásokból.

A piezoelektromos átalakítók, anyaguk alapján, két nagy csoportba sorolhatóak. Egyfelől a kristályokból, kerámiából készült átalakítók esetén az anyag rideg, nehezen deformálható, az átalakítás vesztesége viszont nagyon alacsony, az anyag lassabban öregszik és a hőnek nagyon jó ellenáll. Másfelől, különböző polimerek használata esetén, viszont elasztikus, könnyen deformálható anyagokról van szó, melyeknél magas a generált feszültség, viszont nagy a veszteség is.

A piezoelektromos átalakítók esetén két különböző üzemmódról beszélhetünk. Nem rezonáns üzemmóddal akkor találkozunk, amikor ritkán ismétlődő, egyszeri deformációk jelentkeznek, például egy sportpálya alatt vagy egy sportcipőben elhelyezett generátor esetén. A felület deformációja itt időben nem egyenletesen ismétlődik, ezért impulzusszerű erőhatásként kell kezelni. Ezzel szemben rezonáns üzemmódról akkor beszélünk, amikor a piezogenerátort periodikusan ismétlődő erőhatás éri, például egy munkagép forgó alkatrészének rezgése esetén. Ilyen esetben célszerű a piezogenerátor rezonanciafrekvenciáját a rezgés forrásának frekvenciájához illeszteni, mert akkor a mechanikai rezgés nagyobb kitéréseket és ezáltal nagyobb feszültségeket okoz. A generátor rezonanciafrekvenciáját viszonylag könnyen lehet kalibrálni a generátor anyagát és tömegét figyelembe véve.

5.2.3. Termikus energiaátalakítók

A termikus energiaátalakítók azt használják ki, hogy különböző típusú fémek vagy félvezetők összeérintésénél feszültség keletkezik, ha a hőmérsékletük eltérő. Ezt hívják Seebeck-effektusnak. A kialakuló feszültség az érintkezési pontok közötti különbséggel arányos. A nagyobb feszültségek eléréséhez, az így kialakított termoelektromos generátorok általában réteges szerkezetűek, mert így több határrétegen is keletkezik feszültség, ezek pedig összeadódnak. Egy kiemelendő alkalmazási területe ezeknek az átalakítóknak a testen viselhető szenzorok, melyek az emberi test hőmérsékletét használják energiaforrásként.

IRODALOMJEGYZÉK

- Anderson, Gery D. (2014): *Industrial Network Basics: Practical Guides for the Industrial Technician!* (Volume 3). CreateSpace Independent Publishing Platform, 2014. Print. ISBN 1500930938.

- Axelson, Jan (2007): *Serial Port Complete: COM Ports, USB Virtual COM Ports, and Ports for Embedded Systems* (Complete Guides series). Lakeview Research; 2nd edition, 2007. Print. ISBN: 193144806X.

- Bai, Ying (2015): *Practical microcontroller engineering with ARM® technology*. Hoboken, New Jersey: Wiley IEEE Press, 2015. Print. ISBN: 1119052378

- Dargie, Waltenegus (2012): *Dynamic Power Management in Wireless Sensor Networks: State-of-the-Art*, IEEE Sensors Journal, Vol. 12, No. 5, May 2012.

- Eady, Fred (2004): *Networking and internetworking with microcontrollers*. Amsterdam Boston: Newnes, 2004. Print. ISBN: 0750676981

- Hall, Edwin (1879): *On a New Action of the Magnet on Electric Currents*. American Journal of Mathematics. 2 (3): 287–92, 1879. DOI:10.2307/2369245.

- Hersent et al. - Hersent, Oliver et al. (2012): *The Internet of Things: Key Applications and Protocols* 2nd Edition. Wiley; 2012. Print. ISBN 1119994357

- Liu, Chang (2011): *Foundations of MEMS*, 2nd Edition, Pearson, March 2011, ISBN-13: 978-0132497367.

- Margolis, Michael (2011): *Arduino Cookbook*, 2nd Edition. O'Reilly Media; 2nd edition, 2011. Print. ISBN: 1449313876

- McClelland, Calum (2013): *LPWAN – The Benefits of LPWAN Technology vs. Other IoT Connectivity Options*, IoT for All, April 2017. https://www.iotforall.com/lpwan-benefits-vs-iot-connectivity-options/ (A letöltés ideje: 2019. december 30.)

- Natale, Marco Di et al (2012): *Understanding and Using the Controller Area Network Communication Protocol: Theory and Practice,* Springer; 2012 edition, 2012. Print. ISBN 1461403138

- Orosz György (2013): *Alternatív energiaforrások (energy harvesting) lehetőségeinek vizsgálata vezeték nélküli szenzorhálózatokban*, Kutatási beszámoló, 2013.

- Brian Ray (2016):, *Lora Localization*, Link Labs blog, June 2016. https://www.link-labs.com/blog/lora-localization (A letöltés ideje: 2019. december 30.)

- Sen, Sunit Kumar (2014): *Fieldbus and Networking in Process Automation*. CRC Press; First edition, 2014. Print. ISBN: 1466586761

- Silva et al. - Agnelo Silva, Mingyan Liu, and Mahta Moghaddam (2012): *Power-Management Techniques for Wireless Sensor Networks and Similar Low-Power Communication Devices Based on Nonrechargeable Batteries*, Journal of Computer Networks and Communications, Volume 2012 (2012), Article ID 757291, 10 pages, http://dx.doi.org/10.1155/2012/757291

- Townsend, Kevin (2014): *Getting Started with Bluetooth Low Energy: Tools and Techniques for Low-Power Networking*. O'Reilly Media; 1 edition, 2014. Print. ISBN 1491949511

- Voss, Wilfried (2005): *A Comprehensible Guide to Controller Area Network.* 2nd Edition. Copperhill Media Corporation; 2005. Print. ISBN 0976511606

- Xu, Guochang and Xu, Yan (2016): GPS: *Theory, Algorithms and Applications*. 3rd edition, Springer, July 2016, ISBN-13: 978-3662503652

A Nemzeti Közszolgálati Egyetem kiadványa

Kiadó:

Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Közigazgatási Továbbképzési Intézet
www.uni-nke.hu

Felelős kiadó:
Prof. Dr. Kis Norbert rektorhelyettes
Címe: 1083 Budapest, Üllői út 82.

Olvasószerkesztő:
Zsoldos Sándor

Tördelőszerkesztő:
Friebert Máté

ISBN 978-963-498-392-7 (elektronikus)