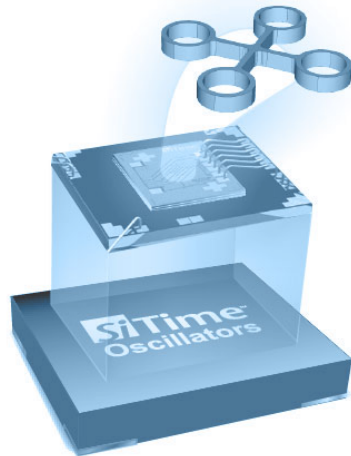




A digitális elektronikai eszköz mikrovezérlője számára szükséges órajelet a tervezőmérnökök ma még leggyakrabban kvarckristály rezonátorokkal állítják elő meg, ami az oszcillátorokkal összevetve az olcsóbb ár miatt kétségtelenül vonzó megoldás, viszont használatuk esetenként kompromisszumokat feltételez, és potenciális hibaforrásként jelentkezik az alkalmazás életciklusa egy későbbi szakaszában. Amennyiben elemes táplálású, valamilyen vezetékmentes kommunikációra képes, akár hálózathoz kötött IoT eszközről beszélünk további, az elem élettartamával kapcsolatos szempontokat is figyelembe kell venni. Kísérleti úton igazolt tény, hogy egy Bluetooth LE modul fogyasztása fordítottan arányos annak „alvásból töltött” idejével, és az ebben az állapotban az időzítést biztosító 32,768 kHz-es valósídejű óra (RTC) pontossága (SCA – Sleep Clock Accuracy) közvetlen hatással van az elem élettartamára. Cikkünkben megmutatjuk, hogy a szokásos kristály rezonátorokat MEMS alapú oszcillátorokkal helyettesítve milyen előnyöket élvezhetünk.

Hagyományos rezonátorok és oszcillátorok kiváltása MEMS technológiával

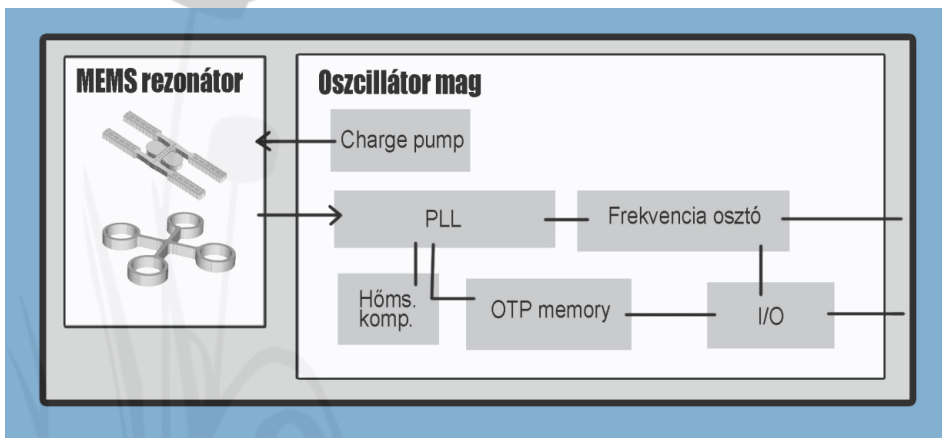
A digitális elektronikához szükséges időzítés nem bonyolult, egy piezoelektromos kvarckristály rezonanciájával vezérelt Pierce oszcillátor - megfelelő szűrés és frekvenciaosztás alkalmazásával – elegendő a legtöbb feladathoz. Természetesen más piezoelektromos anyagok is léteznek, például kerámia alapú rezonátorokból is készíthető oszcillátor. A hagyományos kvarc oszcillátorok speciális gyártástechnológiát igényelnek, a kristály vágása, szeletelése, csiszolása



mind nagy precizitást igénylő feladat, a nagynevű gyártók pedig rendelkeznek a szükséges ismeretekkel és felszereléssel ahhoz, hogy a megfelelő frekvenciákra hangolt eszközöket elkészítsék és azok stabilitását 15-20 évre biztosítsák. Azonban gyakran nincs tapasztalatuk az analóg elektronikában, az analóg chipeket a piacon kell vásárolniuk, ami a minőségi megoldás biztosításának érdekében rengeteg többletköltséget jelent, komplex feladat, ami hosszú szállítási határidőkkel és minőségügyi feladatokkal jár együtt. Másrészről a félvezető alapú óragyártóknak nincs tapasztalatuk a kvarckristályok speciális vákuumzárás kerámia tokozásában, ami feltétele a magas Q faktor elérésének. Így kombinált eszközök helyett a külön tokozott rezonátor és analóg elektronika használatával nehéz megfelelni a piac elvárásának a miniatürizálás terén. Az elmúlt néhány évtizedben így a kvarckristály alapú oszcillátorok, órajel

generátorok és rezonátorok szerepeltek az elsődleges időreferencia alkatrésznek használható eszközök listáján, mivel nem létezett igazi alternatív megoldás. Napjainkban egy új technológia lép előtérbe, melyben MEMS struktúra és az analóg elektronika együttesen épül az IC tokba. A MEMS rezonátor az analóg IC MEMS specifikus áramköri blokkjához kapcsolódik. Elektrosztatikus gerjesztés útján a MEMS rezonátorban mechanikai rezgés keletkezik, amely érzékelésével és az analóg elektronika segítségével különböző órajel kimenetek építhetők ki az egyszerű félvezető tokozásban.

Az SiTime nevű analóg félvezetőgyártó, melynek a MEMS technológia iránti elkötelezettsége a BOSCH és a Stanford egyetemi gyökerekhez nyúlik vissza, a hagyományos kvarc oszcillátorok és esetenként rezonátorok kiváltására alkalmas, azoknál fejlettebb, mégis sokszor olcsóbb megoldásokat kínál. Az



1| MEMS oszcillátor belső felépítése

általuk kínált MEMS / CMOS kombinált chippek több PLL egyidejű alkalmazásával különböző órajel frekvenciát tudnak előállítani egyetlen tokban. Ez a kombinált megoldás szignifikáns előnyökkel bír a méretcsökkentés és az egyszerűsítés lehetőségét biztosítva. Az SiTime eszközei előre programozhatók (OTP) és a hagyományos kvarc oszcillátorokat helyettesítik anélkül, hogy az áramkört át kellene tervezni. A programozhatóság flexibilis terméktervezést tesz lehetővé, csökken általa a szállítási határidő és mindeközben jelentős, akár 85%-os méretcsökkenés is elérhető. A gyári programozhatóságon túl a vásárló saját programozó eszközt is rendelhet a gyors prototípus gyártáshoz. Ahogy azt említettük, az SiTime a MEMS struktúrát és az analóg elektronikát egy chipben egyesítette, így nincs szükség külön tokozni a rezonátort és az elektronikát.

Ahogy az ábrán látható, az eszköz a MEMS rezonátoron kívül hőmérséklet kompenzáló, frekvenciaosztó, I/O driver és egyszer programozható memória áramkört tartalmaz. Az SiTime képes 500 fs jitter elérésére kilohertzes eszközeinél, 0.1 ppm stabilitás és nagyon alacsony (700nA) fogyasztás mellett. A programozhatóság a 6 decimális pontosságú frekvencia mellett kiterjed még a fel- és lefutási időkre is, ami az EMI és a jitter minimalizálásához szükséges.

A MEMS oszcillátorok előnyei a kvarckristályokkal szemben

1. Az áramkörillesztés egyszerűsödik (Plug 'n' play), nincs szükség a kristály és az oszcillátor illesztésére
2. Minőség és megbízhatóság nő, hiszen a bonyolult kvarc kristály gyártási technológiákkal szemben a MEMS oszcillátorok gyártástechnológiája a kiforrott CMOS félvezető wafer alapú technológia.
A MEMS chip egy tiszta szilícium mechanikai struktúra, melynek tisztítása utáni vákuumos hermetikus lezárása biztosítja a szennyezetlenséget, így kizárja az öregedést gyorsító tényezőket. Ennek eredménye a harmincszor nagyobb MTBF (1150) és a max. 1.5 meghibásodás egymillió alkatrészenként.
3. Alacsonyabb helyfoglalás a NYÁK lemezen – MEMS oszcillátorok teljesen integrált megoldást jelentenek, nem igényelnek külső komponenseket, mint például tápegység leválasztó kondenzátorok, így komoly helymegtakarítást értünk el.
4. Az aktív MEMS oszcillátor kimeneti vezérlője képes egyszerre 2-3 terhelés egyidejű kiszolgálására, ami lehetővé teszi, hogy több kristályt, a hozzájuk tartozó terhelő kondenzátorokkal egyetemben kiválsunk, ami jelentős BOM költség megtakarítást kínál a

szükséges NYÁK terület minimalizálása mellett és ráadásul energiatakarékos is.

5. A MEMS oszcillátor kevésbé érzékeny az elektromágneses interferenciára (EMI), mert nincsenek a hagyományos megoldásokban létező „zaj gyűjtő” antennaként viselkedő rezonátor és az oszcillátor közötti NYÁK vonalak. A MEMS chip és a CMOS elektronika összekapcsolására alkalmazott kötések vagy golyók extrém kisméretűek, így nem lesz a kimenetre átcsatolódo zaj, amely az órajelben jitter megjelenését idézné elő.

Megjegyzendő az is, hogy a MEMS oszcillátorok nemcsak kevésbé érzékenyek az EMI-ra, de az ilyen alapon működő időzítés maga is kisebb elektromágneses interferencia forrás, mint a hagyományos kristály alapú megoldások. A SiTime MEMS oszcillátorokat ellátták néhány olyan beépített megoldással, ami az óra által gerjesztett elektromágneses zavar energiáját csökkenti. Az egyik ilyen a SoftEdge™ órajel lefutó és felfutó él vezérlés. A lassabb fel- és lefutás csökkenti a digitális órajelben megjelenő felharmonikusokat, az ezen harmonikusok által gerjesztett elektromágneses energia így minimális lesz. A SiTime Spread Spectrum Clocking (SSC) oszcillátorai nemcsak az órajel vonal EMI rádiációját csökkentik, hanem a teljes hálózatét, ami erről az oszcillátorról kapja az órajelet.

6. A MEMS oszcillátor kevésbé érzékeny a mechanikai vibrációra, hiszen a MEMS rendszer tömege töredéke, általában három nagyságrenddel kisebb, mint a kristályé, az ezekben ébredő erők is nagyságrendekkel kisebbek, mint a kristály alapú megfelelőiknél, így vibrációállósága mérések alapján tízszerese egy kristály oszcillátorénak.

7. A MEMS oszcillátor bármilyen frekvenciára elérhető, mert a kimeneti frekvenciát minden esetben a programozható szorzótényezővel állítható PLL-ek állítják elő (lsd. 2. ábra), ami széles frekvenciatartományon, akár hat digitális pontosságú egyedi frekvencia beállítást tesz lehetővé egyszer programozható (OTP) módon.

8. Az egész gyártmánycsaládra egyetlen kvalifikáció szükséges csak, hiszen csak egy eszköz betervezése és jóváhagyása szükséges ebben az esetben akkor is, ha eltérő frekvenciájú, tápfeszültségű vagy pontosságú időzítésre van szükség egy későbbi NYÁK változat esetén, mivel ezek a paraméterek mind programozással beállíthatók. Ilyen esetben általában elegendő az eredeti kvalifikációs dokumentáció az új körülményekre szóló kiterjesztése.

A MEMS oszcillátorok energiatakarékosági jellemzői

A digitális áramkörök lelke a mikrokontroller, ami elemes táplálás esetére szinte mindig többszintű energiatakarékosági módokba kapcsolható. Azonban még a legalacsonyabb fogyasztású alvó módban is szükség van legalább a valós idejű óra (RTC) működtetésére, amit általában egy 32,768 kHz-es kristály rezonátor / oszcillátor időzít. Egy ilyen oszcillátor fogyasztása kb. 1-2 μA áramerősség és 3.0V feszültség mellett 2-3 μW . Egy IoT eszköz lítium eleméről általánosságban elmondható, hogy a hosszú ideig tartó alvási idő alatt ez a terhelés jobban meríti, mint a rövid ideig tartó tényleges üzem, így az elem élettartama szempontjából kritikus a 32 kHz-es oszcillátor fogyasztása.

A SiT15xx család a szilícium MEMS oszcillátorok új generációját képviseli, mely elsősorban a hagyományos on-chip oszcillátorok, külső kvarc oszcillátorok és kvarc kristályok energia hatékony kiváltására készült.

A MEMS oszcillátorok tipikusan 750 nA áramerősséggel táplálhatók. Az új család további energiatakarékosági jellemzői az 1.2V-ig való működés, az 1 Hz-ig programozható frekvencia és a programozható kimeneti feszültség (swing).

a. Programozható frekvencia:

Az alacsonyabb frekvencia jelentősen csökkenti a kimeneti terhelőáramot, példaként a 32,768 kHz működési frekvencia 10 kHz-re csökkentése 30%-os áramcsökkentést okoz, míg az 1 Hz-es üzem 99%-os megtakarítással jár.

A SiT15xx MEMS oszcillátorok 1 Hz-től 32 kHz-ig programozhatók, így jelentős energia megtakarítás érhető el velük.

Példa 10 pF terhelési kapacitás feltételezésével:

- $V_{dd} = 3.0\text{V}$ (átlag)
- $V_{outpp} = 2.1\text{V}$
- $I_{dd} \text{ Core} = 750\text{nA}$
- I_{dd} kimeneti vezérlő:
(165nA/V)(2.1V) = 347nA
- Terhelőáram:
(10pF)(2.1V)(32.768kHz) = 688nA

Teljes áramfelvétel = 750nA + 347nA + 688nA = **1785nA**

Ha a frekvenciát 10 kHz-re csökkentjük, akkor a következőképpen alakul az áramfelvétel:

- Terhelőáram: (10pF)(2.1V)(10kHz) = 210nA

Teljes áramfelvétel = 750nA + 347nA + 210nA = **1307nA**

b. Programozható kimeneti feszültség (swing):

Egy új energia-megtakarítási mód érhető el az új generációs szilícium MEMS alapú oszcillátorok esetében, a NanoDrive™ technológia, mely a kimeneti feszültség programozhatóságát teszi lehetővé. A kimeneti szint teljes értéktől 200 mV-ig csökkenthető így megtakarítva akár az energia 40% -át.

A korábbi példa szerint a teljes áramfelvétel 10 pF terhelési kapacitás, 32.768 kHz frekvencia és $V_{dd}=2.1V$ mellett :

$$I = 750nA + 347nA + 688nA = \mathbf{1785nA}$$

Ha a frekvenciát 10 kHz-re, a kimeneti szintet pedig 500mV-ra csökkentjük, akkor a következőképpen alakul az áramfelvétel:

$$\begin{aligned} \bullet V_{outpp} &= V_{OH} - V_{OL} = 0.5V \quad (V_{OH} = 1.1V, V_{OL} = 0.6V) \end{aligned}$$

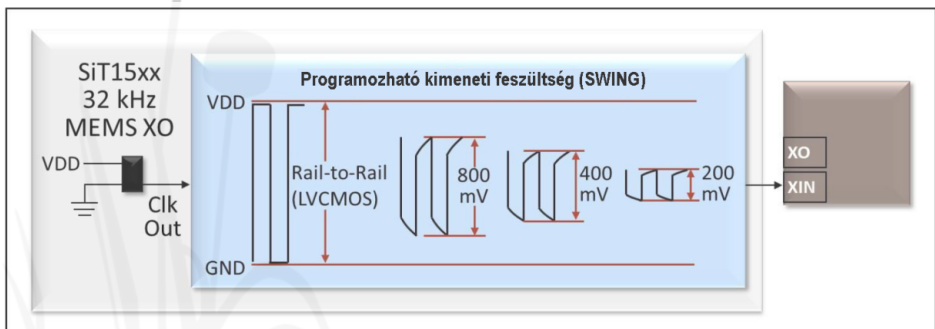
$$\begin{aligned} \text{Terhelőáram: } & (10pF)(0.5V)(10kHz) = 50nA \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bullet I_{dd} \text{ Output Driver: } & (50nA/V)(0.5V) = 25nA \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Teljes áramfelvétel} &= 750nA + 50nA + 25nA = \mathbf{825nA} \end{aligned}$$

Vezeték nélküli kommunikáció jellemzői

A manapság az IoT területén használt hordozható készülékek, a hordható okoseszközök, a kommunikálásra képes orvosi eszközök, az okos fogyasztásmérők, a környezeti paraméterek monitorozására használt vezeték nélküli szenzorok közös jellemzője, hogy valamilyen rádiófrekvenciás (RF) kommunikáció útján juttatják adataikat valamilyen felhő alapú adatbázisba. Mivel elemes táplálású áramkörökről beszélünk kézenfekvő valamilyen alacsony energiafogyasztású LAN vagy WAN



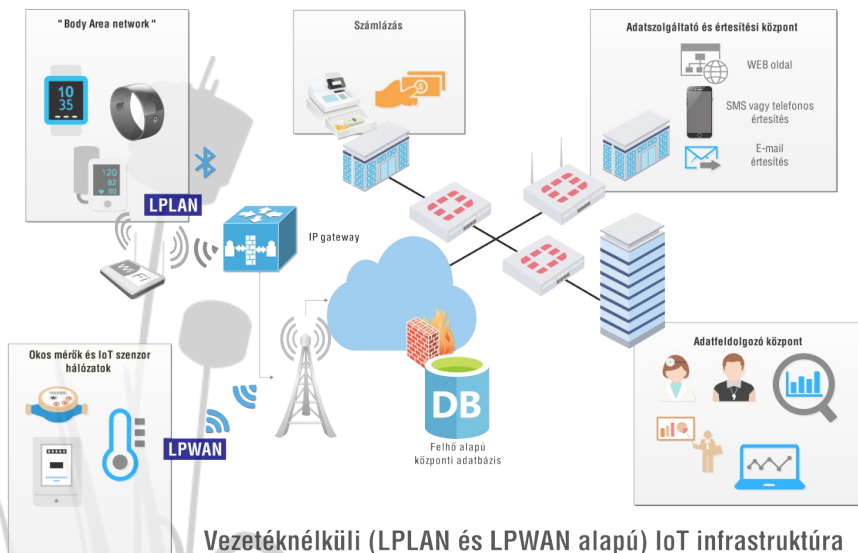
2) A SiT 15xx MEMS oszcillátor család NanoDrive™ kimeneti szint programozása 200 mV-ig, energia megtakarítási céllal

megoldás használata. LPLAN megoldásként elsősorban BLE (Bluetooth® Low Energy) vagy Zigbee, míg LPWAN megoldásként leggyakrabban LoRa, SigFox, vagy NB-IoT technológia használatos manapság.

Míndegyik vezeték nélküli kommunikációs eszköz hasonló módon ideje legnagyobb részét „tétlenül” tölti, éleszteni nagyon ritkán, az adattovábbítás idejére szükséges őket, fogyasztásuk ebben a rövid időszakban magas, azonban az aktív időszak hossza elhanyagolható az alvásban töltött időhöz képest. A hasonló jellemzők miatt az időzítés fogyasztásra gyakorolt

hatásának vizsgálatához kiragadjuk az orvoselektronikában és a viselhető testszenzorok (wearable devices) területén leggyakrabban használt Bluetooth® Low Energy (BLE), ahol ez az arány például az ismert LPWAN eszközökhöz képest rosszabb, a 2-10 mp alvási időhöz néhány ms hosszúságú ébren töltött idő társul.

Az átlagos energiafogyasztás a kitöltési tényezőtől (TON/TSLEEP) függ, mely esetünkben igen kis értékű és például ZigBee vagy más modulokkal összehasonlítva - többféle alvási időhosszt alapul véve - azoknál alacsonyabb marad.

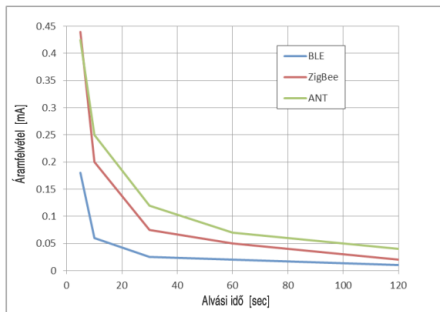


3) Szenzorhálózatok és telepes táplálású okos eszközök hálózata

Kísérletekkel igazolható, hogy bármely lokális hálózati RF modul fogyasztása az alvási idő hosszával fordítottan arányos.



4| Ciklikus aktivitás és alvó állapot, az energiafogyasztás a kitöltési tényezőtől függ (TON/TSLEEP)



5| Különböző RF átviteli technológiák áramfelvétele az alvási idő függvényében

A BLE hordozható IoT eszközökben

A tipikus vezetékmentes IoT szenzor alacsony fogyasztású 32 bitem mikrokontrollert köré épül, melyhez különböző biometrikus szenzorok, vagy egyéb fizikai mennyiségeket (nyomás, hő, mágneses tér, látható fény stb.) detektálni képes érzékelők illeszkednek. A tápellátást jellemzően valamilyen lítium elem, a külvilággal való kapcsolatot pedig egy RF front-end eszköz biztosítja.

A mikrokontroller a szenzorok adatait összegyűjtve azokat az I2C vagy UART buszon keresztül soros adatátvitellel juttatja a BLE RF front-end modulhoz és ehhez a következő órajeleket használja :

- 12 MHz – az ARM-Cortex mag és a perifériák órajelének előállításához, jellemző pontossági elvárás: +/- 30 ppm min. 0 és 70°C hőmérséklettartományon

- 32.768 kHz – A valós idejű óra (RTC) és a Watch-dog funkcióhoz, jellemző pontossági elvárás: 200 ppm min. 0 és 70°C hőmérséklettartományon

A BLE front-end a Bluetooth 4.0 PHY és a BLE link rétegeket implementálja (a befoglalt GATT réteg profiljai : hőmérséklet mérés, biometrikus mérések) és a következő órajeleket igényli :

- 24 MHz – alapsávi és 2.5GHz szintézis, jellemző pontossági elvárás: +/- 20 ppm min. 0 és 70°C hőmérséklettartományon

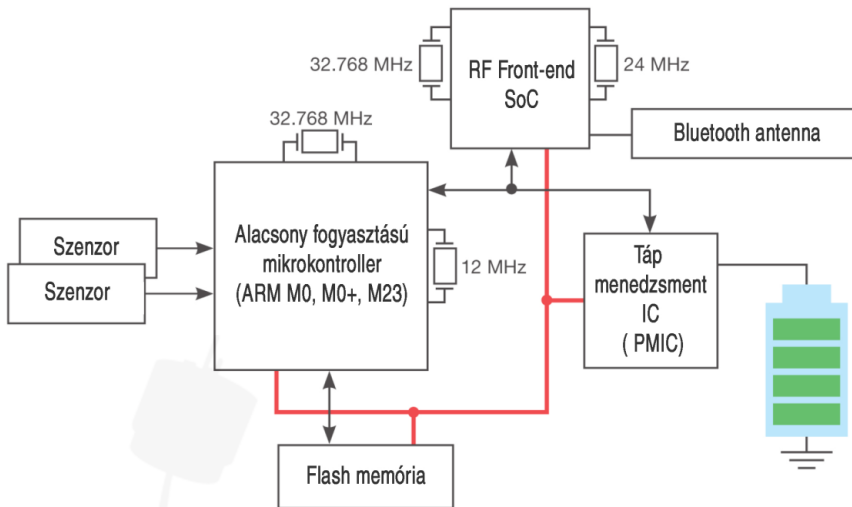
- 32.768 kHz – Alvó állapotú valós idejű óra (RTC), jellemző pontossági elvárás: 200 ppm min. 0 és 70°C hőmérséklettartományon

Kísérleti úton igazolt tény, hogy egy BlueTooth LE modul fogyasztása – csakúgy mint a mikrokontroller fogyasztása - fordítottan arányos annak

„alvásban töltött” idejével, és az ebben az állapotban az időzítést biztosító 32,768 kHz-es valósídejű óra (RTC) pontossága (SCA – Sleep Clock Accuracy) közvetlen hatással van az elem élettartamára. Ennek igazolásához meg kell ismernünk eszközünk „slave” módban működő BLE modemjének és a párba állított „master” eszköz (BT-IP gateway) kapcsolódási metódusát.

A BLE slave és master eszközök között a következő paraméterek kerülnek kicserélésre kapcsolódás közben :

1. Kapcsolódási intervallum („sleep time”) pl. 2 sec
2. Az alvási késleltetés mutatja majd, hogy hányszorosra növeljük az alvásidőt : $N=3$ esetén a fenti példában 6 sec ($N<500$)



6| Bluetooth Low Energy alapú elemes táplálású IoT eszköz blokkdiagramja

A BT standard szerint a kapcsolódások közti szünet („sleep time” = „connection interval”) a 7.5 ms – 4s sávba esik, míg a bekapcsolt állapotban (adatforgalmazásban) töltött idő 0.08ms – 1.3 ms.

3. Timeout: amennyiben ezen időn belül nem érkezik válasz a párosított slave eszköztől, a master bontja a kapcsolatot.

A BT LINK réteg (Link Layer) üzenetváltásakor - minden kapcsolódási eseménykor - a master eszköz alvási RTC óra pontossága (SCA) átadásra

kerül, és a slave eszköz a saját alvó állapotbeli valósidejű órájának pontossága ismeretében határozza meg mikor is kell felébrednie. Az időzítésbeli pontatlanságok a slave ébredésének rossz időzítéséhez vezethetnek, az esetlegesen korábban éled, mint ahogy a master az adatcsomagokat küldeni szeretné. Ez az időeltérés hosszabb „ON” állapotot eredményez ami végső soron emelkedő fogyasztáshoz vezet. Az RX ablak megnövekedett szélessége a slave és master alvási RTC pontosságától függ (SCA) tehát:

$$\Delta T_{RX} = (SCA_{master} + SCA_{slave}) * 10^{-5} * \Delta T_{connection}$$

ahol

ΔT_{RX} : RX szélesebb időablaka

$\Delta T_{connection}$: az utolsó kapcsolódási időintervallum

SCA_{master} ; SCA_{slave} : az vonatkozó 32.768 kHz-es RTC pontossága

A tervezőmérnök a master eszköz (BT-IP router) Bluetooth moduljának időzítését

nem tudja befolyásolni, ezért az egyetlen lehetőség a ΔT_{RX} csökkentésére a slave RTC kristályrezonátorának egy pontosabb eszközre való cseréje.

A 32.768 kHz kristályt egy MEMS alapú 32.768 kHz-s TCXO (pl. SiTime SiT1552) való kiváltásával a 30 ppm pontosság 5 ppm-re növekszik. Mivel az IoT eszközben az energiatakarékos mikrokontroller csak néhány milliszekundum időtartamú időszakokra kapcsol be, az „ON” állapotban a legnagyobb fogyasztás a BLE RF front-end modul miatt keletkezik.

A táblázatban jól látható, hogy 20 sec alvási időt feltételezve SCA = 5 ppm és SCA= 200 ppm órahibák mellett a BLE modul tétlen vételi várakozásban töltött ideje (RX impulzus szélessége) negyvenszeres különbséget mutat.

A fogyasztásban ez a következőképpen jelentkezik:

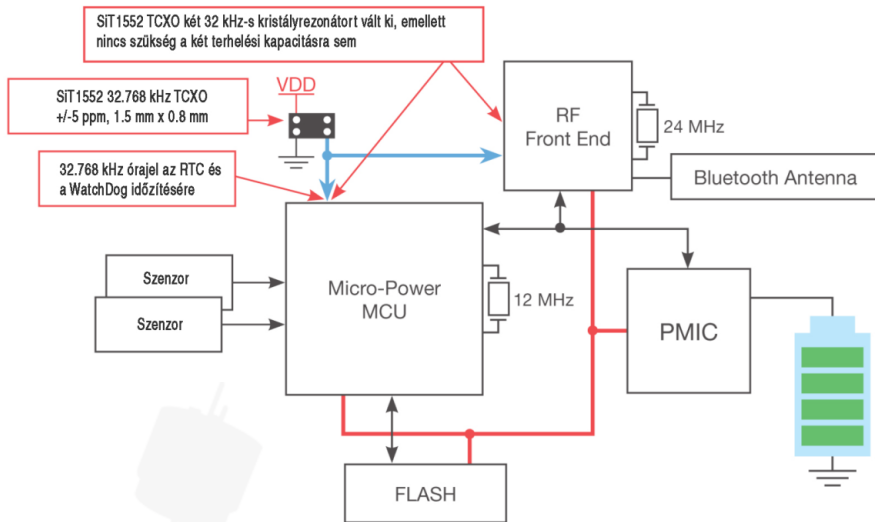
$$P_2/P_1 = (TON + \Delta T_{RX1}) / (TON + \Delta T_{RX2}) = 2.26$$

Sleep Clock Accuracy (SCA)	Alvási idő = 2 sec	Alvási idő = 20 sec	Alvási idő = 50 sec
	Korai bekapcsolás ΔT_{RX}		
5 ppm	0.01 ms	0.1 ms	0.25 ms
50 ppm	0.10 ms	1.0 ms	2.50 ms
70 ppm	0.14 ms	1.4 ms	3.50 ms
200 ppm	0.40 ms	4.0 ms	10.0 ms

8| Az SCA hatása a korai ébredés csökkentésére

Az összefüggésből több, mint kétszeres elem élettartam következik, ha a 32.768 kHz-es kristályrezonátort egy kis méretű (1.5x0.8mm) SiTime SiT1552, a -40 .. + 85 °C-os teljes működési hőmérséklettartományon +/- 5 ppm pontosságú MEMS TCXO-ra cseréljük. A MEMS oszcillátor alkalmas több CMOS terhelés vezérlésére is, és

nemcsak a nagyméretű BLE alvó RTC kristályt váltja ki, hanem az illesztéshez szükséges terhelési kapacitásokat is feleslegessé teszi, ezzel jelentős helyet takarít meg a NYÁK lemezen, amellett, hogy az alvó állapotbeli fogyasztást, amely az elem számára a legkritikusabb terhelés, a felére csökkenti.



9| BLE kommunikációval rendelkező IoT eszköz optimalizált architektúra, MEMS oszcillátor használatával