

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék

SZAKDOLGOZAT

Rádiókommunikációs egység fejlesztése
oktatási célra

Készítette:

Takács Péter

Konzulens:

Varga Lajos
BME-HVT

Budapest, 2012

Köszönetnyilvánítás

Elsősorban szeretnék köszönetet mondani konzulensemek, Varga Lajosnak a rengeteg segítségért és hogy bármikor fordulhattam hozzá a kérdéseimmel.

Köszönnettel tartozom még Szombathy Csabának és Kollár Zsoltnak a hasznos tanácsokért és Vécsi Sándornak a forrasztásban nyújtott segítségéért.

Továbbá köszönöm Gondár Flórának a szakdolgozat nyelvi megformálásában nyújtott segítséget.

Hallgatói nyilatkozat

Alulírott Takács Péter, szigorló hallgató kijelentem, hogy ezt a szakdolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, csak a megadott forrásokat (szakirodalom, eszközök stb.) használtam fel. minden olyan részt, melyet szó szerint, vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Hozzájárulok, hogy a jelen munkám alapadatait (szerző(k), cím, angol és magyar nyelvű tartalmi kivonat, készítés éve, konzulens(ek) neve) a BME VIK nyilvánosan hozzáférhető elektronikus formában, a munka teljes szövegét pedig az egyetem belső hálózatán keresztül (vagy hitelesített felhasználók számára) közzétegye. Kijelentem, hogy a benyújtott munka és annak elektronikus verziója megegyezik. Dékáni engedéllyel titkosított diplomatervezet esetén a dolgozat szövege csak 3 év eltelte után válik hozzáférhetővé.

Budapest, 2012. december 7.

Takács Péter

Szakdolgozat feladat

Takács Péter

szigorló villamosmérnök hallgató részére

Rádiókommunikációs egység fejlesztése oktatási célra

A hallgató feladata egy oktatási célú moduláris eszköz kialakítása kommunikáció vizsgálatának céljára. A modulnak számítógéptől kapott digitális adatokat kell rádiófrekvencián kisugároznia.

A modul oktatási demonstrációs eszköznek készül, távlati cél a modul felhasználása szakirányos vagy egyéb hallgatói laboratóriumi vizsgálatokban a tanszéken.

Az elkészített modullal a hallgatók megvizsgálhatják a vezeték nélküli kommunikációs eszközök alapvető kiépítését, valamint akár egy egyszerű rádiókommunikációs protokoll működését.

A kommunikációs modul kialakításának feladata az alábbi fő elemekből épül fel:

- Rádiókommunikációs hardver kialakítása: kis fogyasztású, olcsó, bővíthető hardver, beágyazott vezérléssel, robosztus kivitelben.
- Rádiókommunikációs szoftver kialakítása: a hardver működését felügyelő és vezérlő beágyazott szoftver kialakítása, alapvető rádiókommunikációs funkciók biztosítása.

A hallgató szakdolgozatának a következőkre kell kiterjednie:

- Elemezze a modul kialakításához használható megoldásokat, válassza ki a feladatra legalkalmasabb megoldást.
- Készítsen egyszerű kommunikációs hardvert a vezeték nélküli kommunikáció vizsgálatára (vivőfrekvencia 433 MHz, FSK, 1200 bit/másodperc)
- Készítsen beágyazott vezérlőprogramot C programozási nyelven, amellyel a vezeték nélküli kommunikáció számítógépről is vezérelhető.
- Mutassa be a működő vezeték nélküli kommunikációs egységet.

Tanszéki konzulens: Varga Lajos doktorandusz

Külső konzulens: –

Budapest, 2012.10.03

Dr. Nagy Lajos
egyetemi tanár
tanszékvezető

Tartalomjegyzék

Ábrák jegyzéke	7
Táblázatok jegyzéke	8
Kivonat	9
Abstract	10
1. Bevezetés	11
1.1. Áttekintés	11
1.2. A fejlesztés menete	12
2. Rendszerleírás	13
2.1. A rendszer felépítése	13
2.2. A rádiókommunikációs modul felépítése	14
3. Hardver	18
3.1. A hardvertervezés előzetes megfontolásai	18
3.1.1. Az áramköri elemek kiválasztása	18
3.2. Hardvertervezés, hardverépítés	22
3.2.1. Energiaellátó rendszer	24
3.2.2. Mikrovezérlő	24
3.2.3. Rádiós adó-vevő áramkör	25
3.2.4. Soros port illesztő	30
3.2.5. Hardvertervezési tapasztalatok	32
3.3. A hardver felépítése	33
4. Szoftver	35
4.1. Soros kommunikáció	35
4.1.1. UART	35
4.1.2. SPI	36
4.2. Moduláció	38
4.3. A rádiós adatcsomag felépítése	41
4.3.1. Bitszinkron felépítése	42
4.3.2. Bázis szinkron felépítése	42
4.3.3. Hibadetektálás	43

4.4. Adatátviteli folyamat	43
5. Tesztek, mérések	48
5.1. Hardver tesztek	48
5.1.1. Energiaellátó rendszer tesztelése	48
5.1.2. Fogyasztás mérése	49
5.2. Rádiófrekvenciás tesztek	51
5.2.1. Mérési környezet	51
5.2.2. Lesugárzott teljesítmény mérése összehasonlító módszerrel	55
5.2.3. Csomaghiba-arány	56
5.2.4. Vevő érzékenység	57
6. Összefoglalás	59
6.1. A fejlesztés értékelése	59
6.2. Továbbfejlesztési lehetőségek, távlati célok	60
7. Függelék	61
7.1. Az ISM sáv csatornakiosztása Magyarországon	61
7.2. CRC generátor-polinomok	61
7.3. A soros kommunikáció kezelőszoftvere	62
7.4. Soros jelszintillesztő kapcsolási rajza	63
7.5. Rádiókommunikációs modul kapcsolási rajza	64
Rövidítések jegyzéke	65
Irodalomjegyzék	66

Ábrák jegyzéke

1.	Az adatátviteli állomás felépítése	13
2.	A rádiókommunikációs modul felépítése	14
3.	A nyomtatott áramkör vezető rétegei	24
4.	Az aluláteresztő szűrő kapcsolási rajza	26
5.	Spektrumanalizátor	27
6.	A szűrő teljesítményviszonyai	28
7.	A felüláteresztő szűrő kapcsolási rajza	29
8.	A soros adatátvitel folyamata	31
9.	A vasalásos technika lépései	33
10.	A rádiókommunikációs modul hardware	34
11.	UART adatstruktúra	36
12.	SPI kommunikáció	37
13.	Az SPI kommunikáció vezérlő órajele	38
14.	OOK moduláció	39
15.	FSK moduláció	40
16.	FSK és GFSK moduláció	41
17.	Rádiós adatcsomag	41
18.	A szoftveres működési folyamat vázlata	45
19.	A rádiós kommunikáció folyamata	46
20.	A soros kommunikáció folyamata	47
21.	Fogyasztás mérés	49
22.	Monopól antenna elektromágneses tere	51
23.	Gyári monopól antenna	52
24.	A méréshez használt monopól antenna	52
25.	Szakaszcsillapítás	54
26.	A mérési környezet hullámterjedési viszonyai	55
27.	A lesugárzott teljesítmény mérés mérési elrendezése	56
28.	A csomaghiba-arány mérés mérési elrendezése	57
29.	Csomaghiba-arány	58
30.	A soros kommunikáció kezelőszoftverének felülete	62
31.	A soros jelszintillesztő kapcsolási rajza	63
32.	Kapcsolási rajz	64

Táblázatok jegyzéke

1.	Feszültségcsökkentő áramkörök hatásfokai	16
2.	Kapcsolóüzemű feszültségcsökkentő átalakítók adatai	18
3.	Az Si4420 és Si4432 összehasonlítása	22
4.	Az aluláteresztő szűrő paraméterei	29
5.	A felüláteresztő szűrő paraméterei	30
6.	Az RS-232-es szabvány feszültségszintjei	31
7.	Soros vezérlőparancsok	45
8.	Az energiaellátó rendszer alsó működési feszültséghatára	48
9.	Az energiaellátó rendszer műterheléses tesztjének eredményei	49
10.	A rádiókommunikációs modul fogyasztási adatai	50
11.	A soros jelszintillesztő fogyasztási adatai	50
12.	A monopól antennák adatai	52
13.	Lesugárzott teljesítménymérés eredményei	56
14.	Az ISM frekvenciasávok kiosztása	61
15.	CRC generátor-polinomok	61

Kivonat

Szakdolgozatom feladata egy olyan kis hatótávolságú vezeték nélküli adatátviteli eszköz fejlesztése, amelyen bemutathatók a rádiós adatkommunikáció alapjai.

A szakdolgozat első részében ismertetem az adatátviteli rendszert, a rádiókommunikációs modul felépítését és vázlatos működését.

A következő fejezetben bemutatom a hardvertervezés lépéseiit, a megfelelő áramköri elemek kiválasztásának szempontjait, ismertetem a rádiókommunikációs modul fő egységeinek kapcsolási rajzát és felépítését, valamint a nagyfrekvenciás szűrőáramkörök illesztésének folyamatát és a soros kommunikációhoz szükséges jelszintillesztő áramkör működését.

Bemutatom az UART és az SPI kommunikációt, a modulációs módokat, a rádiós adatcsomag felépítését és a rádiós adatkommunikáció folyamatát. Ismertetem a rádiókommunikációs modul tesztelési eljárásait, a tesztkörnyezetet és a teszteredményeket.

A szakdolgozat végén összegzem a fejlesztési munka eredményét és a továbbfejlesztési lehetőségeket.

Abstract

My thesis is the development of a short-range wireless communication device, which may be used to showcase basic features of radio communication systems.

In the first part of the thesis I present the data communication system, the layout of the radio communication module and I also give an outline of the operation of the module.

The following section describes the hardware design procedure, with the selection criteria of the circuit components. I present the structure and circuit diagram of the main units of the radio communication module. The process of matching the high-frequency filter circuits and the signal interface required for serial communication circuit operation are also introduced.

I present the UART and the SPI communication protocols, digital RF modulation modes, the radio packet structure and the radio data communication process. I present the testing procedures applied on the radio communication module and the test environment, with results of the tests also given.

At the end of thesis, I summarize the results of the development work and introduce the possible directions of further development.

1. Bevezetés

1.1. Áttekintés

Napjainkban a vezeték nélküli adatátviteli eszközök jelentősége folyamatosan növekszik. Vezeték nélküli technológiát használnak a mobiltelefonok, a WiFi¹-s, Bluetooth²-os eszközök, RFID beléptető rendszerek, de a rádiós technológia elvén működik a gépjárművek távnyitós kulcsa és a távirányítós autó is.

A vezeték nélküli technológia egyik előnye, hogy az adatátvitelhez nincs szükség fizikai összeköttetésre az eszközök között (a jelek elektromágneses hullámok formájában, a levegőben terjednek), ezáltal nagyobb mobilitást biztosítva a vezetékes megoldásokkal szemben. További előny, hogy a rádiós összeköttetéssel ugyanolyan teljesítményviszonyok mellett nagyobb távolságok hidalhatók át [1].

A rádiós eszközöknek az előző bekezdésben sorolt előnyei mellett hátrányai is vannak. Például a térben egymáshoz közel elhelyezkedő, azonos frekvencián sugárzó készülékek által kisugárzott elektromágneses hullámok zavarják egymást (frekvenciaütközés), ez jelentősen lerontja a rádiós viszonyokat, ami a kapcsolat megszakadásához vezethet.

Az általam kifejlesztett kis hatótávolságú vezeték nélküli adatátviteli eszköz (SRD) célja, hogy rádiós adatátvitelt valósítson meg két személyi számítógép között néhányszor 10 méteres távolságban. A rádiókommunikációs modul oktatási célra készül, érdemes a rendszert úgy kialakítani, hogy személyi számítógép segítségével lehessen vezérelni. Ennek révén a rádiós beállítások (moduláció típusa, adatsebesség, rádiós adatcsomag szerkeze, stb.) megváltoztatásához nincs szükség a rádiókommunikációs modulon futó beágyazott szoftver megváltoztatására. További előnye, hogy a rádiós beállításokat gyorsan módosíthatjuk, így a különböző adatátviteli teszteket több rádiós beállítás mellett is „gyorsan” elvégezhetjük összehasonlítás céljából.

A rádiókommunikációs modul a hatósági engedély nélkül használható ISM³ sávban üzemel (az adási és vételi frekvencia egyaránt 433 MHz). Az ISM sávok kiosztását a Nemzeti Média és Hírközlési Hatóság (NMHH) határozza meg és teszi közzé honlapján. Az NMHH a frekvencián kívül a kisugárzott adóteljesítményt, sávszélességet és az adás kitöltési tényezőjét is szabályozza. A Nemzeti Média és Hírközlési Hatóság által meghatározott ISM frekvenciasávokat a Függelék 7.1. szakasza tartalmazza.

Szakdolgozatomban bemutatom a rádiókommunikációs modul felépítését, a felhasznált

¹Vezeték nélküli, adatkommunikációt megvalósító hálózati technológia.

²Az Ericsson által kifejlesztett kis hatótávolságú rádiós adatátviteli technológia.

³Industrial, Scientific and Medical radio bands. Ipari, tudományos és orvosi felhasználású frekvenciasávok.

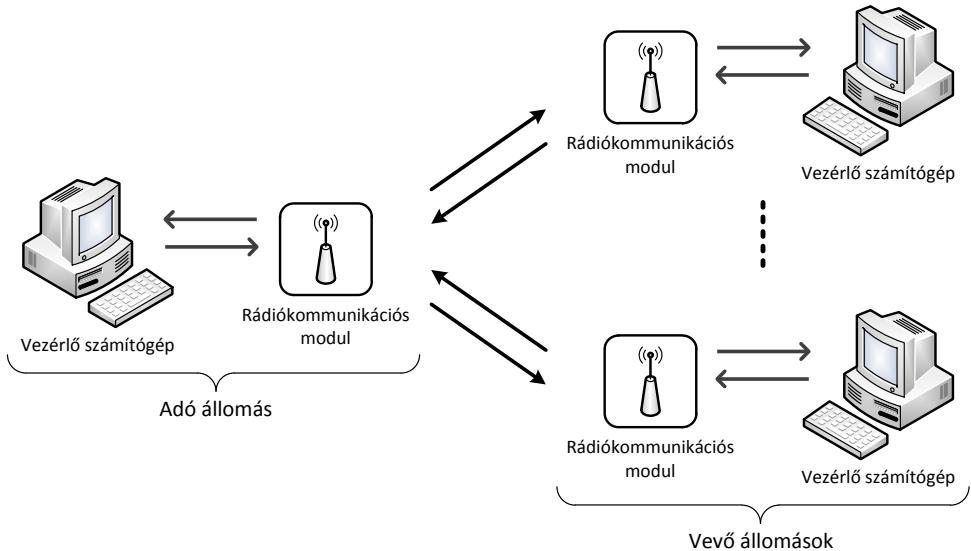
áramköri elemeket és főbb tulajdonságaikat, a hardvertervezés lépései és a mikrovezérlőn futó beágyazott szoftver működését. Ismertetem a rádiós adó-vevő áramkör működési paramétereit, a rádiókommunikációs modul és a személyi számítógép közti kommunikáció folyamatát és a vezérlő parancsokat. Bemutatom a fejlesztés során elvégzett teszteket és a tesztkörnyezetet, kiértékelem a mérési eredményeket. A szakdolgozat végén értékelem a fejlesztést és bemutatom a továbbfejlesztési lehetőségeket.

1.2. A fejlesztés menete

A rádiókommunikációs modul fejlesztését 2012 tavaszán kezdtem az *Önálló Laboratorium* (BMEVIHVA346) tantárgy keretében. Korábban nem terveztem még hasonló áramkört, ezért a munkát irodalomkutatással és a vonatkozó adatlapok tanulmányozásával kezdtem. Az elméleti háttér elsajátítása után kiválasztottam a feladatra legmegfelelőbb áramköri elemeket és számítógépes szoftver segítségével megterveztem a nyomtatott áramkört (nyák). A hardver megépítése után a fejlesztést a beágyazott szoftver írásával folytattam. A szoftver fejlesztése és a vonatkozó adatlapok további tanulmányozása során felmerülő hardvertervezési hibákat rendre kijavítottam, a kapcsolódó tapasztalatokat később ismertetem. A fejlesztési munka végén több, a hardverre és rádiós adatátvitelre vonatkozó tesztet is elvégeztem, a tesztelési eljárásokat és a mérési eredményeket az 5. fejezet tartalmazza.

2. Rendszerleírás

2.1. A rendszer felépítése



1. ÁBRA. Az adatátviteli állomás felépítése:
vezérlő számítógép, rádiókommunikációs modul.

Az adatátviteli rendszer felépítése az 1. ábrán látható.

Minden állomás két fő részre osztható: vezérlő számítógépre és rádiókommunikációs modulra. Vezérlő számítógép lehet bármilyen eszköz, amely képes soros porton adatot küldeni és fogadni. A fejlesztés során hordozható számítógépet használtam. Az újabb típusú hordozható számítógépek már nincsenek felszerelve soros porttal, ezt a hiányosságot a hordozható számítógépre feltelepített megfelelő eszközmeghajtó (driver) és egy USB-soros port átalakítóval küszöböltettem ki. A soros adatkommunikációhoz a *Terminal* nevű ingyenes szoftvert használtam (Függelék 7.3. szakasz).

A rádiókommunikációs modul kétféle adatkommunikációt valósít meg: a vezérlő számítógéptől érkező soros adatcsomagokat feldolgozza, az adatcsomag tartalma szerint lekérdezi vagy módosítja a rádiós beállításokat, vagy rádiósan kisugározza az adatcsomag hasznos részét. Ha rádiós adatcsomag érkezett, a rádiókommunikációs modul ellenőrzi, hogy az átvitel hibátlan volt-e, amennyiben igen, az adatot soros porton keresztül elküldi a vezérlő számítógépnek.

Állomásból nem csak kettőt működtethetünk egyszerre. Elméletileg végtelen egymással kommunikáló rendszer egyidejű működtetése lehetséges. Ebben az esetben az állomások megkülönböztetése céljából fizikai címeket kell rendelnünk az egyes rádiókommunikációs

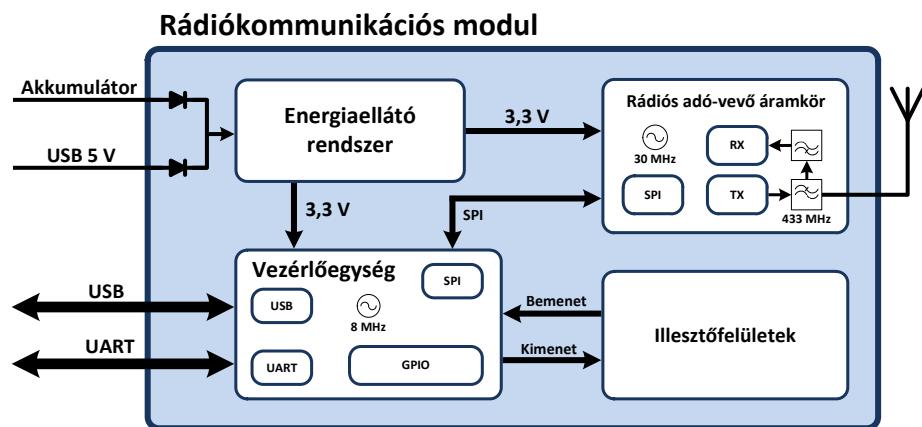
modulokhoz, hogy el tudják dönteni, nekik szól-e az adott rádiós üzenet. Minél több azonos frekvencián kommunikáló rádiókommunikációs modult üzemeltetünk egyszerre, annál nagyobb az esélye, hogy a rádiókommunikációs modulok egy időben akarnak rádiós adatot küldeni, ez frekvenciaütközést okoz, ami az adatátviteli jellemzők leromlásához, rosszabb esetben az adatkapcsolat megszűnéséhez vezethet.

A frekvenciaütközés elkerülésére két lehetőségünk van:

- Olyan rádiós protokoll alkalmazása, amely nem engedi, hogy két állomás egy időben sugározzon.
- Olyan továbbfejlesztett modulációs mód használata, amely kevésbé érzékeny a frekvenciaütközésre. Például: FHSS⁴ vagy DSSS⁵.

A fejlesztés alatt csak két rádiókommunikációs modult használtam, így frekvenciaütközés a két rádiókommunikációs modul között nem alakulhatott ki. Ha a későbbiekben több rádiókommunikációs modult is alkalmazunk egyszerre, akkor szükségünk lesz valamelyik fenti módszer használatára.

2.2. A rádiókommunikációs modul felépítése



2. ÁBRA. A rádiókommunikációs modul fő egységei:
energiaellátó rendszer, vezérlőegység, rádiós adó-vevő áramkör,
illesztőfelületek.

A rádiókommunikációs modul felépítése a 2. ábrán látható. A rádiókommunikációs modul négy fő egységből áll: energiaellátó rendszer, vezérlőegység, a digitális adatjelek

⁴Működése: a vivőjel frekvenciája gyorsan változik, a jel kevésbé érzékeny a keskenysávú zajokra.

⁵Működése: a jelet modulálják (beszorozzák) egy véletlen kóddal, így a jel spektruma „szétkenődik”, a jelet csak a kód ismeretében lehet demodulálni.

rádiófrekvenciás jellé való átalakításáért felelős rádiós adó-vevő áramkör, illesztőfelületek. A továbbiakban ezen fő egységeket ismertetem.

Energiaellátó rendszer. Az energiaellátó rendszer feladata a működési feszültség biztosítása a rádiókommunikációs modul fő egységeinek.

A rádiókommunikációs modul energiaellátására három lehetőségünk van:

- USB csatlakozón keresztül.
- Akkumulátorral, két érintkezős, egy rászter (254 mm) távolságú tüskesor csatlakozón keresztül.
- PICkit 3⁶ programozó áramkörrel (amely szintén a számítógép USB portját használja), hat érintkezős, egy rászteres tüskesoron keresztül.

Az első esetben stabilizált 5 V-ot tudunk biztosítani a rádiókommunikációs modulnak. A második esetben figyelembe kell vennünk az energiaellátó rendszer bemeneti feszült ségtartományát és ennek alapján megválasztani, hogy mekkora feszültségű akkumulátorral tápláljuk meg a rádiókommunikációs modult. A harmadik megoldásnál számítógépen szoftveresen beállítható a PICkit 3 kimenő feszültségének értéke [2]. A harmadik megoldást csak a szoftverfejlesztés ideje alatt alkalmaztam, később minden USB csatlakozón keresztül oldottam meg az energiaellátást. Az akkumulátoros tápellátás lehetősége másodlagos, abban az esetben célszerű alkalmazni, ha nincs kéznél USB-miniUSB csatlakozós kábel, vagy a vezérlő számítógép nem rendelkezik USB kimenettel, vagy autonóm üzemben (később).

Az energiaellátó rendszer tervezésekor figyelembe kell venni a rádiókommunikációs modul fő egységeinek működési feszültségeit. A vezérlőegység és a rádiós adó-vevő áramkör egyaránt 3,3 V bemeneti feszültséggel működik [3, 4]. A vezérlő számítógép USB portja 5 V feszültséget biztosít maximum 500 mA áramerősség mellett, ez 2,5 W teljesítményt jelent. A céлом az, hogy minél kisebb energiaveszteséggel alakítsam át az 5 V-os feszültséget a megfelelő 3,3 V-ra. minden esetben fennáll a teljesítményre az alábbi összefüggés:

$$P = U \cdot I, \quad (1)$$

ahol P a teljesítmény, U a feszültség, I az áramerősség.

A tápfeszültség biztosításához szükségünk van egy feszültségszabályozó áramkörre, melynek kimenő feszültsége 3,3 V. Ilyen áramkör lehet egy lineáris feszültségstabilizátor, ami az 5 V-ról 3,3 V-ra történő transzformálás során a feszültségkülönbséghez tartozó

⁶Programozó és hibakereső a Microchip mikrovezérlőihez.

teljesítményt eldisszipálja, vagy egy jobb hatásfokú kapcsolóüzemű feszültségcsökkentő átalakító (Step-Down Converter). A hatásfokot a következő egyenletből számolhatjuk ki:

$$\eta = \frac{E_h}{E_b}, \quad (2)$$

ahol η a hatásfok, E_h a hasznos energia, E_b a befektetett energia.

Az 1. táblázat a két feszültségszabályozó áramkör feszültség–teljesítmény–hatásfok viszonyait mutatja 500 mA áramerősség mellett. A táblázatban feltüntetett teljesítmény és hatásfokértékek alapján a választás egyértelműen a kapcsolóüzemű feszültségcsökkentő átalakítóra esett.

	Bemenő feszültség	Kimenő feszültség	Bemenő teljesítmény	Kimenő teljesítmény	Hatásfok
Lineáris feszültségstabilizátor	5 V	3,3 V	2,5 W	1,65 W	66 %
Kapcsolóüzemű feszültségcsökkentő átalakító	5 V	3,3 V	2,5 W	2,25-2,375 W	90-95 %

1. TÁBLÁZAT. Két feszültségcsökkentő áramkör feszültség–teljesítmény–hatásfok viszonya 500 mA áramerősség mellett [5].

A rádiókommunikációs modul energiaigénye alacsonyabb minden eset kimenő teljesítményénél, azonban a rendszert úgy terveztem, hogy további egységeket is csatlakoztathattunk hozzá. Ezeknek az egységeknek a fogyasztása előzetesen nem ismert, ezért célszerű, hogy minél nagyobb hatásfokú legyen a teljesítmény átalakítása.

A rádiókommunikációs modul energafogyasztására vonatkozó adatok a következők:

- Energiaellátó rendszer: körülbelül 6,6 mW [5].
- Vezérlőegység: körülbelül 66 mW 40 MHz-es belső órajel frekvencián [3].
- Rádiós adó-vevő áramkör: körülbelül 280 mW, ha a rádiós adás teljesítménye +20 dBm [4].

Az energiaellátó rendszer részletes működésének leírása a 3.2.1. fejezetben található. Az energafogyasztásra vonatkozó mérési eredményeket az 5.1.2. fejezet tartalmazza. A mérési eredmények összhangban vannak az előzetesen számolt adatokkal. A csekély eltérés lehetséges oka, hogy a fogyasztás számításakor a nyomtatott áramkörön található passzív elemek veszteségét elhanyagoltam.

Vezérlőegység. A vezérlőegység feladata soros kommunikáció kialakítása a vezérlő számítógéppel és a rádiós adó-vevő áramkörrel. A rádiókommunikációs modul a vezérlő számítógéphez univerzális aszinkron soros adó-vevő (UART) protokollon keresztül csatlakozik, míg a rádiós adó-vevő áramkörrel soros perifériaillesztő (SPI) protokollon keresztül kommunikál. A vezérlőegység választásának főbb elveit és a vezérlőegység tulajdonságait a 3.1.1. fejezetben tárgyalom részletesebben.

Rádiós adó-vevő áramkör. Ahhoz, hogy a rádiókommunikációs modul képes legyen rádiófrekvencián adatot küldeni és fogadni, szükség van egy rádiós adó-vevő áramkörre. A rádiós adó-vevő áramkör feladata, hogy a vezérlőegységtől érkező soros adatokat feldolgozza, a megfelelő fejlécek hozzáadásával felépítse a rádiós adatcsomagot, majd a beállított rádiós paraméterek függvényében modulálja, felkeverje a kiválasztott frekvenciára és kiszágorozza azt. A vételi oldalon a rádiós adó-vevő áramkör a rádiófrekvenciás jeleket lekeveri középfrekvenciára, demodulálja, majd a vett digitális csomagot soros porton továbbküldi a vezérlőegységnek feldolgozásra.

Illesztőfelületek. A hardver bővíthetőségének érdekében a következő illesztőfelületeket terveztem a nyomtatott áramkörre:

- UART csatlakozó.
- SPI csatlakozó.
- A rádiós adó-vevő áramkör digitális ki- és bemeneti (GPIO) lábairól kivezetett csatlakozási pontok.
- A vezérlőegység jelenleg nem használt lábainak tüskesorra kivezetett csatlakozója.

3. Hardver

3.1. A hardvertervezés előzetes megfontolásai

Minden rádiókommunikációs modul két fő funkciót lát el: kommunikál a vezérlő számítógéppel, rádiófrekvenciás adatkommunikációt épít ki egy másik állomással. Azt, hogy a rádiókommunikációs modul éppen melyik feladatot hajtja végre, a vezérlőegységén futó szoftver dönti el.

Az előző bekezdésben írtak alapján célszerű a rádiókommunikációs modulokat meggyező hardverrel megvalósítani, mert ez csökkenti a gyártási költségeket és a fejlesztési munka mennyiségét. Továbbá a hardver méretének csökkentése érdekében célszerű olyan nagy integráltságú rádiós adó-vevő áramkört (IC) választani, melyen a rádiós beállítások könnyedén megváltoztathatók.

3.1.1. Az áramköri elemek kiválasztása

A tervezés első lépéseként ki kell választanunk a megfelelő áramköri elemeket. Az áramköri elemeket célszerű még a hardvertervezési fázisban beszerezni, mert így a nyomtatott áramkör gyártása előtt kinyomtatott nyákterven ellenőrizhetjük, hogy az alkatrészlenyomatok (footprintek) illeszkednek-e a papíron található alkatrészlenyomatokra.

A rádiókommunikációs modul méretének csökkentése érdekében felületszerelt alkatrészeket (SMD) használtam, de nem minden esetben a legkisebb méret elérésére törekedtem, inkább az alkatrész árat és beszerezhetőségét vettet figyelembe.

Kapcsolóüzemű feszültségcsökkentő átalakító. Fő szempontok az alkatrészválasztás során: a jó hatásfok, a megbízhatóság és a kedvező ár. A 2.2. fejezetben írtak alapján két kapcsolóüzemű feszültségcsökkentő átalakítóra esett a választásom. A két áramköri elem tulajdonságait a 2. táblázat tartalmazza.

	MP2359	MCP16301
Bemeneti feszültség	4,5–24 V	4,0–30 V
Kimeneti feszültség	0,81–15 V	2,0–15 V
Maximális kimenő áram	1,2 A	600 mA
Kapcsolási frekvencia	1,4 MHz	500 kHz
Hatásfok	92 %	96 %
Ár	395 Ft	355 Ft

2. TÁBLÁZAT. Kapcsolóüzemű feszültségcsökkentő átalakítók adatai [5, 6].

Az áramkörök összehasonlítása után látható, hogy tulajdonságaik csak két paraméterben térnek el jelentősen egymástól (maximális kimenő áram, kapcsolási sebesség). A rendszer maximális áramfelvétel 600 mA alatt van (lásd: 5.1.2.), valamint az USB porton keresztül is csak maximum 500 mA vehető fel. A másik különbség, hogy a kapcsolási frekvencia 500 kHz, de ez is megfelel a feladatnak. Tehát a tulajdonságok alapján minden két alkatrész megfelel a célnak, mégis az MCP16301-est választottam a bemeneti feszültség-tartomány alacsonyabb alsó határa és a jobb hatásfok miatt. Ha a modult négy darab, teljesen feltöltött, sorba kapcsolt 1,2 V névleges feszültségű akkumulátorról⁷ tápláljuk, akkor a 3.2.1. bekezdésben ismertetett dióda nyitófeszültségét levonva, a tápegység bemenő feszültsége 5,4 V lesz. Az akkumulátorok merülése során a bemenő feszültség 4,5 V alá csökkenhet, ez pedig már kívül esik az MP2359 alsó bemeneti feszültséghatárán. Az energiaellátó rendszerre vonatkozó méréseket az 5.1.1. bekezdés tartalmazza.

Vezérlőegység. A vezérlőegységnek a következő funkciókat kell ellátnia:

- UART kommunikáció,
- SPI kommunikáció,
- a rádiós adó-vevő áramkör vezérlése,
- adatgyűjtés, adatfeldolgozás, adattárolás.

A felsorolt funkciók ellátására több hardvertípus is alkalmas. Röviden ismertetem a lehetséges hardvereket.

Az egyik lehetséges megoldás a felhasználó által programozható kapumátrix (FPGA). Az FPGA-k olyan félvezető eszközök, melyek programozható logikai komponenseket és programozható összeköttetéseket tartalmaznak, ezáltal létrehozhatók különböző integrált áramkörök és huzalozások. Az FPGA-kat hardverleíró nyelven (például VHDL, vagy Verilog) programozzák. Előnyük, hogy rugalmasan újraprogramozhatók, ezáltal új hardverelemek építhetők. Hátrányuk, hogy általában lassabbak, mint egy céhardver, valamint fogyasztásuk és áruk is magas.

Egy másik megoldás: alkalmazás specifikus integrált áramkör (ASIC) használata. Az ASIC olyan hardvertípus, amit nem egy általános felhasználásra, hanem konkrét, jól körülírt igények kielégítésére terveztek, csak a szükséges funkciókat látja el. A digitális ASIC-ek programozására szintén hardverleíró nyelvet használnak. A vezérlőegység feladatát egy ASIC teljes mértékben képes lenne ellátni, azonban magas költsége miatt ezt a lehetőséget elvettem.

⁷A teljesen feltöltött akkumulátor feszültsége körülbelül 1,4 V. A teljesen lemerült akkumulátor feszültsége körülbelül 1,0 V.

A mikrovezérlő, vagy más néven mikrokontroller olyan, egy lapkára integrált számítógép, melyet valamilyen vezérlési feladatra optimalizáltak. Az integrált áramköri lapka magába foglalja a programmemóriát és az adatmemóriát is. Az újabb mikrovezérlők már több perifériát (UART, SPI, IIC, CAN, USB, Ethernet, stb.) hardveresen is támogatnak, a perifériavezérlőket a mikrovezérlőn futó beágyazott szoftverben lehet be- és kikapcsolni. Lényegében a mikrovezérlő egy egyszerűbb számítógépnek felel meg. A számítógépek processzoraihoz képest rendkívül költséghatékonyan végezhetők el a kisebb számítási teljesítményt igénylő feladatok a mikrovezérlő kis mérete és fogyasztása miatt. Leginkább vezérlésre és adatok feldolgozására használják.

A fentiek mérlegelése után a választásom a mikrovezérlőkre esett. Úgy gondolom, hogy a vezérlési feladatokat a legköltséghatékonyabban ez a hardvertípus tudja ellátni. A választott mikrovezérlő típusa: Microchip PIC32MX220F032B.

PIC32MX220F032B mikrovezérlő. Az általam használt mikrovezérlő a Microchip cég PIC32-es mikrovezérlők családjába tartozik. A PIC32-es család a Harvard architektúrájú mikrovezérlők közé sorolható. A Harvard architektúrában a programkód és az adatok fizikailag elkülönített útvonalakon közlekednek a processzor felé. A Harvard architektúrájú számítógépben a központi feldolgozó egység (CPU) az utasítás beolvasásával és végrehajtásával egyidőben képes hozzáférni az adatmemóriához. A Harvard-felépítésű számítógép ezért gyorsabb lehet ugyanazon áramköri komplexitás mellett, mert az utasításbeolvasásnak és az adathozzáférésnek nem kell egyetlen szűk memória-útvonalon osztoznia.

A PIC32MX220F032B a 32 bites mikrovezérlők közé tartozik. Ez azt jelenti, hogy a belső utasítások és a tárolt adat egyaránt 32 bites. Az utasítások a 32 kByte-os, 128 bit széles Flash memóriában helyezkednek el. Az adatokat a 8 kByte-os Data RAM memória tárolja.

Az utasításvégrehajtás maximális frekvenciája 40 MHz. A mikrovezérlő integráltan két belső órajelgenerátort tartalmaz, egy 8 MHz-es és egy 31,25 kHz-es oszcillátort, továbbá lehetőség van két külső órajelgenerátor csatlakoztatására is. A külső órajelforrások az alkalmazástól függően lehetnek: kvarckristályok, oszcillátorok, vagy más egységektől származó impulzusok. A maximális 40 MHz-es órajelet egy belső órajel előosztó–PLL⁸–órajel utóosztó áramkörön keresztül érhetjük el. A használni kívánt órajelforrást és órajel frekvenciát a beágyazott szoftverben állíthatjuk be. Fontos, hogy az órajel inicializálása a programkód elején történjen, elkerülve ezzel a nemkívánatos működést.

A mikrovezérlőn több analóg bemenet, illetve digitális ki- és bemenet áll rendelkezésre.

⁸PLL segítségével egyetlen nagy frekvenciastabilitású kristályoszcillátor felhasználásával más (beállítható) frekvenciájú jeleket tudunk előállítani.

A külső modulokkal való kommunikációhoz számos hardveresen támogatott perifériát alkalmazhatunk. A vezérlő számítógép és a mikrovezérlő közti adatátvitel UART protokollon keresztül lehetséges. Az UART protokollal való kommunikációhoz a vezérlő számítógép és a mikrovezérlő eltérő jelszintjei miatt szükségünk van jelszintillesztő áramkörre (lásd 3.2.4.). A mikrovezérlő és rádiós adó-vevő áramkör között az adatátvitel SPI protokollon keresztül zajlik. A mikrovezérlő ezenkívül támogatja még a szintén integrált áramkörök összekapcsolására használatos IIC, vagy más néven I2C protokollt is.

A mikrovezérlő által támogatott egyéb funkciók a következők: 16 és 32 bites belső számlálók, DMA csatornák, A/D (analóg-digitális) átalakító, PWM, komparátorok [3].

Összességében elmondható, hogy a PIC32MX220F032B mikrovezérlő maradéktalanul képes ellátni a rádiókommunikációs egység vezérlését, sőt, paramétereit tekintve túl is teljesít a feladathoz szükséges követelményeken.

Rádiós adó-vevő áramkör. Az áramköri elem kiválasztása előtt meg kell vizsgálnunk, hogy milyen funkciókat kell ellátnia a rádiós adó-vevő áramkörnek. Az ellátandó funkciók a következők:

- kommunikáció a mikrovezérlővel,
- rádiófrekvenciás adás és vétel,
- moduláció, demoduláció (433 MHz-en),
- állítható adatsebesség,
- állítható modulációs mód.

A rádiókommunikációs modul oktatási célra készül, ezért javasolt úgy tervezni, hogy a fenti funkciók közül minél több beállítás rugalmasan változtatható legyen. Ezt legegy-szerűbben és a legkisebb méretben úgy érhetjük el, ha a fenti funkciókat ellátni képes áramkör egy lapkára van integrálva. A legjobb ár-érték arányú megoldásnak a Silicon Labs cég két alkatrésze bizonyult, az Si4420-as és az Si4432-es. A két integrált áramköri elem összehasonlítását lásd a 3. táblázatban.

A táblázatból jól látszik, hogy az Si4432 többféle beállítható paraméterrel rendelkezik. A két áramköri elem közti árkülönbség elenyésző, ezért a választásom az Si4432-es adó-vevő integrált áramkörre esett. Az Si4432-es IC-t meg lehet vásárolni kész modulként is, egy nyomtatott áramkörre van szerelve az IC, a hidegítő kondenzátorok, a külső kvarkristály, és az illesztett passzív szűrő is. A nyák tüskesoron keresztül csatlakoztatható más modulokhoz.

A hardver fejlesztése során mindenki megoldást alkalmaztam, a végső változat csak az általam tervezett rádiós adó-vevő áramkört tartalmazza.

	Si4420	Si4432
Frekvencia sáv	315, 433, 868, 915 MHz	240–930 MHz
Moduláció	FSK	OOK, FSK, GFSK
Adatsebesség	0,6 kbps–256 kbps	0,123 kbps–256 kbps
Adóteljesítmény	max. 0 dBm	max. 20 dBm
Érzékenység	-109 dBm	-118 dBm
Kommunikáció	SPI	SPI
Üzemi feszültség	2,2–5,4 V	1,8–3,6 V
AFC	Igen	Igen
FIFO	RX: 16 bit TX: 2 x 8 bit	64 bájt
FHSS	—	Igen
RSSI mérő	analóg, digitális	digitális
Csomagkezelő	—	Igen

3. TÁBLÁZAT. Az Si4420 és Si4432 összehasonlítása [4].

3.2. Hardvertervezés, hardverépítés

A hardvertervezés következő feladata a kapcsolási rajz elkészítése, ehhez az Altium Designer nevű hardvertervező szoftvert használtam. Az Altium Designer beépített könyvtárai rengeteg alkatrészrajzolatot tartalmaznak, de előfordul, hogy az újabb áramköri elemek hiányoznak, vagy bizonyos módosítással szeretnénk megrajzolni őket. Ebben az esetben a tervezőnek önállóan kell gondoskodnia ezek megszerkesztéséről. Az integrált áramkörök-höz saját rajzolatot készítettem, a passzív elemek (ellenállás, kondenzátor, tekercs, dióda) rajzolatát a beépített könyvtárakból választottam ki.

A kapcsolási rajz elkészítésénél érdemes csoportokba rendezni (lásd 2. ábra) az azonos fő egységekhez tartozó elemeket, továbbá címkékkel ellátni az összetartozó lábakat, huzalozásokat, ez átláthatóbbá teszi a kapcsolási rajzot.

A nyomtatott áramkör tervezése. A nyomtatott áramkör tervezésének első lépéseként ki kell választanunk az általunk használni kívánt angolszász vagy metrikus mérték-egységrendszer. Az Altium Designer minden mértékegységet támogatja, váltani köztük a *Board Options* menüben lehet. A két mértékegységrendszer közti átváltást a 3. egyenlet írja le.

$$1 \text{ mil} = \frac{1}{1000} \text{ inch} \approx 0,0254 \text{ mm} \quad (3)$$

Második lépésként ki kell választanunk az alkatrészekhez tartozó alkatrészlenyomatokat. Az elemekhez tartozó lenyomatok méretei a vonatkozó alkatrészek adatlapjaiban

mil-ben és mm-ben is megtalálhatók. Használhatjuk a beépített könyvtárban lévő alkatrészlenyomatokat is, azonban ezek gépi – hullám vagy újraömlesztéses – forrasztáshoz vannak méretezve. A kézi forrasztás megkönnyítése érdekében az alkatrészlenyomatok méretét bizonyos irányokban 10–20 %-kal megnövelte.

A következő lépés a nyomtatott áramköri panel méretének meghatározása és a gyártóhatóságra vonatkozó szabályok beállítása. A méretezés során figyelembe kell vennünk, hogy a nyák gyártási költsége arányos a méretével. Mivel a modul egyelőre csak prototípus, ezért a könnyebb forrasztást előtérbe helyezve nagyobb méretben terveztem meg a nyákat. A gyárthatósági szabályoknál az Elektronika Technológia Tanszék gyártósorának technikai korlátait vettet alapul, ugyanis itt gyártották le a nyomtatott áramkört. A gyártósor technikai korlátai a következők:

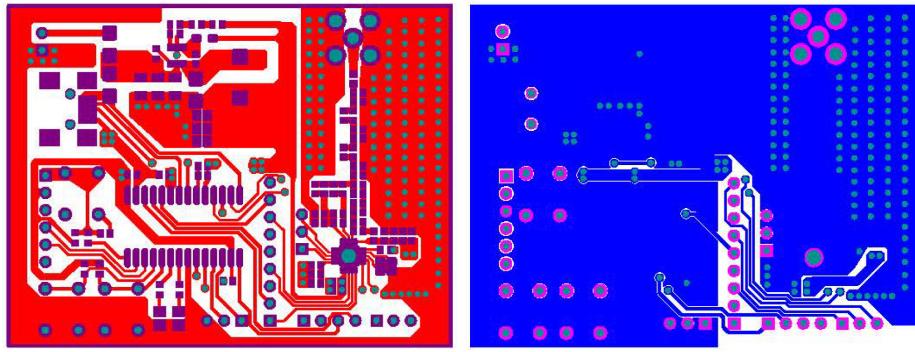
- Minimális szigetelővastagság: 10 mil/0,254 mm.
- Minimális vezetékvastagság: 10 mil/0,254 mm.
- Legkisebb furatátmérő: 12 mil/0,3 mm.

A fenti szabályokon túl beállítottam a minimális alkatrésztávolságot is. Ennek értéke szintén 10 mil/0,254 mm.

A huzalozás tervezésénél nem a minimális vezetékvastagságot használtam, mert ez könnyebben megsérül a forrasztás során. A táp- és földvezetékek szélessége legalább 0,5 mm, mert a túl keskeny vezetéksávokon a feszültségesés már jelentős lehet. A huzalozások és az alkatrészek közti szabad területeket földréteggel töltöttem ki. A földkitöltés főleg a rádiós adó-vevő áramkör körül volt fontos, mert az árnyékolás lecsökkenti a rádiós jelútba beszűrődő zavarokat. A nyákterv kialakításánál a következőkre kell figyelnünk:

- A vezeték törésénél kerüljük a derék és hegyesszögeket!
- A furatokba és átvezetésekbe (viákba) minden merőlegesen kössük a vezetéket!
- Az alkatrészek lábaihoz (padekhez) minden derékszögen csatlakozzunk!
- Kerüljük a föld- és táphurkokat!

A fentiek figyelembevételével elkészített nyomtatott áramkör tervének felső és alsó vezető rétege a furatokkal együtt a 3. ábrán látható. Forrasztásgátló maszkot a gyártási költség csökkentése érdekében nem alkalmaztam.



(a) A nyomtatott áramkör felső vezető- (b) A nyomtatott áramkör alsó vezetőrétege.

3. ÁBRA. A nyomtatott áramkör vezetőrétegei.

3.2.1. Energiaellátó rendszer

Az eddigiekben már ismertettem az energiaellátó rendszerre vonatkozó követelményeket (2.2. fejezet) és az MCP16301-es kapcsolóüzemű feszültségcsökkentő átalakító tulajdonságát (3.1.1. fejezet). A továbbiakban a teljes energiaellátó rendszer működését vizsgálom. Az energiaellátó rendszer kapcsolási rajzát a Függelék 7.5. szakasza tartalmazza.

A kapcsolási rajzban található DAKKU és DUSB nevű Schottky diódák⁹ huzalozott VAGY kapcsolatot valósítanak meg. A huzalozott VAGY-kapu használata azért előnyös, mert így egyszerre csatlakoztathatjuk az akkumuláltort és az USB kábelt. Az energiaellátást mindenkor a magasabb feszültségű bemenet biztosítja. A diódák nyitófeszültsége 0,2 V, ennyivel csökken az MCP16301-es bemeneti lábára eső feszültség az akkumulátor, vagy az USB kábel által szolgáltatott feszültség értékéhez képest.

Az energiaellátó rendszer kapcsolási rajzán látható, hogy minden bemeneti, minden kimeneti kondenzátorból többet alkalmaztam. A kondenzátorok párhuzamos kapcsolása azt a célt szolgálja, hogy a szabványostól eltérő kapacitásértékek is előállíthatóak legyenek. Párhuzamos kapcsolás során a kondenzátorok kapacitása összeadódik.

A passzív elemek értékeit az MCP16301 adatlapjában található egyenletrendszerek alapján számoltam ki [5].

3.2.2. Mikrovezérlő

A mikrovezérlő kapcsolási rajzát a Függelék 7.5. szakasza tartalmazza. A digitális áramkörök érzékenyek a tápfeszültség ingadozására, ezért 100 nF-os hidegítő kondenzátorokat helyeztem el a mikrokontroller táplálóinál a zavarok kiszűréséhez. Az \overline{MCLR}

⁹A dióda felépítéséből adódóan nyitófeszültsége kisebb, mint a szilícium diódáké. A fém-félvezető átmenet kapacitása kicsi, ezért nagy frekvencián is jól alkalmazható.

lábra egy nyomógombot kötöttem, a nyomógomb megnyomásával lehetőség van a mikrovezérlő hardveres újraindítására. A nyomógombot hardveresen pergésmentesítettem, így a nyomógomb egyszeri megnyomásakor a rádiókommunikációs modul csak egyszer kezdi előlről a beágyazott szoftver futtatását.

A kommunikációhoz használt lábak bekötésénél két dolgot tartottam szem előtt. Az egyik, hogy olyan lábra kössem az SPI és UART ki- és bemeneteit, ahol a mikrovezérlő hardveresen is támogatja ezeket a protokollokat. A másik, hogy úgy válasszam meg a lábakat, hogy a nyáktervezés során a lehető legkevesebb huzal keresztezze egymást.

Két további nyomógombot és két fénykibocsátó diódát (LED) is rákötöttem a mikrovezérlő lábaira. A nyomógombokra a fejlesztés kezdeti fázisában és a tesztelés során volt szükség, a feltételes utasítások feltételeként a nyomógombok állapotát adtam meg. A LED-eket indikátorként használom, így nyomon tudom követni, hogy mely utasítássorozatot végzi a mikrokontroller, valamint a fejlesztés során a szoftverhibák felderítésében is segítségemre voltak.

3.2.3. Rádiós adó-vevő áramkör

A rádiós adó-vevő áramkör kapcsolási rajzát a Függelék 7.5. szakasza tartalmazza. A nagyfrekvenciás rádiós áramkörök nagyon érzékenyek a tápfeszültség ingadozására, ezért a tápfeszültség megfelelő szűrése különösen fontos.

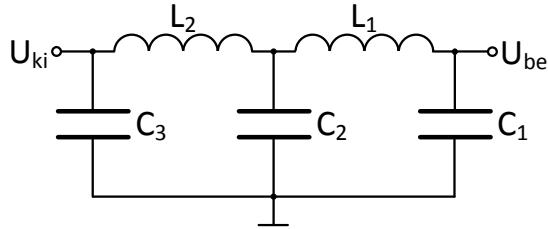
A szuksesges 30 MHz-es órajel előállításához kvarckristályt használtam. A kvarckristály lábaihoz tartozó „load” kondenzátorok értékét szoftveresen lehet beállítani. Az általam használt 30 MHz frekvenciájú SX2520-as kvarckristályhoz tartozó „load” kondenzátorok kapacitása 12 pF [7].

A Si4432 SPI kommunikációhoz tartozó három lábat, valamint a digitális kommunikáció engedélyezésére szolgáló bemenetet (\overline{nSEL}) és a megszakítás bekövetkezését jelző kimenetet (\overline{nIRQ}) közvetlenül a mikrovezérlő lábaira kötöttem. A három digitális ki- és bemeneti lábat tüskesor csatlakozóra vezettem ki, így igény szerint csatlakoztathattunk rákülső modulokat, vagy összeköthetjük a mikrovezérlő jelenleg nem használt lábaival.

A Si4432 támogatja, hogy külön antenna legyen a rádiós adáshoz és vételhez, azonban én egyantennás megoldást alkalmaztam. Az egyantennás rendszer hátránya, hogy nem lehet egyszerre az adáshoz és a vételhez is tökéletesen illeszteni a szűrő áramkört. Mivel az Si4432 vevő lábának érzékenysége eleve nagy (-118 dBm), ezért a szűrő áramkört úgy illesztettem, hogy inkább a kimenő teljesítmény legyen minél nagyobb.

A kisugárzott rádiós jel egy 433 MHz-re illesztett aluláteresztő szűrőn megy keresztül, a vett jel ugyanezen a szűrőn, illetve egy 433 MHz-re illesztett felüláteresztő szűrőn keresztül

érkezik az Si4432 bemenetére. A sorba kötött alul- és felüláteresztő szűrő úgy viselkedik, mint egy sáváteresztő szűrő. Ezenkívül az antenna elő sorosan bekötöttem egy 220 pF-os kondenzátort, a kondenzátor 433 MHz-en szinte rövidzár ($R = \frac{1}{j\omega C} = 3,7\Omega$), viszont az egyenáramú összetevőkkel szemben szakadásként viselkedik. A következő két bekezdésben a szűrők illesztésének folyamatát ismertetem.

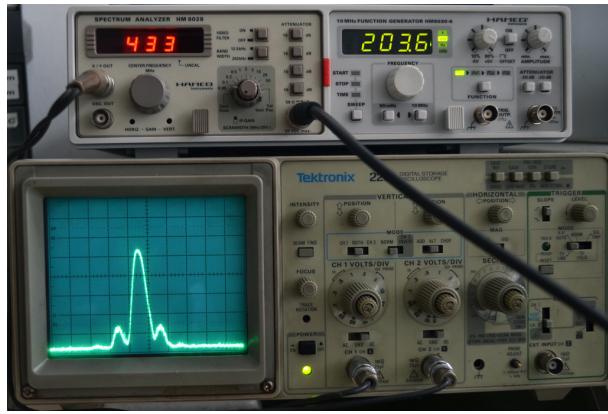


4. ÁBRA. Az aluláteresztő szűrő kapcsolási rajza.

Az aluláteresztő szűrő illesztése. Az aluláteresztő szűrő kapcsolási rajza a 4. ábrán látható. Az aluláteresztő szűrő feladata, hogy a modulált jel előállítása során keletkező nagyfrekvenciás felharmonikusokat kiszűrje a spektrumból, a modulált jelet viszont a lehető legkisebb csillapítással engedje át. Tökéletesen illesztett szűrő esetén az antennán kisugárzott jel teljesítménye fele (3 dB-el kisebb) az adó áramkör kimenő teljesítményének. Feladatom, hogy az illesztés során minél jobban megközelítsem a -3 dB-s határt.

Az aluláteresztő szűrő illesztését a következőképpen végeztem. A *Tina* nevű szimulációs szoftverben felépítettem az aluláteresztő szűrőt, majd a kondenzátorok és tekercsek értékeit addig változtattam, amíg a kívánt átviteli függvényt nem kaptam 433 MHz-en (csak a boltokban kapható szabványos értékekkel próbálkoztam). A szimuláció után beforrasztottam a szűrőkör elemeit a megfelelő értékekkel, majd az Si4432-t úgy programoztam fel, hogy csak a modulálatlan vivőjelet sugározza ki 433 MHz-en. Ekkor a spektrumanalizátoron egy színusz spektruma jelenik meg 433 MHz-en. A spektrumanalizátor két műszer, egy frekvenciaanalizátor (a bemenetére a rádiókommunikációs modul antennakimenetét kötöttem) és egy oszcilloszkóp (az 1. csatornára a frekvenciaanalizátor frekvencia eltérítését a 2. csatornára a frekvenciaanalizátor amplitúdó eltérítését kötöttem, majd az oszcilloszkópot X-Y üzemmódba állítottam) összekötésével valósítottam meg. Az így kialakított spektrumanalizátor az 5. ábrán látható.

A szűrő illesztése előtt egy hitelesített jelgenerátor segítségével beállítottam a referenciataljesítmény szintjét a spektrumanalizátoron. A jelgenerátor teljesítményét 11 dBm-nek választottam, mert ez a legkisebb választható adóteljesítmény az Si4432-es integrált



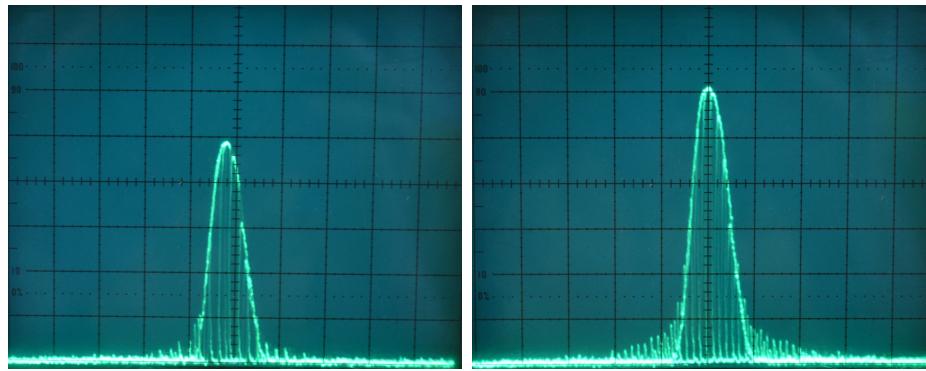
5. ÁBRA. Frekvencia analizátorból és oszcilloszkópból összeállított spektrumanalizátor.

áramkörnél is. A referenciaszint beállítása után megmértem a rádiós adó-vevő áramkör által kisugárzott teljesítményt. Fontos, hogy a hiteles mérés elvégzéséhez koaxiális kábelrel csatlakoztassuk a rádiókommunikációs modult a spektrumanalizátorhoz, valamint a referenciaszint beállítása után a spektrumanalizátor osztási arányait ne állítsuk át. A kisugárzott jelszint lemérése után a következő iterációs módszerrel végeztem el a szűrő illesztését:

1. Egy passzív elemet kicseréltem kisebb értékűre.
2. Megmértem a kimenő jel teljesítményét, ha nőtt, akkor újra az 1. pont, ha csökkent, akkor 3. pont.
3. A passzív elem értékét az eredetinél nagyobbra cseréltem.
4. Megmértem a kimenő jel teljesítményét, ha nőtt, akkor újra a 3. pont, ha csökkent, akkor 5. pont.
5. Azt az elemet hagytam bent, aminél a legnagyobb jelszintet mértem.

Az iterációs folyamat végén eljutottam oda, hogy bármelyik elem kicserélése csökkenette a kimenő jelszint amplitúdóját. A 6. ábrán a referenciaszint, az illesztetlen szűrő és az illesztett szűrő kimenő jelszintje látható. Az oszcilloszkóp függőleges osztása 5 dB/osztás, vízszintes osztása 5 kHz/osztás.

A 6. ábrán látható, hogy a szimulációból származó szűrőtag értékekkel 6 dB-el kisebb az adóteljesítmény, mint az illesztés után. A szimulációs eredményektől való eltérés oka, hogy a nagyfrekenciás szűrő áramkör elemeinek elrendezése is befolyásolja a szűrő vágási frekvenciáját, valamint 433 MHz-es frekvencián a nyomtatott áramköri huzalozás és a forrasztón kapacitív és induktív hatása már egy nagyságrendbe esik a kondenzátorok és



(a) A szűrő kimenő teljesítménye a han-

(b) A szűrő kimenő teljesítménye a hangolás után.



(c) A jelgenerátor referencia teljesítmé-

nye.

6. ÁBRA. Az illesztetlen és az illesztett szűrő, valamint a referenciajel teljesítménye.

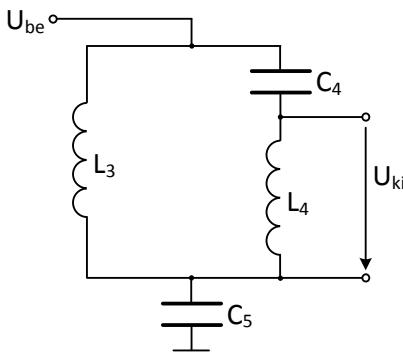
tekercsek kapacitás, illetve induktivitás értékeivel, ami szintén a szűrő félrehangoltságához vezethet.

Az illesztési folyamatot csak az egyik rádiókommunikációs modulon tudtam befejezni, mert a másik nyomtatott áramkör huzalozása az alkatrészek többszöri be- és kiforrasztása során megsérült (több helyen is „feljött” a rézfólia), így a további alkatrészcsere létetlenül a szűrőkör teljes tönkremenetelét kockázta.

Az illesztett aluláteresztő szűrő kondenzátorainak és tekercseinek értékeit és a kisugárzott jelszint nagyságát a 4. táblázat tartalmazza.

	L_1	L_2	C_1	C_2	C_3	Kisugárzott jelszint
Modul 1	15 nH	22 nH	3,6 pF	18 pF	12 pF	-0,8 dBm
Modul 2	15 nH	22 nH	4,7 pF	18 pF	4,7 pF	4,9 dBm

4. TÁBLÁZAT. Az aluláteresztő szűrő paraméterei.



7. ÁBRA. A felüláteresztő szűrő kapcsolási rajza.

A felüláteresztő szűrő illesztése. A felüláteresztő szűrő kapcsolási rajza a 7. ábrán látható. A felüláteresztő szűrő illesztését is az előző bekezdésben ismertetett módszer alapján készítettem el. Első lépésként számítógépes szimuláció segítségével meghatároztam a vágási frekvenciához tartozó elem értékeit, majd a korábban bemutatott iterációs folyamatnak megfelelően behangoltam a szűrőt.

Mivel a felüláteresztő szűrő kimeneti pontjai közvetlenül csak az Si4432 lábaira vannak kötve, ezért a vett jelszint nagyságát spektrumanalizátorral csak abban az esetben lehetne hitelesen megmérni, ha kicsatolnám a jelet, ez azonban azt jelentené, hogy a szűrő kimeneti pontjaira rá kellene forrasztanom egy koaxiális kábelét, azonban ez a nyomtatott áramköri

huzalozás szélességéből adódóan gyakorlatilag lehetetlen, illetve el is hangolná a szűrőt. Ehelyett az Si4432 digitális RSSI¹⁰ mérő funkcióját alkalmaztam. Először meggyőződtem róla, hogy az RSSI mérés során mennyire ingadozik a vett jelszint értéke. A rádiókommunikációs modul antennabemenetére jelgenerátor segítségével állandó, -30 dBm-es jelszintet adtam, közben folyamatosan kiolvastam az Si4432 azon regiszterét, melyben az RSSI mérés eredménye található. A mérés ideje alatt a regiszter értéke nem változott, tehát a pontosság megfelelő, így ezzel a mérési összeállítással is elvégezhető a szűrő hangolása.

Az illesztett felüláteresztő szűrő kondenzátorainak és tekercseinek értékeit és a hangozás előtti és utáni teljesítménykülönbséget az 5. táblázat tartalmazza.

	L_3	L_4	C_4	C_5	ΔP
Modul 1	33 nH	22 nH	4,7 pF	10 pF	+4 dB
Modul 2	33 nH	22 nH	3,6 pF	10 pF	+3,5 dB

5. TÁBLÁZAT. A felüláteresztő szűrő paraméterei.

A táblázatban azért nem szerepel a tényleges vett teljesítmény, mert az RSSI mérésből származó regiszterértéket az Si4432-es adatlapjában található grafikon alapján kell megfeleltetni egy pontos bemeneti teljesítményértéknek, azonban a grafikon leolvasása és az Si4432-es integrált áramkörök közti különbségek miatt a vételi jelszint csak pontatlanul határozható meg. A vett teljesítményre vonatkozó méréseket az 5.2.2. fejezet tartalmazza.

3.2.4. Soros port illesztő

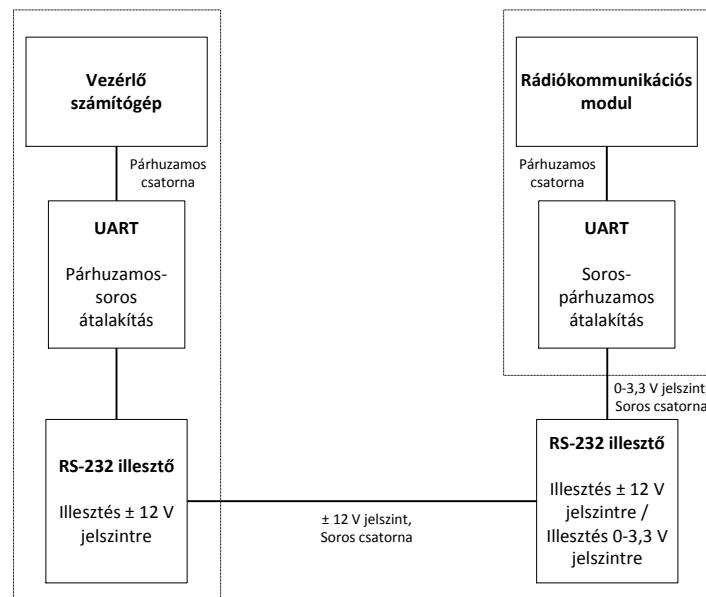
A soros jelszintillesztő áramkör kapcsolási rajzát a Függelék 7.4. szakasz tartalmazza. A vezérlő számítógép és a mikrovezérlő közti kommunikáció soros (UART) illesztőn keresztül valósul meg. Az UART protokoll full-duplex (a kapcsolaton keresztül egyidejűleg minden irányba küldhetők az adatok, külön vezeték van a vevőnek és az adónak) összeköttetést biztosít az eszközök között. A mikrovezérlőben implementált UART-egység a rendszer alacsony (0 V) és magas (3,3 V) feszültségszintjével üzemel. A vezérlő számítógép UART protokollja a fizika réteget tekintve az RS-232-es szabványnak felel meg. Az RS-232-es feszültségszintjeihez tartozó logikai jelentéseket a 6. táblázat tartalmazza.

A jelszintek közti feszültséggükölnösségek eltérését valamilyen az UART protokoll fizikai rétegeit illesztő áramkörrel lehet megoldani. Erre a célra a Texas Instruments cég MAX3232-es jelszintillesztő integrált áramkörét alkalmaztam. A MAX3232 a megfelelő feszültséget a töltéspumpa elvén állítja elő [8]. A mikrovezérlő és a vezérlő számítógép közti adatátviteli folyamat a soros illesztéssel együtt a 8. ábrán látható.

¹⁰RSSI: Received Signal Strength Indicator. Vételi jelszint.

Feszültségtartomány	Logikai jelentés
3 – 12 V	0
-12 – -3 V	1
-3 – 3 V	nem megengedett

6. TÁBLÁZAT. Az RS-232-es szabvány feszültségszintjeihez tartozó logikai jelentések.



8. ÁBRA. A soros adatátvitel folyamata.

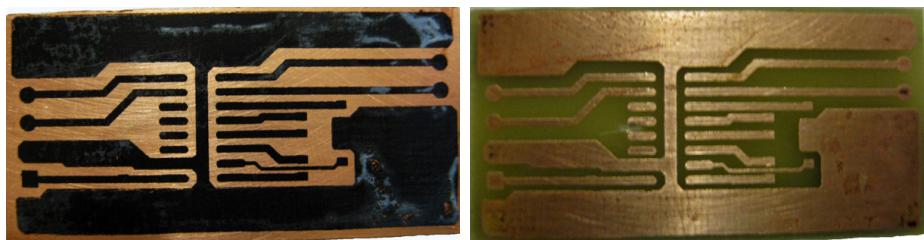
A jelszintillesztő áramkör nem a rádiókommunikációs modul nyomtatott áramkörén helyezkedik el, hanem egy különálló nyomtatott áramkörön. A jelszintillesztő áramkör csatlakoztatása négy érintkezős (TX, RX, VCC, GND) tüskesoron keresztül valósítható meg. A nyomtatott áramkört házilag, „vasalásos technikával” gyártottam. A vasalásos technika lépései tartalmazza a következő felsorolás és a 9. ábrán látható illusztráció:

1. Számítógépes tervezőszoftver segítségével készítsük el a nyomtatott áramköri tervet!
2. Nyomtassuk ki a nyomtatott áramköri tervet (tükrözve) lézernyomatóval fényes fotópapírra!
3. Helyezzük el a rézlapon a fotópapírt a megfelelő helyre!
4. 3–4 percig tartsuk a vasalót a fotópapíron, ügyeljünk rá, hogy a papír ne mozduljon el!
5. Bő víz alatt távolítsuk el kézzel, vagy finomabb kefével a rézre égett papírdarabokat!
6. Vizsgáljuk meg a rávasalt nyáktervet a rézrétegen, a kisebb hibákat alkoholos filccel javítsuk!
7. Tegyük a nyákat valamilyen marószerbe! Használhatunk vas-oxid kloridot vagy sósav és hidrogén-peroxid keverékét (kb. 90–10 % arányban).
8. Ha a réz lemaródott vegyi ki és mossuk le bővízzel a nyákat!
9. Mosogatószívuccsal vagy kefével tisztítsuk le rávasalt festéket a nyákról!
10. Ellenőrizzük szemmel és méréssel is, hogy nem maradtak-e rövidzárak a huzalozások között, ha igen, kaparjuk le szikével a fölösleges rezet!
11. A nyák készen áll a forrasztásra.

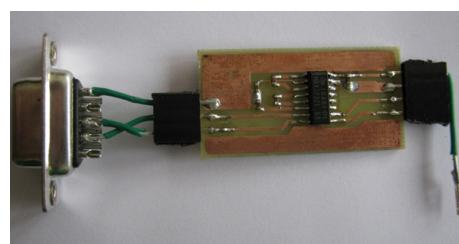
3.2.5. Hardvertervezési tapasztalatok

A hardver megépítése közben egyenként ellenőriztem a rádiókommunikációs modul fő egységeinek működését. Az ellenőrző mérések során felmerülő hardvertervezési hibák a következők voltak:

- A miniUSB csatlakozó nem teljesen a panel szélén helyezkedik el, ez megnehezíti az USB kábel csatlakoztatását.
- A nyomógombok túl közel vannak a PICkit 3 tüskesor csatlakozójához, így a PICkit 3 csatlakoztatásakor nehézkes a megnyomásuk.
- A nyomógombok kapcsolási rajzában a lábak fel vannak cserélve, ezért a panelra való forrasztás előtt kisebb átalakítást kellett végeznem a lábaikkal.
- Az SX2520-as felületszerelt oszcillátor alkatrészlenyomata kicsi, ez jelentősen megnehezíti a forrasztását.



(a) A rézlemezre vasalt nyomtatott áramkör terve.
 (b) A nyomtatott áramköri rajzolat a maratás után.



(c) A kész soros jelszintillesztő áramkör.

9. ÁBRA. A soros jelszintillesztő áramkör gyártásának lépései.

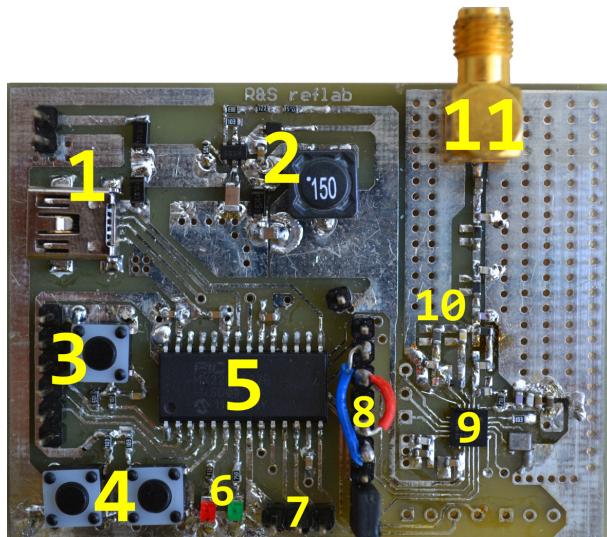
- Nem alkalmaztam hőcsapdákat a furatok körül, ez szintén megnehezíti a forrasztást.
- Felcseréltem az Si4432 SPI kommunikációs lábait, ezt a kilenc elemű SPI kivezetést kiválasztó tüskesor lábainak újrahuozásával oldottam meg.
- Az Si4432 adatlapjának hiányossága miatt a tervezésből kimaradt a KF (középfrekvenciás) szűrő $1 \mu\text{F}$ -os pufferkondenzátor.

A hibák szerencsére javíthatók voltak, viszont később, az oktatáshoz felhasznált modulnál már a tervezés során ki kell javítani ezeket a hibákat.

3.3. A hardver felépítése

Az eddigiekben ismertettem a hardvertervezés folyamatát. A tervezés eredményeképpen elkészült rádiókommunikációs modul prototípusának nyomtatott áramköri panelje a 10. ábrán látható. A számokkal jelölt elemek a következők:

1. Akkumulátor és miniUSB csatlakozó.
2. Energiaellátó rendszer.
3. Programozó csatlakozó és reset nyomógomb.
4. Nyomógombok.
5. Mikrovezérlő.
6. Visszajelző LED-ek.
7. UART csatlakozó.



10. ÁBRA. A rádiókommunikációs modul hardvere.

8. SPI kimenet választó csatlakozósor.
9. Rádiós adó-vevő integrált áramkör.
10. Szűrő áramkör.
11. SMA¹¹ csatlakozó (antennához).

A nyomtatott áramköröket érdemes zárt dobozban elhelyezni, ezzel védve őket a külső hatásoktól. Azonban ez a hardver csak prototípusa az oktatásra szánt rádiókommunikációs modulnak, így dobozolása nem szükséges.

¹¹SMA: SubMiniature version A

4. Szoftver

Régebben a mikrovezérlőkön futó beágyazott szoftvereket többnyire assembly nyelven írták. Az assembly nyelv egy alacsony szintű programnyelv számítógépek és mikrovezérlők programozására. Az utasításkészlet minden eleme megfeleltethető egy gépi kódú utasításnak. Manapság az assembly szintű programozás háttérbe szorult, leginkább kód-optimalizáláskor, a memóriaigény csökkentésekor használják.

A mikrovezérlők széles körű elterjedéséhez az is hozzájárult, hogy ma már nem csak assemblyben, hanem C-ben is lehet őket programozni. A feladatom részeként kijelölt beágyazott szoftvert C nyelven készítettem el. Fejlesztői környezetként a Microchip cég MPLAB X szoftverét használtam [9].

A fejezetben ismertetem a mikrovezérlőn futó beágyazott szoftver működését, a soros kommunikáció folyamatát és a választható rádiós beállításokat, végül bemutatom a rádiókommunikációs modul működését.

4.1. Soros kommunikáció

A soros kommunikáció olyan adatátvitel, amelyben a bitek időben egymás után továbbítódnak ugyanazon az átviteli csatornán. Az adatok feldolgozásához az adó és a vevő órajelét össze kell hangolni. Ez kétféleképpen történhet: aszinkron módon előre beállítjuk az adó és a vevő órajelfrekvenciáját, vagy szinkron módon fizikailag külön átviteli csatornában továbbítjuk a szinkronizációhoz szükséges órajelet, majd az órajel frekvenciája alapján a vevő mintavételezi a beérkező adatokat.

Ahogy az a 2. ábrán is látható, két soros kommunikációs kapcsolatot kellett kiépítenem, egyet a mikrovezérlő és a vezérlő számítógép között és egyet a mikrovezérlő és a rádiós adó-vevő áramkör között. A továbbiakban ezen soros kommunikációs protokollok felépítését és működését vizsgálom.

4.1.1. UART

A beágyazott rendszerekben legtöbbször egy UART-egység vezérli a soros adatátvitelt. Az UART egy kétvezetékes (az adáshoz és a vételhez külön soros vonal biztosított), aszinkron, soros adatátvitel protokoll. Az UART-egység a mikrovezérlő párhuzamosan kezelt adatait soros adatfolyammá átalakítja, majd az előre beállított időzítéssel (baud sebesség¹²) és keretstruktúrával bitenként kiadja és ugyanazzal az időzítéssel és keret-

¹²Baud sebesség: Megmutatja, hogy egy adott átviteli média esetén hány modulált jelet továbbítottak 1 másodperc alatt.

struktúrával a beérkező bitsorozatból visszaállítja a küldött adatot. Az időzítést és az adatszerkezetet mind az adó-, mind a vevőoldalon előre be kell állítani. Az UART protokoll adatcsomag-szerkezete a 11. ábrán látható.

Start 1 bit	Adat 8 – 9 bit	Paritás 1 bit	Stop 1 – 2 bit
------------------------	---------------------------	--------------------------	---------------------------

11. ÁBRA. Az UART protokoll adatstruktúrájának felépítése.

Az UART kommunikáció felépítéséhez a következő beállításokat alkalmaztam:

- Adatstruktúra: 1 startbit, 8 adatbit, nincs paritásbit, 1 stopbit (8-N-1).
- Baud sebesség: 9600 baud/másodperc.

4.1.2. SPI

Az SPI protokoll kétirányú szinkron soros kommunikációt valósít meg kettő vagy több eszköz között. A kommunikációban résztvevő egységek között master-slave viszony áll fenn. Az SPI busz alapvetően háromvezetékes, bár az SPI kommunikáció egyes változatai négy, öt, vagy ötnél is több vezetéket használnak. Az SPI busz kiterjeszhető: egy master több slave eszközhöz is kapcsolódhat, ám a kommunikációra kiválasztott slave eszközt egyedi választóvonallal (Slave Select) hardveresen kell kijelölni.

A mikrovezérlő és a rádiós adó-vevő áramkör közti SPI kommunikáció háromvezetékes (SDO¹³, SDI¹⁴, SCLK¹⁵), bár a kapcsolat kialakításához engedélyezni kell az SI4432 \overline{nSEL} lábat, azaz „0”-ba kell állítani. Az \overline{nSEL} lab nem azonos az előző bekezdésben ismertetett Slave Select lábbal. Az adatkapcsolat felépítéséhez először be kell állítani a mikrovezérlő SPI interfészét. A beállítások a következők: csak a három alapvető vezeték engedélyezése; master mód; a vezérlő órajel a mikrovezérlő órajelének a fele, azaz 4 MHz; 8 bites kommunikáció; mintavételezés a beérkező adat közepén.

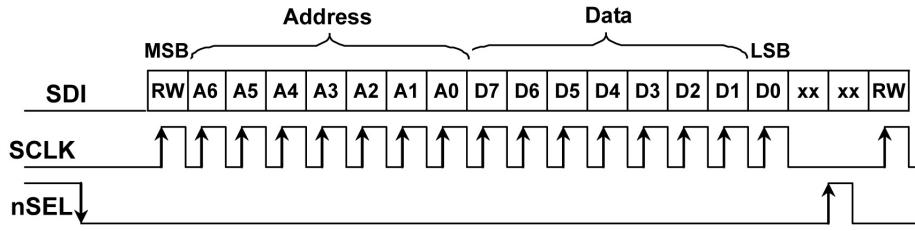
Az SPI kommunikáció duplex módban történik, tehát amikor a mikrovezérlő kiküld egy adatbitet az SDO lábán, akkor egy bitet be is olvas az SDI lábon, vagyis nyolc adatbit kiküldése közben nyolc bit adatot be is olvasunk.

A mikrovezérlő és a rádiós adó-vevő áramkör közti SPI kommunikáció időzítési viszonyait a 12. ábra mutatja. Az első bit (RW) határozta meg, hogy olvasni (RW=0) vagy írni (RW=1) szeretnénk az Si4432 regisztereit. A következő hét bit jelöli ki a 128 regiszter

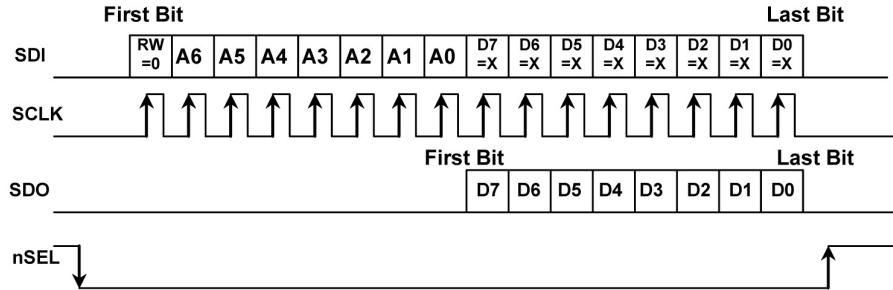
¹³SDO: Serial Data Output. Soros adat kimenet.

¹⁴SDI: Serial Data Input. Soros adat bemenet.

¹⁵SCLK: Serial Clock. Soros vezérlő órajel.



(a) Az SPI adatírás folyamata.



(b) Az SPI adatkiolasás folyamata.

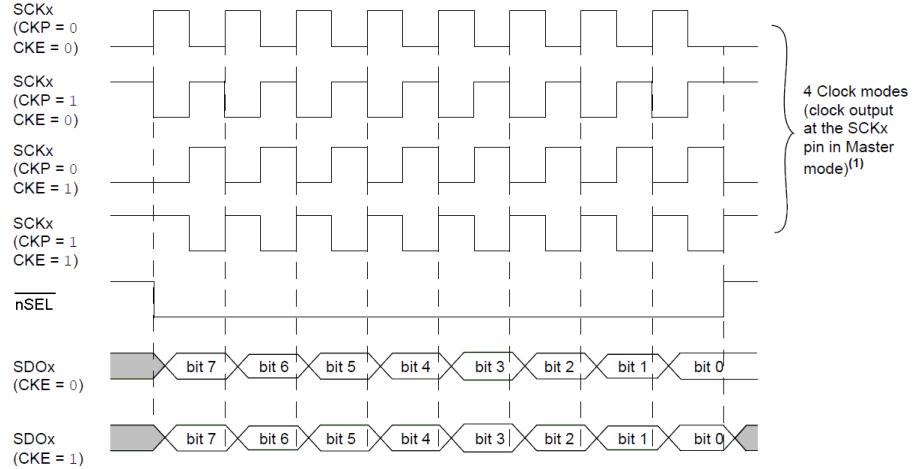
12. ÁBRA. Az SPI kommunikáció folyamata [4].

egykét. Amennyiben írást hajtunk végre, úgy a továbbiakban kiadott nyolc bit hosszúságú adat betöltődik a kiválasztott regiszterbe. Ha olvasni szeretnénk a kiválasztott regiszter tartalmát, akkor a regiszter címe után kiadott nyolc bittel szinkronban (a küldött nyolc bit értéke közömbös) az Si4432 visszaküldi a megcímezett regiszter értékét.

Az SPI kommunikáció ellenőrzése során azt tapasztaltam, hogy néhány regiszter íráskor a mikrovezérlő SDO lábán kiküldött adat utolsó „1”-es bitjét a Si4432 rosszul mintavételezte és „0”-nak állította be. Először arra gyanakodtam, hogy az adat írása után az \overline{nSEL} lab túl gyorsan vált „0”-ból „1”-be, ezért késleltetést helyeztem el a szoftverben az adatküldés és az \overline{nSEL} lab felhúzása közé. Ez a megoldás nem járt sikerrel, az Si4432 továbbra is rosszul olvasta be az adatot.

A következő ötletem az volt, hogy a vezérlő órajel beállításaival lehet a gond. A mikrovezérlő SPI moduljának lehetséges vezérlő órajel beállításai a 13. ábrán láthatók. Az SPI modul inicializálása során a CKP (az SPI modul vezérlő órajelének tétlen állapotában lévő jelszintet határozza meg) és CKE (a vezérlő órajel első él változásának irányát határozza meg) bitek értékét nem változtattam, így ezek a modul engedélyezése után az alapbeállításon, „0”-n maradtak. A 13. ábrán látható, hogy ennél a beállításnál a felfutó élkor kezdődik a kimenő adatbitek változása, a bitidő közepén pedig a lefutó él van. A 12. ábrán látható, hogy az Si4432 a bemenő adatot felfutó élre mintavételezi, tehát az előző beállítás rossz, mert az első felfutó élnél még nincs kint a soros vonalon az adat, ezért az Si4432 csak a második felfutó élnél mintavételezi az első adatbitet. Mivel az

SPI kommunikáció nyolc bitenként küldi ki az adatot, ezért csak nyolc felfutó él van egy adatátviteli folyamat alatt, tehát az utolsó bitet már nem mintavételezi az Si4432-es. A CKE bit „1”-be állítása után a bitidő közepén lesz a felfutó él. Ezzel a beállítással az SPI kommunikáció problémája megoldódott.



13. ÁBRA. Az SPI kommunikáció vezérlő órajelének lehetséges beállításai [10].

4.2. Moduláció

Moduláció alkalmazásakor egy villamos jel (vivő jel) valamely jellemzőjét egy másik jellet (a moduláló jellet) változtatjuk. Szinuszos vivő jel esetén amplitúdó-, frekvencia- és fázismodulációról beszélhetünk aszerint, hogy a vivő jel melyik jellemzőjét változtatjuk a moduláló jellet. Egy szinuszos vivőhullám általános matematikai kifejezése a következő:

$$y(t) = A \sin(2\pi ft + \phi), \quad (4)$$

ahol A – az amplitúdó,

f – a frekvencia,

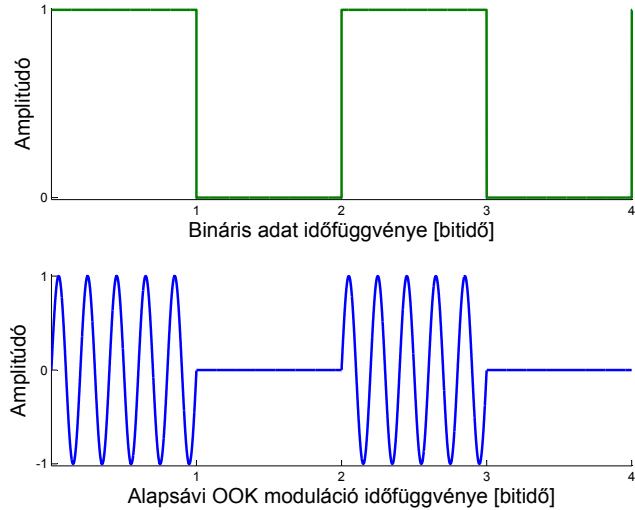
ϕ – a fázis.

A modulációval rendszerint egy kis frekvenciás jelként rendelkezésre álló információt „ültetünk rá” egy sokkal nagyobb frekvenciájú vivőre az információ könnyebb kiszugározhatósága érdekében (pl. műsorszórás rádióval, televízióval). Az információ a modulált jelből demodulációval nyerhető vissza.

A modulált jelet tekintve megkülönböztetünk az analóg és digitális modulációt. Mivel a rádiós adó-vevő áramkör az adatokat binárisan kezeli, ezért csak a digitális modulációs módokat ismertem. A digitális információk átvitelére szolgáló modulációs rendszereket

két nagy csoportba oszthatjuk: alapsávi modulációs rendszerek, vivős modulációs rendszerek [1, 11]. Az általam fejlesztett rendszer a vivős modulációs rendszerek csoportjába tartozik. A továbbiakban az Si4432 által támogatott digitális modulációs módokat ismertetem.

OOK. ON-OFF Keying (be-ki billentyűzés).



14. ÁBRA. OOK moduláció.

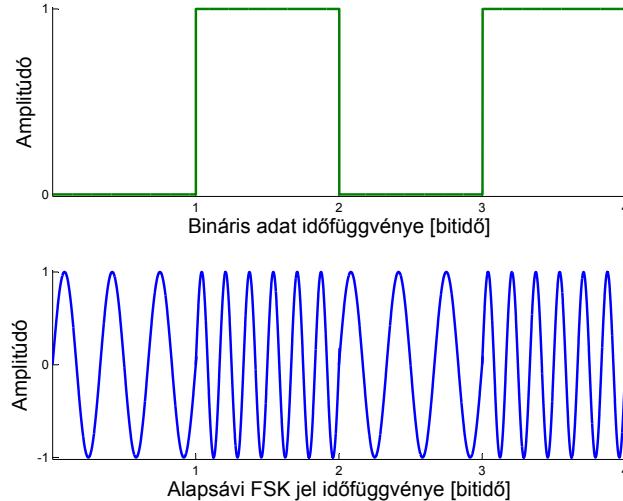
Az OOK moduláció a digitális amplitúdómoduláció egyik típusa. Az amplitúdómodulációt a szinuszos vivőhullám amplitúdója hordozza az információt, más szavakkal a moduláló jel ezeknél valamelyen módon az $A(t)$ amplitúdfüggvényben kap helyet [11, 12]. OOK modulációt a vivőjel megléte bináris egyet, hiánya bináris nullát jelent. A bináris adatokhoz tartozó OOK modulált alapsávi jelalakot a 14. ábra mutatja.

Kétszintű OOK moduláció esetén szimbólumonként egy bit adat továbbítódik, de n darab különböző amplitúdószint kijelölésével megvalósítható a szimbólumonkénti $\log_2(n)$ bit átvitele is. Az Si4432 OOK modulációval csak egy bit/szimbólum átvitelére képes.

Az OOK moduláció előnye, hogy a modulációs és a demodulációs folyamatok egyszerűen megvalósíthatók. Hátránya, hogy érzékeny az additív zajra.

FSK. Frequency Shift Keying (frekvenciabillentyűzés).

Az FSK modulációt a szinuszos vivőjel frekvenciája hordozza az információt. FSK jel esetén is beszélhetünk a szimbólumonkénti átvitt bit mennyiségéről, azonban itt a frekvencialépcsők száma (n) határozza meg a szimbólumonként átvitt bit ($\log_2(n)$) mennyiségét. Az Si4432 az FSK modulációval csak egy bit/szimbólum átvitelére képes, ezt bináris vagy



15. ÁBRA. FSK moduláció.

2-FSK-nak nevezzük. A bináris FSK esetén a két jelzési hullámforma („0”, „1”) matematikai leírása a kövekező:

$$f_0(t) = A \cos(2\pi f_c t - 2\pi f_d t), \quad f_1(t) = A \cos(2\pi f_c t + 2\pi f_d t), \quad (5)$$

ahol f_c – a vivőjel frekvenciája,

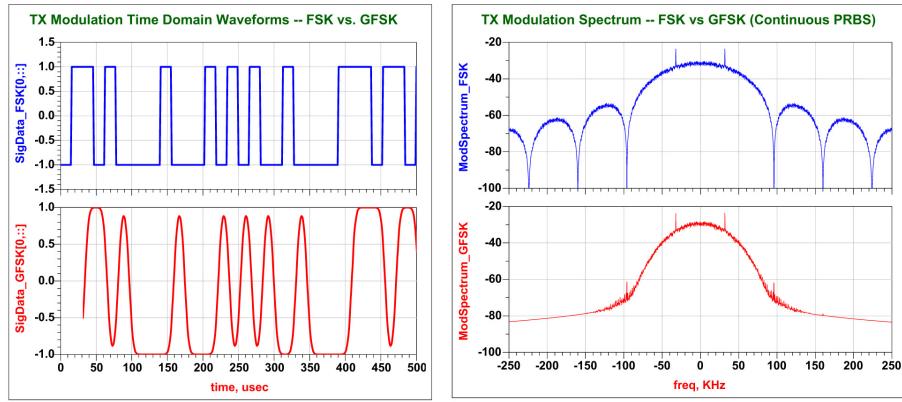
f_d – a frekvencialöket.

A frekvencialöket a pillanatnyi frekvencia maximális eltérése a modulálatlan vivőjel frekvenciájától [12]. A bináris adatokhoz tartozó FSK modulált alapsávi jelalak a 15. ábrán látható.

A frekvenciabillentyűzést főleg kis sebességű adatátviteli rendszerekben alkalmazzák. Előnyei közé tartozik a viszonylag egyszerű konstrukciós igény, ami főleg a lehetséges nemkoherens demodulálási lehetőségből fakad, hiszen a jelet egyszerűen a jelzési frekvencia mérésével lehet demodulálni, nincs szükség az adó és a vevő fázisszinkronizálására. Az FSK moduláció sávszélesség-igénye nagyobb, mint az OOK modulációé, viszont kevésbé érzékeny a rádiócsatorna csillapításának változására és az additív zajra, ezáltal kisebb adóteljesítmény is elég ugyanolyan bithiba-arány eléréséhez [1].

GFSK. Gaussian Frequency Shift Keying (Gaussi frekvenciabillentyűzés).

A GFSK moduláció szintén a digitális frekvenciamodulációs módok közé tartozik. Lényegében megegyezik az FSK modulációval, azzal a különbséggel, hogy a bináris moduláló jelet még a moduláció előtt keresztül vezetik egy aluláteresztő gaussi szűrőn. A gaussi szűrő lényege, hogy az információt tartalmazó négyeszögjel nagyfrekvenciás összetevőit kiszűri,



16. ÁBRA. GFSK moduláció [4].

ezzel csökkentve a modulált jel sávszélességét. A 16. ábra az FSK és a GFSK moduláció moduláló jelének alakjait és a modulált jel spektrumát ábrázolja. Az Si4432 három modulációs módja közül a GFSK moduláció nyújtja a legrobosztusabb, legmegbízhatóbb adatátvitelt.

4.3. A rádiós adatcsomag felépítése

Preamble (előszó) 10 bájt	Szinkron szó 4 bájt	Adathossz 1 bájt	Adat 0 – 63 bájt	CRC 2 bájt
------------------------------	------------------------	---------------------	---------------------	---------------

17. ÁBRA. A rádiós adatcsomag felépítése.

A rádiós adatcsomag szerkeze a 17. ábrán látható.

Az Si4432-ben a moduláló bináris adatjelnek kétféle forrása lehet: elérhetjük közvetlen módon az Si4432 SDI vagy egyik megfelelően beállított GPIO lábán, vagy közvetett módon a 64 bájtos FIFO¹⁶-n keresztül. Az adatok forrásának a FIFO-n keresztsüli adathozzáférést választottam, mert csak ebben az esetben használható az automatikus csomagkezelő. A csomagkezelő előnye, hogy nem kell gondoskodnunk a bit- és bájtszinkronizációról, valamint az Si4432 elvégzi a hibadetektálást is, így a mikrovezérlőnek elég az adatbájtokat betöltenie az Si4432 FIFO-jába. A csomag hosszát jelző bájtot is a csomagkezelő adja hozzá az adatcsomaghoz [4].

Az adatbájtok mennyiségétől függően a csomag mérete is dinamikusan változik, 17 és 80 bájt között. Az adatbájtokat soros porton keresztül küldhetjük a rádiókommunikációs modulnak, az adatbájtok maximális száma 63. A szoftvert úgy írtam meg, hogy a soros porton beérkező adatbájtok száma is maximum 63 lehet egyszerre. Az adatsebesség

¹⁶FIFO: First In First Out. Amit először írunk a regiszterbe, azt olvassa ki először.

1200 bit/másodperc, így 80 bájtos csomag esetén az adatátvitel $\frac{80 \cdot 8}{1200} \approx 0,53$ másodpercig tart.

A továbbiakban ismertetem az adatátvitel szinkronizációs folyamatát és a hibadetektálás módszerét.

4.3.1. Bitszinkron felépítése

Az adatátvitel szinkronizálásához először meg kell határoznunk a beérkező analóg jelben a szimbólum határait. A bitszinkron meghatározásához az adó minden kommunikációs folyamatot egy 0–1–0–1... bitsorozattal kezd, a vevőnek ebből az ismert bitsorozatból kell meghatározni a bithatárokat.

A 17. ábrán látható, hogy az adatcsomag első tíz bájtja (80 bit) tartalmazza a bitszinkron meghatározáshoz szükséges bitsorozatot. A vevőt úgy állítottam be, hogy a bitszinkron akkor épüljön fel, ha a vevő 32 egymás utáni 0–1 váltást érzékel. Azért van szükség ilyen hosszú bitszinkronizációs időre, mert a vevőben engedélyeztem az automatikus frekvenciaszabályzót (AFC¹⁷). Az automatikus frekvenciaszabályzó működésbe lépéséhez legalább 16 detektált bit szükséges. Az Si4432 adatlapjának ajánlása szerint FSK modulációval és az AFC engedélyezésével a bitszinkron kialakításához 20 bit detektálása szükséges, azonban ezzel a beállítással a tesztelés során csak minden második adatcsomagot kaptam meg, ezért a bitszinkronhoz szükséges detektált bitek számát 32-nek választottam.

4.3.2. Bájtszinkron felépítése

A bitszinkron felépítése után a vevő egy előre meghatározott bitsorozatot (szinkronszó) keres a bitfolyamban, hogy ennek segítségével meghatározza a bájthatárokat. A bájtszinkron meghatározásához legalább egy bájt hosszúságú szinkronszóra van szükség, azonban hosszabb szinkronszó esetén kisebb a valószínűsége, hogy zajos bemenet esetén is felépül a bájtszinkron. Túlzottan hosszú szinkronszó esetén viszont csökken a szinkronizáció valószínűsége az esetleges bithibák miatt. A szinkronszót úgy választottam meg, hogy minél több 0–1 váltás legyen benne, de jól megkülönböztethető legyen a bitszinkronhoz szükséges 0–1–0–1... sorozattól. Ezek figyelembevételével a következő négybájtos szinkronszót választottam: 0xD793C461, ez binárisan a 11010111100100111100010001100001 bitsorozatnak felel meg.

¹⁷Az adási és vételi frekvencia közti különbséget kompenzálja oly módon, hogy a vételi frekvenciát automatikusan átállítja az adási frekvenciára. Az adási és vételi frekvencia közti különbséget a vivőjelet előállító kvarckristály frekvenciájának relatív hibája okozhatja [4].

4.3.3. Hibadetektálás

Az átviteli csatorna okozta bithibák detektálásához az Si4432 által támogatott ciklikus redundancia ellenőrzés (CRC) funkcióját alkalmazom. A CRC ellenőrző összeg számítását az Si4432 automatikusan elvégzi az adatbájtok FIFO-ba történő betöltése után. Az ellenőrző összeg kétbájtos eredménye az adatcsomag végén helyezkedik el. Az adatátvitel után a vevő szintén elvégzi az adatbájtokra és a csomag hosszát tartalmazó bajtra a CRC ellenőrzést, majd az eredményt összehasonlítja a vett adatcsomag végén található összeggel. Ha a két eredmény egyezik, a csomag hosszát tartalmazó bajt és az adatbájtok bekerülnek a FIFO-ba, ha különbözik, az Si4432 eldobja az adatcsomagot.

A CRC összeg számításának elméleti alapja a következő: az ellenőrizni kívánt n -bites adatot egy $(n-1)$ -ed fokú polinomnak tekintjük. A polinomban az adott fokszámú tag akkor szerepel, ha a neki megfelelő sorszáմú bit értéke 1 (pl.: a 10101001 bitsorozathoz az $x^7+x^6+x^3+1$ polinom tartozik). Az így előállított polinomot elosztjuk egy előre meghatározott, általában sokkal kisebb fokszámú polinommal, amit generátor-polinomnak neveznek. Az osztás végeredményét eldobjuk, a maradék lesz az adat ciklikus redundanciakódja, ezt kell a vevőhöz továbbítani. Az Si4432 választható generátor-polinomjait a Függelék 7.2. szakasza tartalmazza. A tesztek során a CRC16-CCITT generátor-polinomot használtam, ezt a generátor-polinomot használja a Bluetooth és az IrDA¹⁸ kommunikációs protokoll is.

4.4. Adatátviteli folyamat

A rádiókommunikációs modul beállításainak ismertetése után vizsgáljuk meg a beágyazott szoftver működési folyamatát (18. ábra). Az áttekinthetőség érdekében a soros és a rádiós csomagok feldolgozásának folyamatát külön ábrázoltam (19., 20. ábra).

1. Start: a rádiókommunikációs modul indítása.
2. Inicializálás: ekkor történik meg a mikrovezérlő órajelének, digitális ki- és bemeneteinek, az UART és SPI moduljainak beállítása, valamint a rádiós adó-vevő áramkör alapértelmezett beállítása.
3. Az inicializálás után a rádiókommunikációs modul vételi állapotba (soros és rádiós vétel) kerül. A mikrovezérlő a rádiós és soros adatokat érkezési sorrendben dolgozza fel, tehát nincs prioritásbeli különbség közöttük.
4. Ha rádiós adat érkezett, az Si4432-es kiszámolja a beérkezett adatbitek CRC összegét.

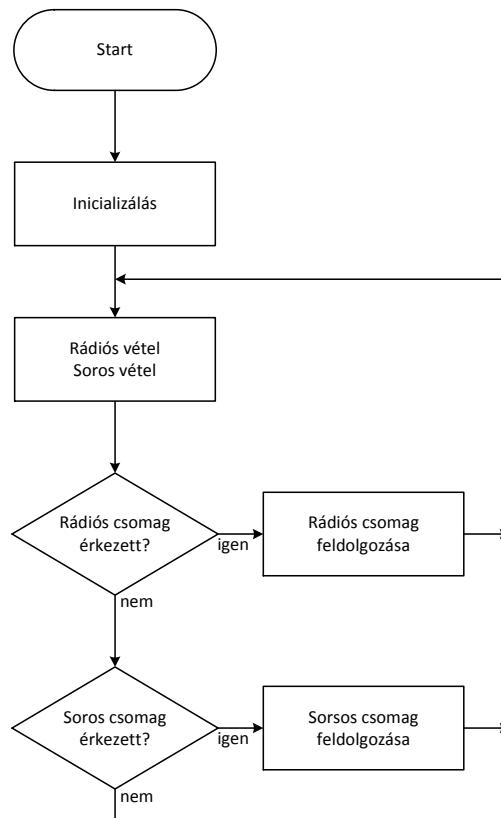
¹⁸IrDA: Infrared Data Association. Infravörös hullámhosszon működő adatátviteli protokoll.

5. Ha a kiszámolt CRC összeg egyezik az adatcsomag végén küldött CRC összeggel, a vevő rádiós nyugtát küld az adónak.
6. A rádiós nyugta elküldése után a vevő beolvassa a FIFO-ból a beérkezett rádiós adatcsomagot, soros porton továbbítja a vezérlő számítógépnek, majd visszatér vételi állapotba.
7. Ha 65 bájtnál kisebb méretű soros parancs érkezett, a mikrovezérlő beolvassa, majd a beolvasott adat alapján eldönti, hogy milyen feladatot kell végrehajtania, ellenkező esetben visszatér vételi állapotba.
8. Ha a beolvasott karaktersorozat egyenlő a *register* karaktersorozattal, akkor a mikrovezérlő kiolvassa és soros porton elküldi a vezérlő számítógépnek az Si4432-es 128 belső regisztereinek tartalmát, majd visszatér vételi állapotba.
9. Ha a beolvasott karaktersorozat egyenlő a *config* karaktersorozattal, akkor a mikrovezérlő belép a konfigurációs módba. Ebben a módban a mikrovezérlő csak a soros porton érkező adatokat dolgozza fel. Amennyiben helyes konfigurációs parancs érkezik (*ook*, *fsk*, *gfsk*), úgy a mikrovezérlő utasítja az Si4432-est a parancsnak megfelelő rádiós beállítások végrehajtására. Konfigurációs módból az *exit* parancsszóval lehet kilépni.
10. Ha a beolvasott karaktersorozat kezdő karaktere & és utolsó karaktere *, akkor az & és * közti karaktereket a modul rádiósan kisugározza.
11. A rádiós adatküldés után az adó várakozik a vevő nyugtájára, ha a nyugta megérkezett, a rádiókommunikációs modul visszatér vételi állapotba, ha a nyugta nem érkezett meg, a mikrovezérlő soros porton jelzi hiányát, majd visszatér vételi állapotba.

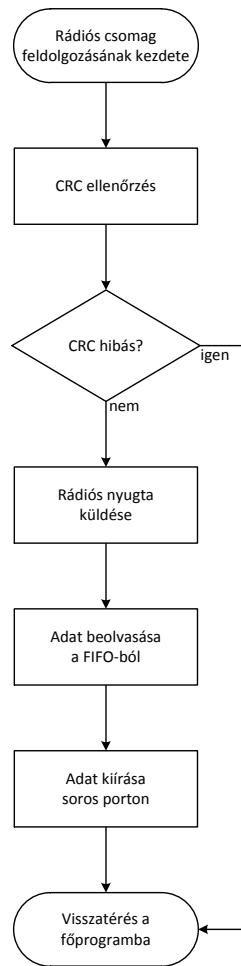
A soros vezérlőparancsokhoz tartozó jelentések a 7. táblázat tartalmazza.

Soros vezérlőparancs	Jelentés	Megjegyzés
<i>register</i>	Kiolvassa az Si4432 regisztereinek tartalmát	Konfigurációs módból nem érhető el
<i>config</i>	Belépés konfigurációs módba	—
<i>&adat*</i>	Rádión kisugározza az <i>adat</i> -ot	Konfigurációs módból nem érhető el
<i>ook</i>	OOK moduláció használata	Csak konfigurációs módból érhető el
<i>fsk</i>	FSK moduláció használata	Csak konfigurációs módból érhető el
<i>gfsk</i>	GFSK moduláció használata	Csak konfigurációs módból érhető el
<i>exit</i>	Kilépés konfigurációs módból	Csak konfigurációs módból érhető el

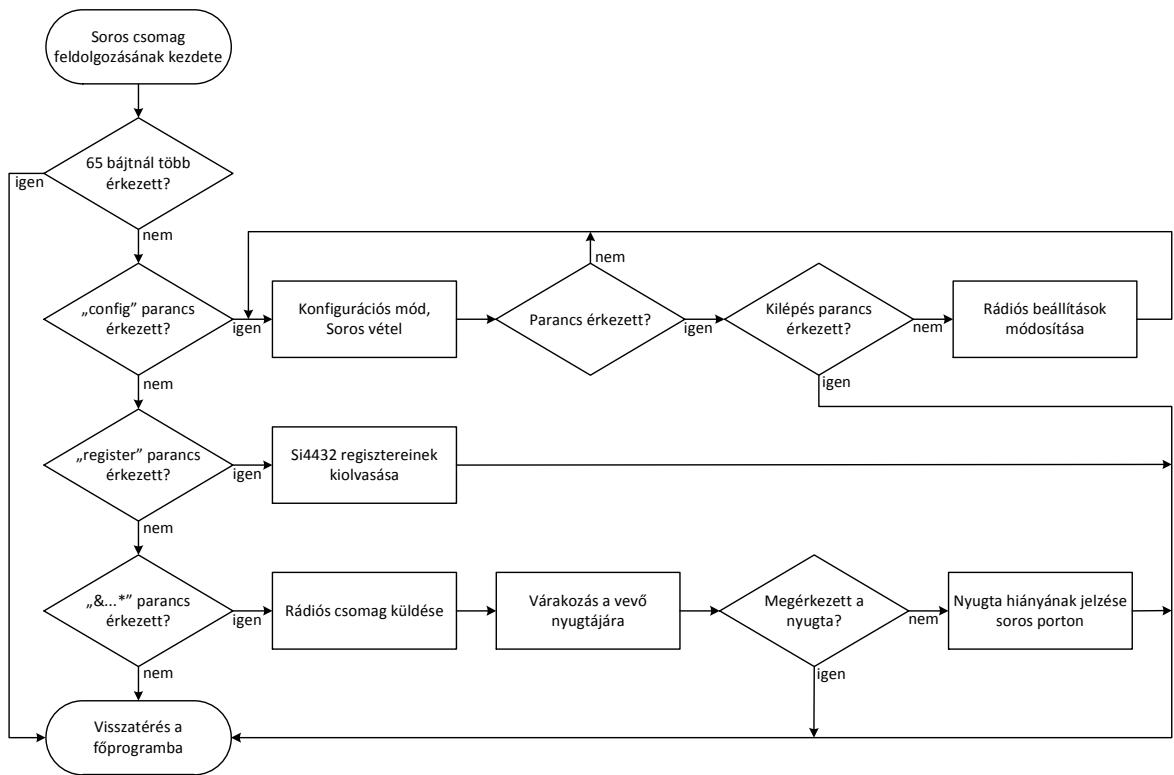
7. TÁBLÁZAT. Soros vezérlőparancsok.



18. ÁBRA. A szoftveres működési folyamat vázlata.



19. ÁBRA. A rádiós kommunikáció folyamata.



20. ÁBRA. A soros kommunikáció folyamata.

5. Tesztek, mérések

5.1. Hardver tesztek

5.1.1. Energiaellátó rendszer tesztelése

Az energiaellátó rendszer tesztelése során három mérést végeztem el. Megmértem a huzalozott VAGY-kapcsolatot megvalósító Schottky-diódák nyitófeszültségét, a kapcsolóüzemű feszültségsökkentő átalakító működésének alsó feszültséghatárát és teszteltem, hogy különböző értékű ellenállásokkal való terhelés során változik-e az energiaellátó rendszer kimenő feszültsége.

Az üzemi feszültség alsó határának mérése. A minimális működési feszültség meghatározása előtt multiméter segítségével megmértem az energiaellátó rendszer Schottky-diódáinak nyitófeszültségét. Mindkét Schottky-dióda nyitófeszültsége 0,23 V.

Az üzemi feszültség alsó határának mérését a következő módon végeztem: a mikrovezérlő szoftverét úgy módosítottam, hogy az inicializálás után a piros és zöld LED-ek égve maradjanak. A tápegység feszültségét 5 V-ra állítottam, majd csatlakoztattam hozzá a rádiókommunikációs modult. A tápegység feszültségét folyamatosan csökkentettem addig, amíg a LED-ek elaludtak, a mérés során a tápegység feszültségét multiméterrel figyeltem. A kikapcsolás előtti pillanatban mért feszültség értékéből le kell vonnunk a dióda nyitófeszültségét, hogy megkapjuk az MCP16301-es alsó működési feszültséghatárát. A működési feszültség alsó határát a 8. táblázat tartalmazza.

	Tápegység feszültsége	MCP16301 bemenő feszültsége
Modul 1	4,17 V	3,94 V
Modul 2	4,06 V	3,83 V

8. TÁBLÁZAT. Az energiaellátó rendszer alsó működési feszültséghatára.

Az energiaellátó rendszer tesztelése műterheléssel. A mérés ismertetése előtt határozzuk meg a terhelő ellenállások értékét. Az energiaellátó rendszer kimenő feszültsége állandó 3,3 V, maximális kimenő árama 600 mA, tehát a maximális kimenő teljesítmény $3,3 \cdot 0,6 = 1,98$ Watt. A méréshez olyan ellenállású 2 Wattos teljesítmény-ellenállásokat választottam, hogy az energiaellátó rendszer kimenő árama a maximális 600 mA 92, 55, és 25 %-a legyen (azért választottam ezeket az értékeket, mert a boltban csak szabványos értékű ellenállásokat lehet kapni). Az ilyen terhelő áramhoz szükséges ellenállások értéke az Ohm-törvény alapján 6Ω , 10Ω , 22Ω .

A tesztelést még a fejlesztés során, a vezérlőegység és a rádiós adó-vevő áramkör beforrasztása előtt végeztem, mert így nem kellett figyelembe vennem a többi áramköri elem terhelő ellenállását. A terhelő ellenállás egyik lábát az energiaellátó rendszer föld kimenetére forrasztottam, a másik lába és a táp kimenet közé árammérőt kötöttem. Az 5 V-os tápegység csatlakoztatása után folyamatosan mértem az ellenálláson eső feszültség értékét. A tesztet mindenkor ellenállással, valamint üresjárás (a táp és a föld közé nem kötöttem semmit, azaz szakadás volt köztük) esetén is elvégeztem. A mérési eredményeket a 9. táblázat tartalmazza.

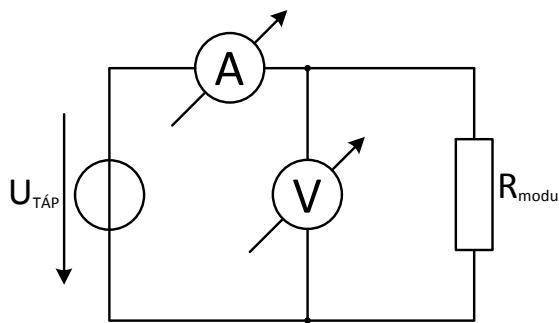
	Ellenállás	Áramerősség	Feszültség	Teljesítmény
Üresjárás	∞	—	3,28 V	—
1. eset	6 Ω	543 mA	3,27 V	1,76 W
2. eset	10 Ω	346 mA	3,27 V	1,13 W
3. eset	22 Ω	147 mA	3,27 V	0,48 W

9. TÁBLÁZAT. Az energiaellátó rendszer műterheléses tesztjének eredményei.

A mérési eredményekből megállapítható, hogy az energiaellátó rendszer a különböző ellenállásokkal való terhelés esetén is ugyanazt a kimenő feszültséget biztosítja, mint üresjárás esetén.

5.1.2. Fogyasztás mérése

A hardver- és szoftverfejlesztési munka befejezése után megmértem a rádiókommunikációs modul fő egységeinek fogyasztását. A mérési elrendezést a 21. ábra mutatja.



21. ÁBRA. A fogyasztás mérésének mérési összeállítása.

Az R_{modul} ellenállás a teljes rádiókommunikációs modul eredő ellenállása. A mikrovezérlő és a rádiós adó-vevő áramkör egyenkénti fogyasztásának megméréséhez ki kellett

volna forrasztanom a többi, a működéshez nélkülözhető áramkör elemet a mérés idejére. Ehelyett a megoldás helyett inkább azt választottam, hogy az Si4432-t szoftveresen tétlen állapotba kapcsoltam, ekkor a fogyasztása a vonatkozó adatlapi adatok alapján 0,6 mA. Ezután multiméterrel megmértem a rádiókommunikációs modulon átfolyó áramot, majd levontam belőle 0,6 mA-t, így megkaptam a mikrovezérlő és az MCP16301 fogyasztását. Ebből az értékből még levontam az MCP16301 adatlapi adatok alapján számolt fogyasztását, hogy megkapjam a mikrovezérlő fogyasztását. Ezután megmértem a rádiókommunikációs modul fogyasztását rádiós vétel és rádiós adás (11 dBm-es teljesítménnyel) közben is, ebből levonva a mikrovezérlő és az MCP16301 fogyasztását megkaptam a rádiós adó-vevő áramkör fogyasztását ebben a két esetben.

A soros jelszintillesztő fogyasztását is megmértem, szintén a 21. ábrán látható elrendezésben. Ekkor az R_{modul} ellenállás a soros jelszintillesztő áramkör ellenállását jelenti.

A mérési eredményeket a 10. és a 11. táblázat tartalmazza, a fogyasztási adatokat csak teljesítményben adtam meg, mivel az adatlapok a 3,3 V-os működési feszültséghez tartozó áramokat adják meg, a mérést viszont 5 V-os tápfeszültségen végeztem.

	MCP16301 (számolt)	Mikrovezérlő (számolt/mért)	Si4432 vétel (számolt/mért)	Si4432 adás (számolt/mért)	Σ adó mód (számolt/mért)
Modul 1	6,6 mW	13,2/28,9 mW	61,1/72 mW	89,1/128,5 mW	108,9/164 mW
Modul 2	6,6 mW	13,2/29,4 mW	61,1/72 mW	89,1/127,5 mW	108,9/163 mW

10. TÁBLÁZAT. A rádiókommunikációs modul fogyasztási adatai [3, 4, 5].

	Fogyasztás	
	számolt	mért
Soros jelszintillesztő 1	1 mW	1,12 mW
Soros jelszintillesztő 2	1 mW	1,32 mW

11. TÁBLÁZAT. A soros jelszintillesztő fogyasztási adatai [8].

A 10. és 11. táblázatból látható, hogy a mért fogyasztási eredmények eltérnek az előzetesen számolt eredményektől. Ennek egyik oka, hogy a számolás során nem vettet figyelembe a hardveren található passzív elemek veszteségét.

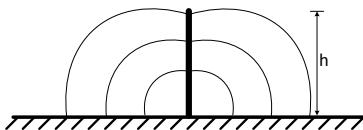
5.2. Rádiófrekvenciás tesztek

5.2.1. Mérési környezet

A rádiós adatátviteli tesztek előtt ismertetem a mérés és a későbbi felhasználás során használt antennákat, illetve a mérési környezetet. A méréseket a V2 épület 7. emeleti folyosóján végeztem. A folyosó szélessége 1,5 méter, magassága 2,3 méter. Az adó- és vevőantennákat a folyosó közepén helyeztem el egymástól 24 méteres távolságban¹⁹. Az antennák között közvetlen rálátás volt.

Antenna. Az antenna elektromágneses hullámok kisugárzására és vételére alkalmas eszköz. Az antenna rendszertechnikailag a tápvonal és a szabad tér közötti transzformátor, amely a tápvonalon hozzávezetett energiát kisugárzott elektromágneses hullámmá (adóantenna), az antennára beeső elektromágneses hullámot pedig vezetett hullámmá alakítja (vevőantenna) [1].

A méréshez és a rádiókommunikációs modul gyakorlati felhasználásához monopól antennákat használtam. A monopól antenna (ideális esetben) egy végtelen kiterjedésű vezető síkfelületre (föld) merőleges, véges hosszúságú egyenes vezető. A monopól antenna egy lehetséges elektromágneses térelrendeződése látható a 22. ábrán.



22. ÁBRA. Monopól antenna elektromágneses tere.

A monopól antenna hossza (h) és rezonanciafrekvenciája között szoros az összefüggés. A méréshez felhasznált monopól antenna hosszát úgy kellett beállítanom, hogy a rezonanciafrekvenciája 433 MHz-en legyen. A 433 MHz-hez tartozó hosszúságot a következő módszerrel állítottam be: hálózatanalizátorhoz csatlakoztattam az antennát, majd az antenna hosszának változtatása közben figyeltem a hálózatanalizátor által mért bemeneti reflexió értékét (S_{11}). Az antenna hosszát addig változtattam, amíg a bemeneti reflexió értéke a lehető legkisebb lett 433 MHz-en. A mérést elvégeztem a rádiókommunikációs modul gyakorlati felhasználásához használt fix hosszúságú monopól antennán is.

A beállított hosszúságú és a fix monopól antenna adatait a 12. táblázat tartalmazza. Az antennákhoz több rezonanciafrekvencia is tartozik, ezek ismertetésétől most eltekintek.

¹⁹Rádiós mérések során az antennák közti távolságnak minimum öt hullámhossznyinak (5λ) kell lennie. Ekkora távolságnál már csak az antenna elektromágneses terének távoltéri komponensei dominálnak. A 433 MHz-es vivőfrekvencia esetén a minimális mérési távolság $5 \cdot 0,69 = 3,45$ m [13, 14].

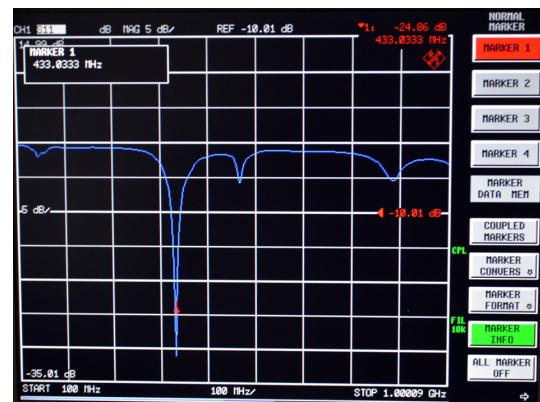
Antenna	Magasság	Frekvencia	Bemeneti reflexió
Változtatható hosszúságú monopól	$0,375 \text{ m} \approx \frac{\lambda}{2}$	433 MHz	< -30 dB
Fix hosszúságú monopól (gyári)	$0,086 \text{ m} \approx \frac{\lambda}{8}$	433 MHz	< -24 dB

12. TÁBLÁZAT. A monopól antennák adatai.

A két monopól antenna és az antennák bemeneti reflexiója a 23. és a 24. ábrán láthatók.



(a) SMA csatlakozós gyári monopól antenna.

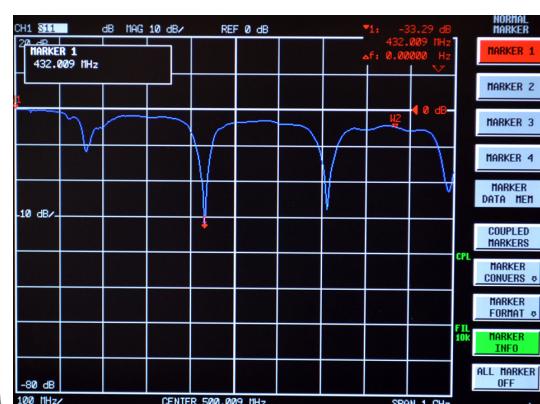


(b) Az antenna bemeneti reflexiója.

23. ÁBRA. A gyári monopól antenna és bemeneti reflexiója.



(a) A méréshez használt monopól antenna.



(b) Az antenna bemeneti reflexiója.

24. ÁBRA. A méréshez használt monopól antenna és bemeneti reflexiója.

Az antennák további fontos jellemzője az irányhatás és a nyereség. Az antenna irányhatásán a főirányban kisugárzott teljesítménysűrűség és az azonos teljesítményt kisugárzó izotrop antenna teljesítménysűrűségének hányadosát értjük [1].

$$D = \frac{S_{max}}{S_0}, \quad (6)$$

ahol $S_0 = \frac{P_{ki}}{4\pi r^2}$.

Az antenna nyereségén a főirányban kisugárzott teljesítménysűrűség és az azonos bemenő teljesítményű izotrop antenna teljesítménysűrűségének hányadosát értjük [1]:

$$G = \frac{S_{max}}{S_0}, \quad (7)$$

ahol $S_0 = \frac{P_{be}}{4\pi r^2}$.

A két egyenlet közti kapcsolatot az antenna hatásfokával fejezzhetjük ki. Az antenna hatásfoka a definíció szerint [1]:

$$\eta = \frac{G}{D} = \frac{P_{ki}}{P_{be}}, \quad (8)$$

Az antenna irányhatásának és nyereségének megmérése nem része a feladatomnak, valamint a mérés elvégzéséhez nem álltak rendelkezésemre a megfelelő berendezések, illetve mérési környezet (elektromágnesesen árnyékolt mérőszoba). Mivel az antenna nyeresége és hatásfoka sem ismert, ezért a további számítások elvégzéséhez feltételeztem, hogy az adó- és vevőantenna nyeresége 0 dB.

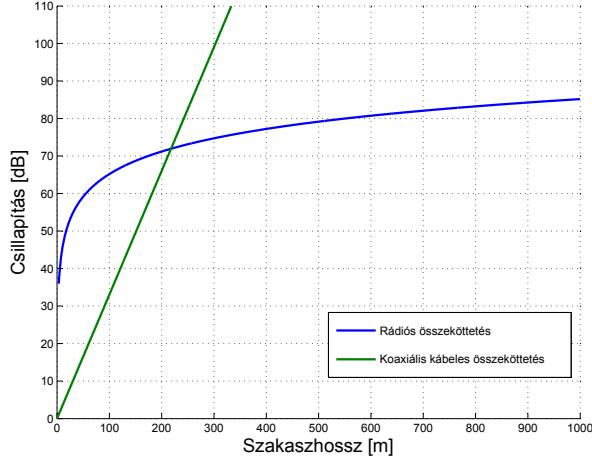
Szakaszcsillapítás. Az adóantennából kisugárzott elektromágneses hullámok minden esetben csillapítást szenvednek, mire a vevőantennához érnek. Ezt a csillapítást szakaszcsillapításnak nevezzük. A szakaszcsillapítást a következőképpen értelmezzük:

$$a_{sz}^{dB} = 10 \cdot \lg \frac{P_{be}}{P_{ki}}, \quad (9)$$

ahol P_{be} az adóantennába betáplált teljesítmény, P_{ki} a vevőantennából kivehető maximális hatásos teljesítmény. Mivel a rádiócsatornában a rádióhullámok szabadtéri terjedéssel terjednek, ezért a szakaszcsillapítást elsősorban az adó- és vevőantenna között elhelyezkedő közeg tulajdonságai határozzák meg. Mivel az adó- és vevőantenna is a rádiócsatorna része, ezért a szakaszcsillapítás ezek függvényében is felírható:

$$a_{sz}^{dB} = 10 \lg \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 - (G_A^{dB} + G_V^{dB}), \quad (10)$$

ahol r az adó- és vevőantenna távolsága (szakaszhossz), λ a hullámhossz, G_A^{dB} az adó-antenna, míg G_V^{dB} a vevőantenna nyeresége decibelben. A $10\lg\left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right)^2$ kifejezést szabadtéri csillapításnak (a_0) nevezzük. Látható, hogy a szabadtéri csillapítás a távolság négyzetével egyenesen arányos [1, 14].



25. ÁBRA. A szakaszcsillapítás 433 MHz-en.

A 25. ábrán a rádiós, illetve – összehasonlításképpen – a koaxiális összeköttetés²⁰ csillapítása látható a távolság függvényében, 433 MHz-en. A hullámhossz értékét a következő egyenletből számolhatjuk ki: $\lambda = \frac{c}{f}$, ahol c a fénysebesség ($3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$), f a frekvencia. A vonatkozó mennyiségek behelyettesítésével $\lambda = 0,693 \text{ m}$ adódott.

A két antenna közti szakaszcsillapítás elméleti értéke 0 dB-es nyereséggel számolva 52,8 dB. A 5.2.2. szakaszban bemutatott mérés alapján a valós szabadtéri csillapítás értékére 59 dB adódott. Ennek lehetséges magyarázata például az, hogy a mérési környezetünk nem ideális, a vevőantennán nem csak a közvetlen hullám, hanem a folyosó falairól visszavert hullámok is megjelennek. A közvetlen és a visszavert hullámok a vevőantennán összegződnek, bizonyos fázisviszonyok mellett gyengíthetik, vagy akár ki is olthatják egymást. A mérési környezet által beiktatott és a környezet okozta csillapítás közti pontosabb összefüggések megértéséhez ismertetem a Fresnel-zóna fogalmát [14].

Fresnel-zóna, Fresnel-ellipszoidok. Azon pontok mértani helyét, amelyekről az elektromágneses hullám visszaverődése $\frac{\lambda}{2}$ vagy többszörösei útkülönbséggel történik Fresnel-ellipszoidnak nevezzük. Attól függően, hogy a közvetlen hullámhoz képest a visszavert hullám útkülönbsége a félhullámhossz hányosorosát, vagyis 1., 2., 3. stb. szorosát

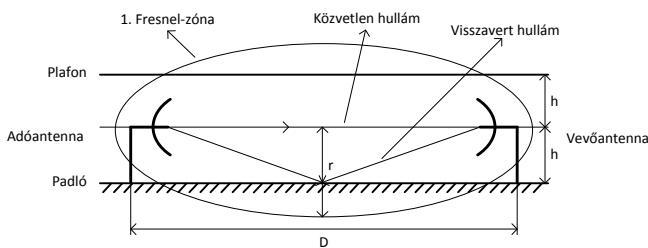
²⁰A mérésekhez RG58 típusú koaxiális kábeleket használtam, ezek csillapítása 33 dB 100 méterenként 433 MHz-en

mutatja, beszélünk az 1., 2., 3. stb. Fresnel-zónáról. A visszaverődéskor fellépő 180° -os fázisugrás figyelembe vételevel, a páratlan $\frac{\lambda}{2}$ többszörösökhez kismértékű erősödés, a páros többszörösökhez csillapítás (sík felületről való visszaverődés esetén akár 20–30 dB) tartozik. A páratlan Fresnel-zónákról a visszaverődés a félhullámhosszban kifejezett útkülönbség páratlan egész számú többszöröseivel adható meg. Az ilyen visszaverődés – főleg az első Fresnel-zónáról – az eredőjel kismértékű erősödését okozza. A páros Fresnel-zónákról való visszaverődés az eredőjel csillapítását okozza. Tehát már az első Fresnel-zónába benyúló akadályok a szabadtéri esethez képest jelentős csillapítástöbbletet okoznak. Ha az akadály a két antennától azonos távolságra van, akkor az első Fresnel-ellipszoid kistengelyének sugarát a következő egyenletből számíthatjuk ki:

$$r = 8,657 \sqrt{\frac{D}{f}}, \quad (11)$$

ahol r a kistengely sugara méterben, D az antennák távolsága kilométerben, f a frekvencia gigahertzben [14]. A behelyettesítések után r értékére 2,04 m adódott.

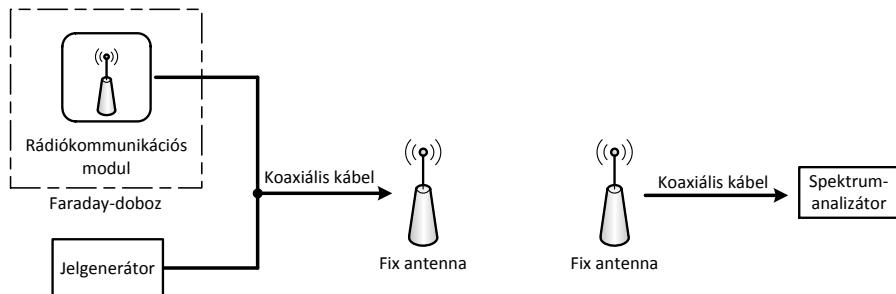
A folyosó méreteiből következik, hogy a mérés során az első Fresnel-zóna nem volt „tiszta”, tehát a szakaszcsillapítás elméleti és gyakorlati értéke közti különbséget (12,2 dB) feltehetőleg a rádiócsatornában lévő akadályok okozták. A mérési környezetre vonatkozó hullámterjedési viszonyok a 26. ábrán láthatók. A rádiócsatorna hullámterjedési viszonyainak pontos megméréséhez nem álltak rendelkezésemre a megfelelő eszközök (az impulzusválasz mérésére nem volt lehetőség).



26. ÁBRA. A mérési környezet hullámterjedési viszonyai.

5.2.2. Lesugárzott teljesítmény mérése összehasonlító módszerrel

A mérés előtt módosítottam a rádiókommunikációs modul szoftverét oly módon, hogy a jobboldali nyomógomb megnyomásakor a rádiós adó-vevő áramkör csak a modulálatlan szinuszos vivőjelet sugározza ki 433 MHz-en, a baloldali nyomógomb megnyomásakor pedig abbahagyja az adást.



27. ÁBRA. A lesugárzott teljesítmény mérési elrendezése.

A lesugárzott teljesítmény mérésének mérési elrendezése a 27. ábrán látható. Először ismert adóteljesítményű jelgenerátorral (11 dBm, a rádiókommunikációs modulok is ekkora teljesítménnyel sugároznak) és kalibrált és hitelesített spektrumanalizátorral mértem a mérés során felhasznált koaxiális kábelek és csatlakozó átalakítók veszteségét (2,7 dB), majd megmértem a teljes rádiócsatorna csillapítását, ebből levonva a kábelek és a csatlakozók veszteségét megkaptam az adó- és vevőantenna be- és kimeneti pontjai közti szakaszcsillapítást. A szakaszcsillapítás értéke 59 dB.

Ezután az adóantenna bemenetére a jelgenerátor helyett a rádiókommunikációs modult csatlakoztattam, adó üzemmódba kapcsoltam és spektrumanalizátorral mértem a lesugárzott teljesítményt. A mérést minden rádiókommunikációs modullal elvégeztem. A mért eredményekhez hozzáadtam a rádiókommunikációs modul és az adóantenna közti koaxiális összeköttetésének veszteségét (1,5 dB). Az eredményeket a 13. táblázat foglalja össze.

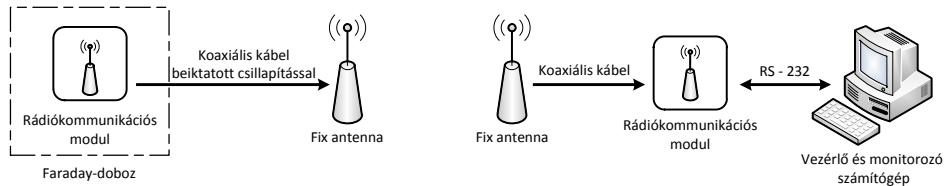
Adó eszköz	Adóteljesítmény	Vett teljesítmény	Lesugárzott teljesítmény
Jelgenerátor	11 dBm	-50,7 dBm	11 dBm
Modul 1	11 dBm	-62,7 dBm	-0,5 dBm
Modul 2	11 dBm	-56,4 dBm	4,2 dBm

13. TÁBLÁZAT. Lesugárzott teljesítménymérés eredményei.

A mérési eredmények szinte tökéletesen megegyeznek a szűrőillesztés során közvetlen koaxiális összeköttetéssel mért lesugárzott teljesítménnyel.

5.2.3. Csomaghiba-arány

A csomaghiba-arány méréséhez a szoftvert úgy módosítottam, hogy a jobboldali nyomógomb lenyomására a rádiókommunikációs modul kisugározza az előre meghatározott



28. ÁBRA. A csomaghiba-arány mérési elrendezése.

számú és tartalmú adatcsomagokat. A vevő modul szoftverét úgy állítottam be, hogy a megfelelő soros parancs beírásakor soros porton kiírja a hibátlanul megérkezett csomagok számát. A CRC ellenőrzést minden két rádiókommunikációs modulon engedélyeztem, így nem kellett külön megvizsgálnom, hogy hibátlanul érkezett-e meg az adatcsomag. A tesztet a 28. ábrán látható elrendezésben végeztem, adó oldalon a Modul 2, vevő oldalon a Modul 1 volt. Azért alkalmaztam ezt az elrendezést, mert a Modul 2 lesugárzott teljesítménye nagyobb. Idő hiányában fordított elrendezésben nem végeztem el a mérést.

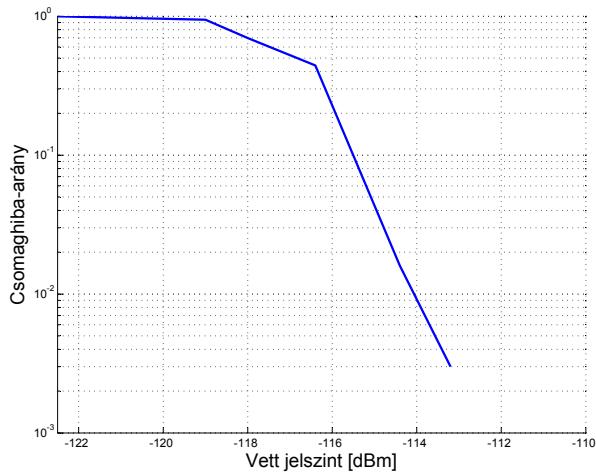
A csomaghiba-arány mérése előtt megnéztem az Si4432 adatlapjában feltüntetett vevő-érzékenységet. A vevő érzékenysége 5 kHz-es frekvencialöketű GFSK modulációval 2 kbps-os adatsebességgel maximum 1 %-os bithiba-arány mellett -118 dBm [4]. Az adatlap az érzékenységet az Si4432 bemeneti lábára jutó teljesítményben határozza meg. Ehhez az értékhez még hozzá kell vennem az alul- és felüláteresztő szűrőkön eső teljesítmény veszteségét. Feltételeztem, hogy ez a veszteség körülbelül 10 dB, így az első mérésnél akkora beiktatott csillapítást²¹ tettem a jelútba, hogy a vevőantennára jutó teljesítmény nagysága -108 dB körül legyen. Ebben az esetben a csomagok 100 %-a megérkezett a vevőhöz. A csillapítás értékének folyamatos növelése mellett újra és újra elvégeztem a mérést addig, amíg már egy csomag sem érkezett meg a vevőhöz.

A mérést 50 kHz-es frekvencialöketű GFSK modulációval, 1,2 kbps-os adatsebesség mellett végeztem. A mérés eredményét MATLAB-ban ábrázoltam, a csomaghiba-arány grafikonja a 29. ábrán látható.

5.2.4. Vevő érzékenység

A vevő érzékenységének meghatározásához ugyanazt a szoftverbeállítást és mérési elrendezést alkalmaztam, mint a csomaghiba-arány méréséhez (28. ábra). A vevő érzékenysége alatt ebben az esetben a szűrő áramkör bemenetére jutó teljesítményt értem. E teljesítmény és az adatlapban megadott ugyanilyen rádiós beállításokra vonatkozó érzékenység ismeretében kiszámolható a szűrő áramkör vesztesége.

²¹A méréshez csak 20, 10, 6, és 3 dB-es csillapítók álltak a rendelkezésemre. A csillapítók sorbakötésével alakítottam ki a méréshez szükséges csillapításértékeket.



29. ÁBRA. Csomaghiba-arány GFSK moduláció esetén 19 bájtos csomagméréttel.

Az Si4432 adatlapja maximum 1 %-os bithiba-arány mellett adja meg a vevő érzékenységét. Az átvitel bithiba-arányát azonban nem tudom megmérni, mert ha a bit és bájtszinkron felépítéséhez használt bitek közül hibásodik meg valamelyik, akkor az Si4432 eldobja az egész adatcsomagot. Tehát valamilyen összefüggést kell találnunk a bit- és csomaghiba-arány között, hogy összehasonlíthassuk az adatlapban megadott és a mérésből meghatározott vevőérzékenységet.

A teljes adatcsomag hossza 19 bájt, egy bit meghibásodása esetén a bithiba-arány $\frac{1}{19 \cdot 8} \approx 0,66\%$. Mivel az adatcsomagok kis méretűek, ezért tegyük fel, hogy kis valószínűségeknél a csomag- és bithiba-arány megegyezik. Tehát 0,66 %-os csomaghiba-arány esetén az eldobott csomagokban csak egy bit hibásodott meg.

A feltételezések után a vevő érzékenységét a 0,66 %-os csomaghiba-arányhoz tartozó vételi jelteljesítményben határoztam meg. A csomaghiba-arány grafikonjának a 0,66 %-hoz tartozó teljesítményértéke -113,5 dBm, ez a vevő érzékenysége.

A vevőérzékenység ismeretében a szűrő áramkör vesztesége körülbelül $118 - 113,5 = 4,5$ dB. Mivel az adatlap a vevőérzékenységet nagyobb adatsebesség és kisebb frekvencialöket mellett adta meg, – valamint azt csak feltételeztem, hogy kis csomaghiba-aránynál a bit- és csomaghiba-arány megegyezik – ezért ez az érték a gyakorlatban valószínűleg pár dB-vel nagyobb.

6. Összefoglalás

6.1. A fejlesztés értékelése

A fejlesztés eredményeképp elkészült az oktatásra célokra szánt rádiós adatkommunikációt megvalósító rádiókommunikációs modul prototípusa. A rádiókommunikációs modulnak a következő paramétereket kell teljesítenie:

- Vivőfrekvencia: 433 MHz.
- Adatsebesség: 1200 bit/másodperc.
- Moduláció: FSK.
- Számítógépes vezérlés biztosítása soros porton keresztül.
- Alacsony fogyasztás.
- Bővíthető hardver.

A rádiókommunikációs modul hardvertervezésének első lépéseként megvizsgáltam a lehetséges áramköri elemek tulajdonságait, majd kiválasztottam a feladatra legalkalmasabbakat. Az áramköri elemek kiválasztása után az Altium Designer nevű számítógépes program segítségével megterveztem a rádiókommunikációs modul kapcsolási rajzát és nyomtatott áramköri tervét.

Számítógépes szimulációval meghatároztam a rádiókommunikációs modul nagyfrekenciás (433 MHz) szűrőáramkör elemeinek értékét, majd a valós kialakításban ezen elemek értékeinek bizonyos változtatásával illesztettem a szűrőáramkört.

A vezérlő számítógép és a mikrovezérlő soros protokolljai a fizikai rétegen eltérnek (különböző jelszintek tartoznak azonos logikai értékekhez), ezért jelszintillesztő áramkört alkalmaztam. A jelszintillesztő áramkör nyomtatott áramkörét otthoni körülmények között, „vasalásos technikával” gyártottam.

A beágyazott szoftverben megvalósítottam a mikrovezérlő–rádiós adó–vevő áramkör (SPI) és a mikrovezérlő–vezérlő számítógép (UART) közti soros adatkommunikációt. Megvizsgáltam a rádiós adó–vevő áramkör lehetséges modulációit. A moduláció típusát a vezérlő számítógépen kiadott megfelelő soros parancsokkal tudjuk kiválasztani. A rádiós és soros adatcsomag mérete bizonyos határok között dinamikusan változtatható, maximum 65 bájt soros és 63 bájt rádiós adat küldhető el egyszerre.

A tesztelés során először a rádiókommunikációs modul hardverét vizsgáltam. A hardver kialakításáról és mérési eredményekről elmondható, hogy megfelelnek a feladat elvárásainak. A rádiós adatátvitelre vonatkozó tesztek előtt megvizsgáltam a teszteléshez és a

későbbi felhasználáshoz használt antennákat és a mérési környezetet, majd ezek ismeretében értékeltem a mérési eredményeket.

A fejlesztés összességében sikeres volt, a rádiókommunikációs modul prototípusa maradéktalanul teljesíti a feladatban kitűzött célokat. A továbbiakban ismertetem az oktatási célokra használt végleges rendszerhez szükséges fejlesztéseket, valamint az egyéb továbbfejlesztési lehetőségeket.

6.2. Továbbfejlesztési lehetőségek, távlati célok

A későbbiekbén célszerű lenne úgy áttervezni a rádiós adó-vevő áramkört, hogy külön antenna biztosítsa a rádiós adást és vételt. Ehhez szükség van a nagyfrekvenciás szűrő áramkör újratervezésére, viszont ebben az esetben – mivel két egymástól független szűrő áramkör van – jobban hangolhatók a szűrők.

További fejlesztési lehetőség, hogy a vezérlő számítógéppel való kommunikációt ne soros, hanem USB protokollon keresztül valósítsuk meg.

Jelenleg a *Terminal* nevű programmal – több utasítás kiadásával – tudom vezérelni a rádiókommunikációs modult. A rendszer vezérelhetőségének megkönnyítése érdekében célszerű lenne egy olyan számítógépes célszoftver fejlesztése, mellyel soros porton keresztül (vagy akár USB porton) „gombnyomásra” átkonfigurálhatók lennének a rádiós beállítások, valamint célszerű lenne még a számítógépes szoftverben kialakítani és lekezelni a rádiós adatcsomag összeállítását.

A rendszer oktatási célú felhasználása előtt mindenkorán le kell tesztelnünk az összes bemutatni kívánt rádiós beállítás tulajdonságait. A tesztekhez tartozó beállításokat szintén célszerű lenne számítógépes szoftverrel vezérelni, így szinte azonnal elvégezhetőek lennének a mérések a megfelelő mérési környezet biztosítása után.

Egyéni céлом oly módon továbbfejleszteni a rendszert, hogy az alkalmas legyen beszédátvitelre is.

7. Függelék

7.1. Az ISM sáv csatornakiosztása Magyarországon

Frekvenciasáv	Sávszélesség	Középfrekvencia
6,765 - 6,795 MHz	30 kHz	6,780 MHz
13,553 - 13,567 MHz	14 kHz	13,560 MHz
26,957 - 27,283 MHz	326 kHz	27,120 MHz
40,660 - 40,700 MHz	40 kHz	40,680 MHz
433,050 - 434,790 MHz	1,84 MHz	433,920 MHz
863,000 - 870,000 MHz	7 MHz	866,500 MHz
2400,000 - 2483,000 MHz	83,5 MHz	2441,750 MHz
5725,000 - 5875,000 MHz	150 MHz	5800,000 MHz
24,000 - 24,250 GHz	250 MHz	24,125 GHz
61,000 - 61,500 GHz	500 MHz	61,250 GHz
122,000 - 123,000 GHz	1 GHz	122,500 GHz
244,000 - 246,000 GHz	2 GHz	245,000 GHz

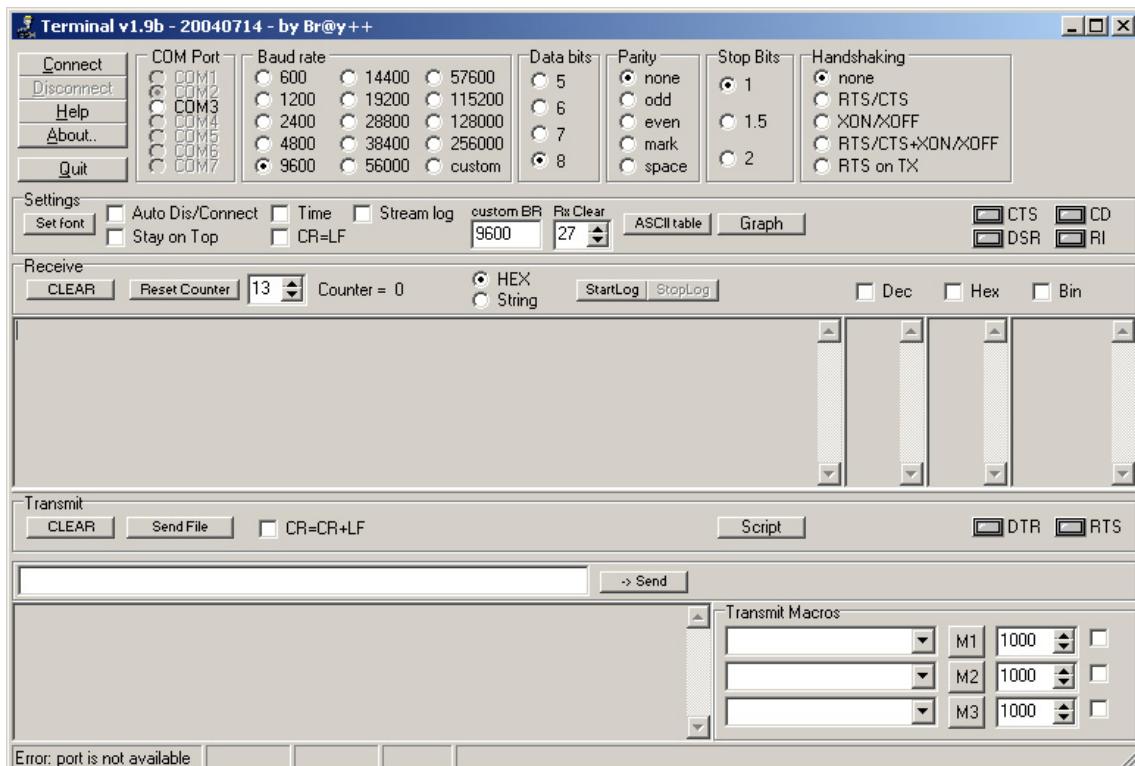
14. TÁBLÁZAT. Az ISM frekvenciasávok kiosztása Magyarországon[15].

7.2. CRC generátor-polinomok

	Generátor-polinom hexadecimálisan	Generátor-polinom matematikai alakban
CRC16-CCITT	8810h	$x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$
CRC16-IBM	C002h	$x^{16} + x^{15} + x^2 + 1$
CRC IEC-16	ADC9h	$x^{16} + x^{14} + x^{12} + x^{11} + x^9 + x^8 + x^7 + x^4 + x^1 + 1$
Biacheva	C868h	$x^{16} + x^{15} + x^{12} + x^7 + x^6 + x^4 + 1$

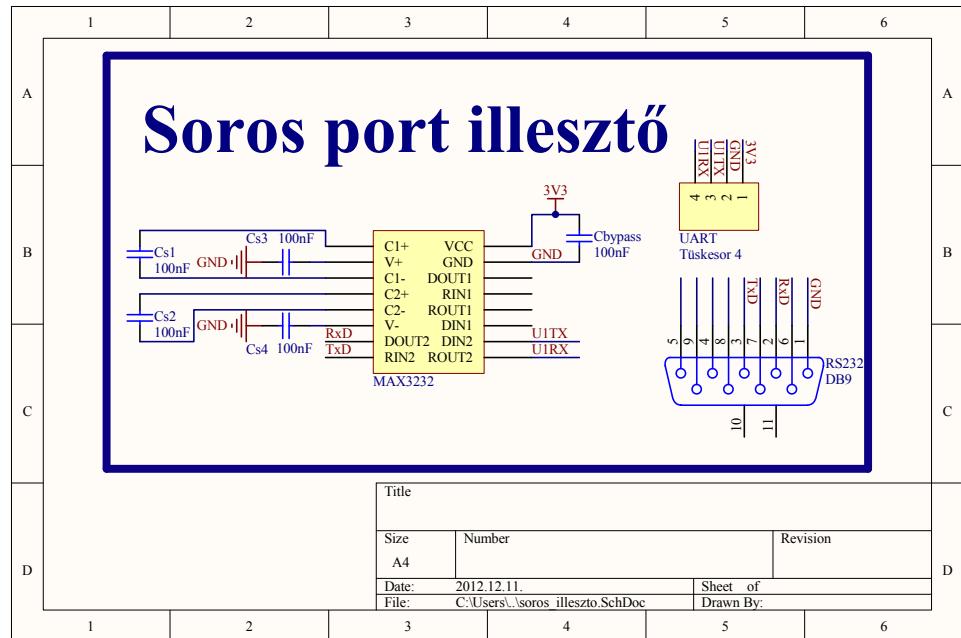
15. TÁBLÁZAT. A hibadetektáláshoz használható CRC generátor-polinomok.

7.3. A soros kommunikáció kezelőszoftvere



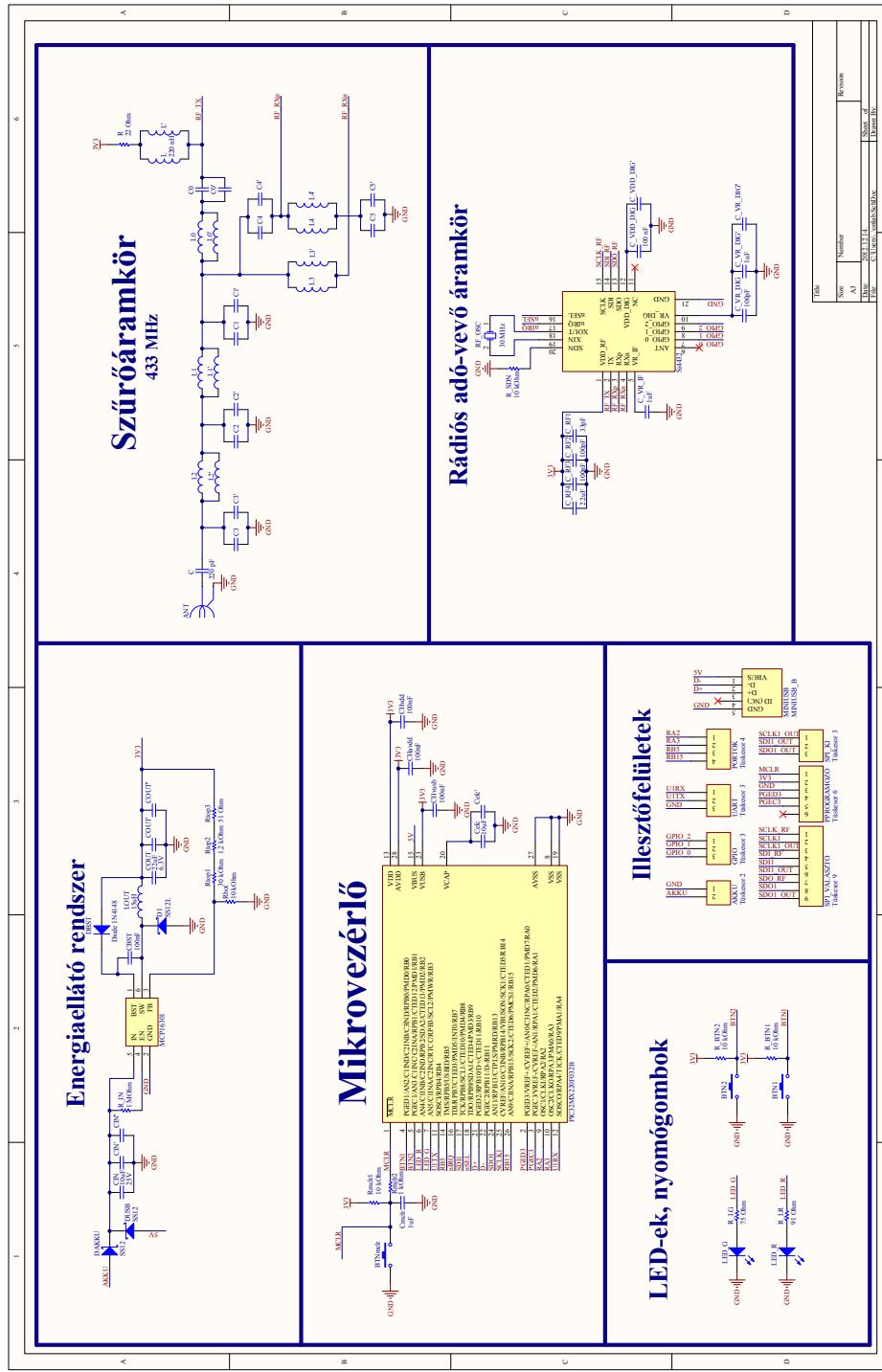
30. ÁBRA. A vezérlő számítógépen futó soros kommunikáció kezelőszoftvere [16].

7.4. Soros jelszintillesztő kapcsolási rajza



31. ÁBRA. A soros jelszintillesztő áramkör kapcsolási rajza.

7.5. Rádiókommunikációs modul kapcsolási rajza



32. ÁBRA. A rádiókommunikációs egység kapcsolási rajza.

Rövidítések jegyzéke

AFC	Automatic Frequency Control / Automatikus frekvenciaszabályozás
BER	Bit Error Rate / Bithiba-arány
CRC	Cyclic Redundancy Check / Ciklikus redundancia ellenőrzés
DMA	Direct Memory Access / Közvetlen memória hozzáférés
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum / Közvetlen kódsorozatú szort spektrum
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum / Frekvencia ugratásos spektrum kiterjesztés
FSK	Frequency Shift Keying / Frekvenciabilentyűzés
GFSK	Gaussian Frequency Shift Keying / Gaussi frekvenciabilentyűzés
GPIO	General Purpose Input Output / Általános felhasználású be- és kimenet
IC	Integrated Circuit / Integrált áramkör
ISM	Industrial, Scientific and Medical radio bands / Ipari, tudományos és orvosi felhasználású frekvenciasávok
LED	Light Emitting Diode / Fénykibocsátó dióda
OOK	On-Off Keying / Be-ki billentyűzés
PER	Packet Error Rate / Csomaghiba-arány
PLL	Phase-Locked Loop / Fáziszárt hurok
PWM	Pulse Width Modulation / Impulzusszélesség-moduláció
RAM	Random Access Memory / Közvetlen hozzáférésű memória
RFID	Radio Frequency IDentification / Rádiófrekvenciás azonosítás
RSSI	Received Signal Strength Indicator / Vételi jelszint
SMD	Surface-Mount Device / Felületszerelt alkatrész
SPI	Serial Peripheral Interface / Soros periféria-illesztő
SRD	Short Range Devices / Kis hatótávolságú eszközök
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter / Univerzális aszinkron adó-vevő
USB	Universal Serial Bus / Univerzális soros busz

Irodalomjegyzék

- [1] Géher Károly. *Híradástechnika*. Műszaki Könyvkiadó, 1999.
- [2] Microchip Technology. *PICkit 3 Programmer/Debugger User's Guide*, 2009.
- [3] Microchip Technology. *PIC32MX1XX/2XX Data Sheet*, 2011.
- [4] Silicon Laboratories. *Si4432 ISM Transceiver*, 2009.
- [5] Microchip Technology. *MCP16301*, 2011.
- [6] Monolithic Power Systems. *MP2359*, 2006.
- [7] Siward Crystal Technology. *Crystal Unit SX-2520*, 2010.
- [8] Texas Instruments. *MAX3232 Driver/Receiver*, 2004.
- [9] Microchip Technology. *MPLAB X IDE User's Guide*, 2011.
- [10] Microchip Technology. *PIC32 Family Reference manual*, 2007 - 2011.
- [11] Hainzmann-Varga-Zoltai. *Elektronikus áramkörök*. Tankönyvkiadó Vállalat, 1992.
- [12] Ferenczy Pál. *Hírközléselmélet*. Tankönyvkiadó, 1972.
- [13] Mátay Gábor-Zombory László. *A rádiófrekvenciás sugárzás élettani hatásai és orvosbiológiai alkalmazásai*. Műegyetemi Kiadó, 2000.
- [14] dr. Dárdai Árpád. *Mobil távközlés, mobil internet*. Mobil Ismeret, 2002.
- [15] Nemzeti Média és Hírközlési Hatóság. *A kis hatótávolságú eszközök (SRD-k) felhasználásáról*. Nemzeti Hírközlési Hatóság Hivatala, 2010.február.
- [16] A Terminal program weboldala. <https://sites.google.com/site/terminalbpp/>, 2012.12.13-ai állapot.