

Programska potpora za ugradbeni sustav s izravnom digitalnom sintezom frekvencije

Šola, Martina

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:168:307815>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-01**



Repository / Repozitorij:

[FER Repository - University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

ZAVRŠNI RAD br. 981

**PROGRAMSKA POTPORA ZA UGRADBENI SUSTAV S
IZRAVNOM DIGITALNOM SINTEZOM FREKVENCije**

Martina Šola

Zagreb, lipanj 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

ZAVRŠNI RAD br. 981

**PROGRAMSKA POTPORA ZA UGRADBENI SUSTAV S
IZRAVNOM DIGITALNOM SINTEZOM FREKVENCije**

Martina Šola

Zagreb, lipanj 2023.

ZAVRŠNI ZADATAK br. 981

Pristupnica: **Martina Šola (0036532689)**
Studij: Elektrotehnika i informacijska tehnologija i Računarstvo
Modul: Računarstvo
Mentorica: izv. prof. dr. sc. Željka Lučev Vasić

Zadatak: **Programska potpora za ugradbeni sustav s izravnom digitalnom sintezom frekvencije**

Opis zadatka:

Proučiti arhitekturu i značajke mikrokontrolera iz porodice STM32WB te sklop AD9910 za direktnu digitalnu sintezu frekvencije. Proučiti izvedbu generatora signala temeljenog na mikrokontroleru STM32WB55 i sklopu AD9910. Razviti programsku podršku za generiranje signala zadanog valnog oblika i frekvencije. Predvidjeti mogućnost podešavanja parametara generiranog signala (amplituda, faza, frekvencija) s udaljenog sustava za prikupljanje podataka putem protokola Bluetooth Low Energy. Izraditi popratnu dokumentaciju s uputama za instalaciju i konfiguraciju generatora signala. Za detaljne informacije obratiti se Matiji Rogliću, mag. ing.

Rok za predaju rada: 9. lipnja 2023.

SADRŽAJ

1. Uvod	1
2. Bluetooth	2
2.1. Bluetooth Low Energy	2
3. Razvojni sustav	3
3.1. Mikrokontroler STM32WB55	3
3.2. Sklop AD9910	4
3.3. Baterijski generator signala zasnovan na direktnoj digitalnoj sintezi . .	5
4. Opis razvijenog sustava	7
4.1. Promjene u razvijenoj programskoj podršci	7
4.2. Upute za korištenje	9
5. Rezultati	11
5.1. Poteškoće u razvoju programske podrške	11
5.2. Budući rad	11
6. Zaključak	12
Literatura	13

1. Uvod

Ugradbeni računalni sustavi su sustavi računalnog procesora, računalne memorije i ulazno-izlaznih perifernih uređaja koji imaju namjensku funkciju. Mikrokontroleri, tj. razvojne pločice su samostalni uređaji koji uz mikroprocesor, imaju implementirane sve periferije i podršku za programiranje i *debugiranje*.

Razvojni sustav koji se koristi u radu je baterijski generator signala koji je zasnovan na direktnoj digitalnoj sintezi [1][2]. Spomenuti generator signala sadrži mikrokontroler STM32WB55 proizvođača STMicroelectronics iz porodice STM32WB te sklop AD9910 za digitalnu sintezu frekvencije proizvođača Analog Devices. Cilj rada je promijeniti već razvijenu programsku podršku za navedeni razvojni sustav kako bi se omogućilo podešavanje parametara generiranog signala.

U drugom poglavlju rada, opisane su osnovne značajke i primjene Bluetootha te specifične karakteristike posebne Bluetooth tehnologije, Bluetooth Low Energy (BLE). U trećem poglavlju su detaljnije opisane karakteristike STM32WB55 mikrokontrolera s kojim se može povezati putem BLE-a. U tom su poglavlju navedene i karakteristike sklopa AD9910 koji služi za digitalnu sintezu frekvencije. U četvrtom poglavlju su objašnjene promjene koje su nastale u već razvijenoj programskoj podršci za generiranje signala zadanog valnog oblika i frekvencije. Također su napisane i kratke upute za korištenje spomenute programske podrške. Peto poglavlje je posvećeno rezultatima rada, tj. poteškoćama koje su se pojavile u razvoju te mogućnostima daljnjeg unaprjeđenja programske podrške u budućem radu, a u posljednjem poglavlju je naveden zaključak.

2. Bluetooth

Bluetooth je bežična tehnologija koja omogućuje brzu i jednostavnu komunikaciju između različitih uređaja. Razvijen je kao standard za kratkodometnu bežičnu komunikaciju, čime je omogućeno povezivanje uređaja te razmjenjivanje podataka na udaljenostima do nekoliko desetaka metara. Frekvencijski pojas u kojem djeluje rasprostire se od 2402 do 2480 MHz te pripada ISM (engl. *Industrial-Scientific-Medicine*) području koje je namijenjeno za besplatno korištenje za industrijske, znanstvene i medicinske potrebe [3].

Bluetooth se široko koristi u različitim područjima, uključujući mobilne telefone, računalne periferne uređaje, audio i video opremu, pametne kućanske uređaje i mnoge druge. Osnovna prednost Bluetooth tehnologije je jednostavno uparivanje uređaja, što omogućuje brzo uspostavljanje veze bez potrebe za kabelima ili složenim postavkama. Bluetooth pruža sigurnu komunikaciju putem enkripcije podataka, štiteći privatnost i sprječavajući neovlašten pristup.

2.1. Bluetooth Low Energy

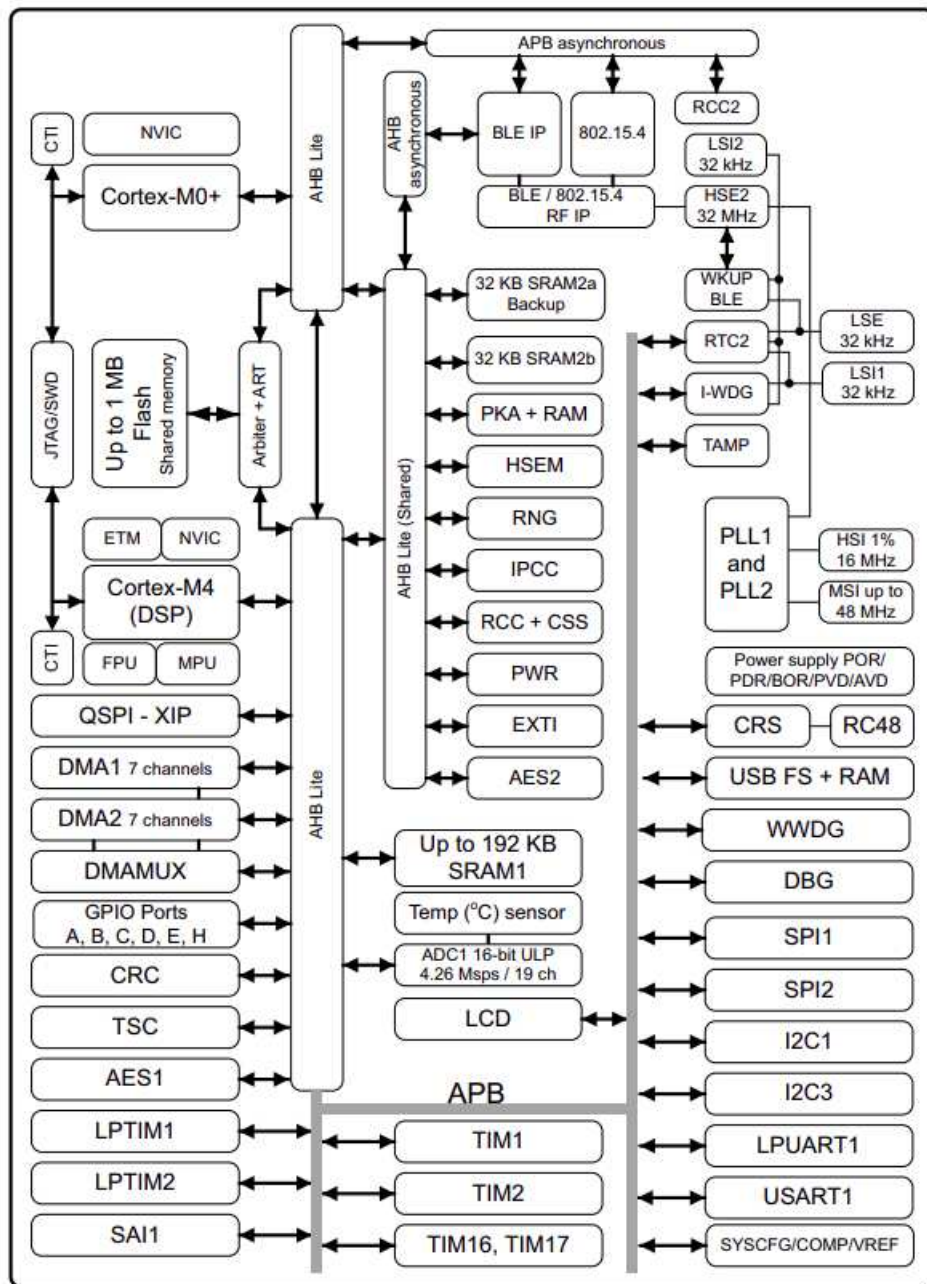
Bluetooth Low Energy (BLE), poznat i kao Bluetooth Smart, je posebna verzija Bluetooth tehnologije koja je optimizirana za energetske učinkovitu bežičnu komunikaciju. Glavni cilj pri njegovom razvoju je bio osmisliti način za održavanje aplikacija s malom potrošnjom energije poput pametnih uređaja i senzora koji rade na baterije. Zbog niske potrošnje energije, BLE je idealan za primjene koje zahtijevaju dugotrajnu autonomiju baterije, kao što su nosive tehnologije, zdravstveni uređaji, praćenje aktivnosti i *Internet of Things* (IoT) uređaji. Kao i Bluetooth, BLE pruža brzo uspostavljanje veze, jednostavno uparivanje uređaja i sigurnu komunikaciju putem enkripcije podataka. Tehnologija Bluetooth Low Energy ima široku podršku u industriji i integrirana je u većinu modernih pametnih telefona, tableta i računala što olakšava interakciju između uređaja i omogućuje razvoj raznovrsnih inovativnih aplikacija.

3. Razvojni sustav

Ugradbeni sustav za koji se razvijala programska podrška je baterijski generator signala zasnovan na direktnoj digitalnoj sintezi, odnosno odašiljač koji sadrži STM32WB55 mikrokontroler te sklop za direktnu digitalnu sintezu frekvencije, AD9910.

3.1. Mikrokontroler STM32WB55

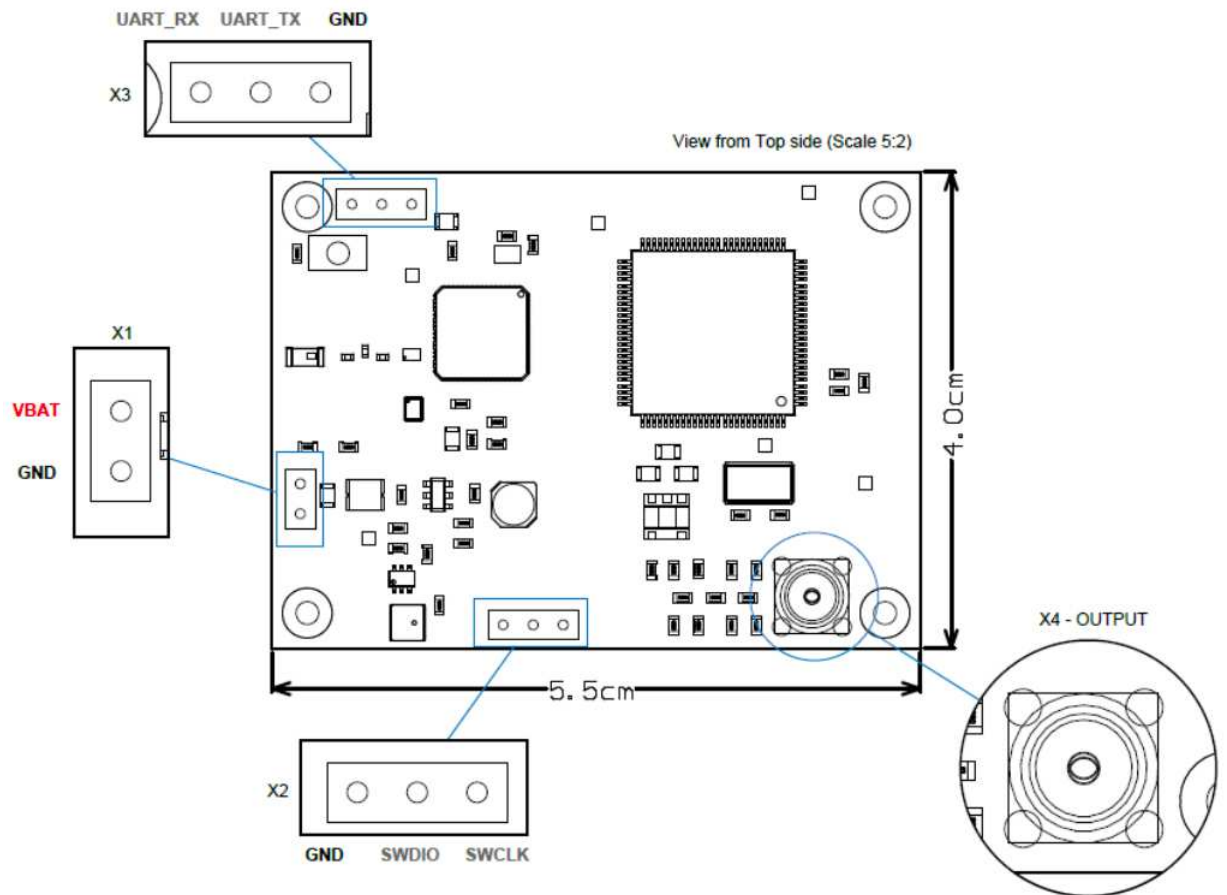
STM32WB55 je mikrokontroler iz porodice STM32WB koju je razvio STMicroelectronics. Ovaj mikrokontroler je posebno dizajniran za omogućavanje bežičnog povezivanja putem Bluetooth Low Energy protokola 5.3 te putem IEEE 802.15.4-2011 standarda. Sadrži dvije ARM Cortex jezgre - ARM Cortex-M4 za općenito procesiranje i ARM Cortex-M0+ za nisku potrošnju energije. Takva struktura omogućuje učinkovito odvajanje zadataka i upravljanje potrošnjom energije. STM32WB55 dolazi s mnoštvom komunikacijskih sučelja kao što su USART, UART (LPUART), I2C te SPI [4]. Navedene karakteristike mikrokontrolera čine ga idealnim za korištenje u slučajevima gdje je potrebna BLE povezanost te niska potrošnja energije. Mikrokontroler se može programirati u nekom od postojećih STM razvojnih okruženja - STMCubeIDE, STMCubeProgrammer.



Slika 3.1: Blok dijagram STM32WB55 mikrokontrolera [4]

3.2. Sklop AD9910

AD9910 je čip koji je razvila tvrtka Analog Devices. Namijenjen je za direktnu digitalnu sintezu te je posebno optimiziran za primjene koje zahtijevaju visokokvalitetno generiranje signala, kao što su radiofrekvencijski, RF odašiljači, medicinska oprema, testiranje i mjerenje te telekomunikacija.



Slika 3.3: Shema baterijskog generatora signala zasnovanog na direktnoj digitalnoj sintezi [2]

4. Opis razvijenog sustava

Programska podrška za generiranje signala zadanog valnog oblika i frekvencije je djelomično razvijena u prijašnjim radovima [1][2] te se koristila i u ovom radu kako bi se pokušala uvesti unaprjeđenja. Za sve promjene u programskoj podršci koristili su se alati STMCubeMX te STMCubeIDE.

4.1. Promjene u razvijenoj programskoj podršci

Spomenuti kod nije omogućavao korisnikov unos parametara signala koji se želi generirati, već su sve karakteristike signala fiksno definirane u samome kodu. Funkcije koje služe za generiranje signala su u sebi imale zadane vrijednosti amplitude, faze i frekvencije. Da bi korisnik promijenio te parametre, morao bi pronaći željenu funkciju i unutar nje promijeniti vrijednosti. S obzirom na broj datoteka koje su dio programske podrške, snalaženje među istima je relativno zahtjevo te značajno otežava pronalazak funkcije u kojoj bi se parametri trebali izmijeniti.

Funkcija koja je glavna za prenošenje podataka o signalu koji se želi generirati se nalazi u datoteci *main.c*. To je funkcija `dds_init_st` koja nije mogla primiti nikakve parametre. Unutar `dds_init_st` funkcije, pozivala se druga funkcija, `single_tone` i ona je primala parametre koji su bili ručno uneseni. `dds_init_st` sada sama prima parametre koji su ključni za karakteristike signala koji se želi generirati. Parametri uneseni u `dds_init_st` se prosljeđuju `single_tone` funkciji koja dalje raspolaže unesenim podacima.

```

void dds_init_st(float scale, float phase, float frequency /*void*/){

    /* CS Line High */
    HAL_GPIO_WritePin(CS_GPIO_Port, CS_Pin, GPIO_PIN_SET);

    /* MASTER RESET */
    HAL_GPIO_WritePin(MASTER_RESET_GPIO_Port, MASTER_RESET_Pin, GPIO_PIN_SET);
    HAL_Delay(1000);
    HAL_GPIO_WritePin(MASTER_RESET_GPIO_Port, MASTER_RESET_Pin, GPIO_PIN_RESET);

    /* SPI RESET */
    HAL_GPIO_WritePin(IO_RESET_GPIO_Port, IO_RESET_Pin, GPIO_PIN_SET);
    HAL_Delay(1000);
    HAL_GPIO_WritePin(IO_RESET_GPIO_Port, IO_RESET_Pin, GPIO_PIN_RESET);

    /* SPI write & read CFR1, CFR2, CFR3 - Configure Single Tone Mode*/
    single_tone_config();

    /*Single Tone Mode */
    single_tone(scale, phase, frequency, 0);

}

```

Slika 4.1: Definicija funkcije dds_init_st

Kako bi se promijenjena funkcija mogla iskoristiti, u datoteci *custom_app.c* je također bilo potrebno promijeniti dio koda kojem se ona koristi, tj. dodati potrebne parametre u njenom pozivanju.

```

switch (pNotification->Custom_Evt_Opcode)
case CUSTOM_STM_ODASILJACCHARWRITE_WRITE_EVT:
    if(pNotification->DataTransferred.pPayload[0] == 0x73)
    {
        float s = 0.9; /* scale - amplituda [0, 1] */
        float p = 0.0; /* phase - faza [0, 360] */
        float f = 14.0; /* frequency - frekvencija [0, 500] */

        dds_init_st(s, p, f);
    }
    if(pNotification->DataTransferred.pPayload[0] == 0x72)
    {
        dds_init_ramp();
    }
    if(pNotification->DataTransferred.pPayload[0] == 0x00)
    {
        HAL_GPIO_TogglePin(LED1_GPIO_Port, LED1_Pin);
    }
    break;

default:
    break;
}

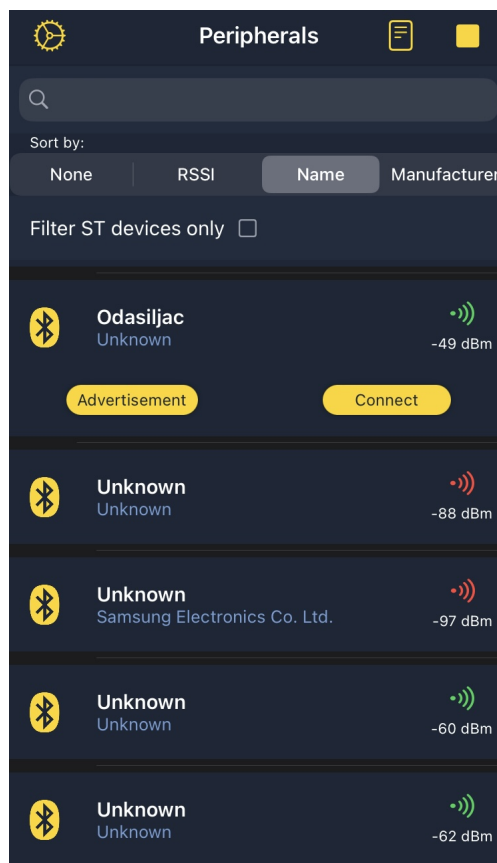
```

Slika 4.2: Pozivanje funkcije dds_init_st

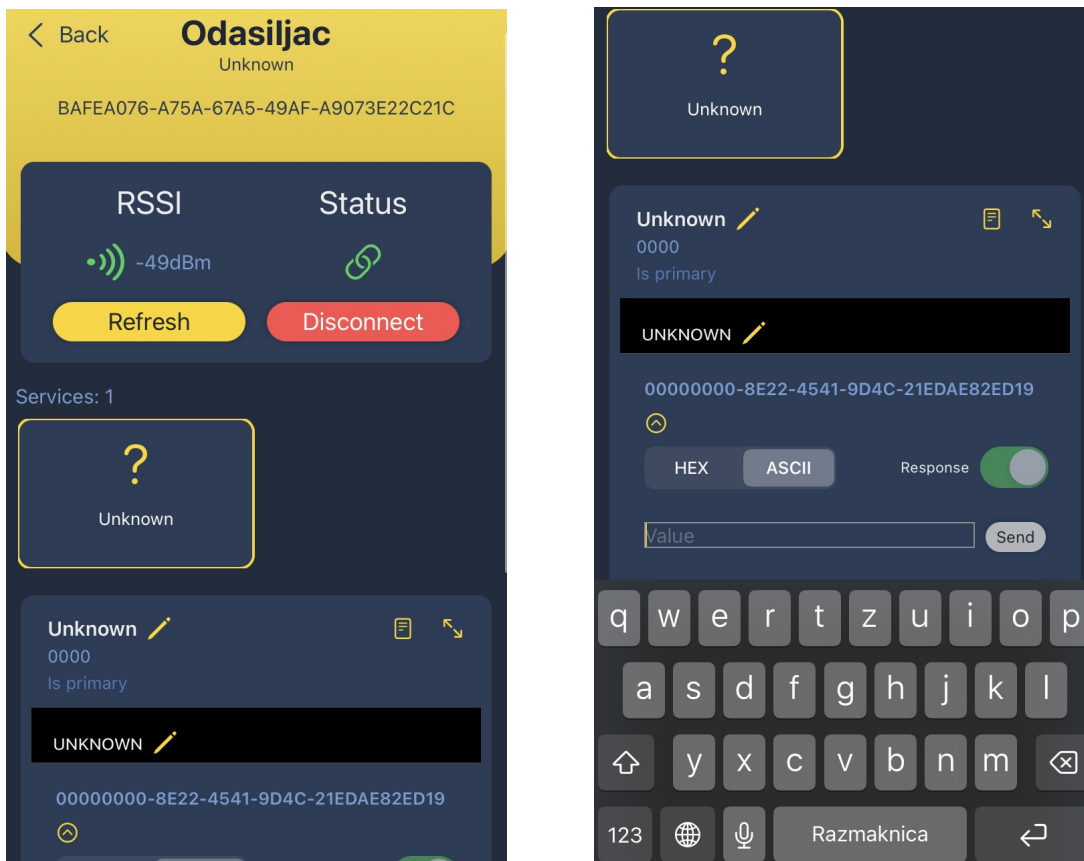
Navedene promjene su testirane na osciloskopu čime se utvrdilo da se signal ispravno generira i u skladu sa zadanim parametrima.

4.2. Upute za korištenje

U funkciji sa slike 4.2 moguće je izmijeniti vrijednosti amplitude, faze i frekvencije. Amplituda je definirana kao decimalni broj koji predstavlja postotak kojim se skalira maksimalna moguća vrijednost amplitude. Faza je decimalni broj između 0° i 360° . Frekvencija je izražena decimalnim brojem koji predstavlja frekvenciju u mjernoj jedinici MHz. Ako se navedeni parametri žele promijeniti, to je potrebno napraviti prije *buildanja* i *runnanja* projekta na mikrokontroler. Projekt se *builda* u alatu STMCubeIDE, gdje se ujedno i *runna*. Kako bi se projekt uspješno postavio na mikrokontroler, potrebno je povezati mikrokontroler s osobnim računalom uz pomoć ST-LINK V2 uređaja. Nakon što je projekt uspješno prebačen na mikronkontroler, može se krenuti s uspostavljanjem veze između odašiljača i mobilnog uređaja.



Slika 4.3: Korisničko sučelje ST BLE Toolbox aplikacije



Slika 4.4: Uspješno povezivanje s odašiljačem i mogućnost slanja poruke

Za komunikaciju s odašiljačem, potrebno je imati instaliranu ST BLE Toolbox mobilnu aplikaciju i upaljen Bluetooth na uređaju koji želimo povezati s odašiljačem. Aplikacija prepoznaje uređaje dostupne za povezivanje i među njima treba odabrati uređaj pod nazivom Odašiljač, naš mikrokontroler. Kada se uspostavi veza, na mobilnom uređaju je moguće upisati željeni znak za generiranje signala.

5. Rezultati

5.1. Poteškoće u razvoju programske podrške

Ideja da se parametri generiranog signala mogu unijeti u ST BLE Toolbox aplikaciju, nažalost nije ostvarena jer sam naišla na poteškoće s dohvaćanjem podataka iz aplikacije. Neovisno o načinu na koji su se podaci unosili u aplikaciju, mogao se dohvatiti isključivo prvi znak te sam zbog toga bila primorana smisliti alternativno rješenje za podešavanje parametara. Navedeni problem nisam uspjela riješiti.

Alternativno rješenje i upute za njegovo korištenje su opisane u četvrtom poglavlju. Cilj takvog rješenja je bilo pojednostaviti podešavanje parametara u samome kodu, kada to već nije bilo moguće u aplikaciji. Na ovaj način korisnici ne moraju detaljno proučavati kod kako bi našli sva mjesta na kojima se parametri koriste, već mogu promijeniti sve parametre na jednome mjestu - u datoteci *custom_app.c*. (slika 4.2)

5.2. Budući rad

Programska podrška je izmijenjena imajući u vidu daljnji rad na njoj. Potrebno je omogućiti dohvaćanje potpunih podataka koje korisnik unosi u aplikaciju. Kada taj dio programske podrške bude funkcionalan, dohvaćene podatke će biti potrebno samo prosljediti već izmijenjenoj `dds_init_st` funkciji kod njezinog pozivanja. Parametri *s*, *p*, *f* će tada umjesto fiksne vrijednosti biti inicijalizirani kao `pNotification->DataTransferer.pPayload[1]` ili nešto slično tome, ovisno o realizaciji dohvaćanje podataka.

6. Zaključak

Kako bi se mogla razviti programska podrška za generiranje signala s udaljenog sustava za prikupljanje podataka putem protokola Bluetooth Low Energy, bilo je potrebno proučiti arhitekturu i značajke sklopova na kojima se baterijski generator signala temelji - mikrokontroler STM32WB55 te sklop AD9910 za direktnu digitalnu sintezu frekvencije. Uz to je bilo potrebno i upoznati se s protokolom Bluetooth Low Energy. Postignut je napredak u vidu pojednostavljenja mijenjanja vrijednosti parametara, ali nažalost nije omogućeno podešavanje parametara s udaljenog sustava za prikupljanje podataka. Unatoč tome, promjene u kodu su napravljene s ciljem da se taj kod može kasnije iskoristiti kada se osposobi dohvaćanje podataka unesenih u aplikaciju.

LITERATURA

- [1] Sinković I. *Programska podrška bežično upravljivog sustava za mjerenje prijenosne karakteristike IBC kanala, Diplomski rad.* Fakultet elektrotehnike i računarstva, Sveučilište u Zagrebu, 2022.
- [2] Sinožić M. *Baterijski generator signala zasnovan na direktnoj digitalnoj sintezi, Diplomski rad.* Fakultet elektrotehnike i računarstva, Sveučilište u Zagrebu, 2022.
- [3] Bluetooth Technology Overview. <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/tech-overview/>. Pristupljeno 5. svibnja 2023.
- [4] Datasheet - STM32WB55xx. <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32wb55cc.pdf>. Pristupljeno 9. svibnja 2023.
- [5] Datasheet - AD9910. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad9910.pdf>. Pristupljeno 9. svibnja 2023.
- [6] STM32WB Getting Started Series. https://www.youtube.com/watch?v=7_wBH7mTQ2g&list=PLnMKNibPkDnG9JRe2fb0OpVpWY7E4WbJ-. Pristupljeno 20. svibnja 2023.
- [7] Getting started with STM32CubeWB for STM32WB Series, UM2550. https://www.st.com/resource/en/user_manual/dm00597487-getting-started-with-stm32cubewb-for-stm32wb-series-stmicroelectronics.pdf. Pristupljeno 20. ožujka 2023.
- [8] STM32CubeMX for STM32 configuration and initialization C code generation, UM1718. https://www.st.com/resource/en/user_manual/um1718-stm32cubemx-for-stm32-

configuration-and-initialization-c-code-generation-stmicroelectronics.pdf. **Pristupljeno 17. travnja 2023.**

[9] **STM32CubeIDE user guide, UM2609.** https://www.st.com/resource/en/user_manual/um2609-stm32cubeide-user-guide-stmicroelectronics.pdf. **Pristupljeno 17. travnja 2023.**

[10] **Building wireless applications with STM32WB series MCUs, AN5289.** https://www.st.com/resource/en/application_note/an5289-building-wireless-applications-with-stm32wb-series-mcus-stmicroelectronics.pdf. **Pristupljeno 21. travnja 2023.**

Programska potpora za ugradbeni sustav s izravnom digitalnom sintezom frekvencije

Sažetak

U ovom radu razvijena je programska podrška za generiranje signala zadanog valnog oblika i frekvencije pomoću baterijskog generatora signala zasnovanog na direktnoj digitalnoj sintezi. Za razvoj programske podrške korišten je alat STMCubeIDE, a za njeno postavljanje korišten je uređaj ST-LINK V2. Ostvarena je mogućnost podešavanja parametara generiranog signala (amplituda, faza, frekvencija) unutar koda. Slanjem poruke s uređaja koji je povezan s baterijskim generatorom putem protokola Bluetooth Low Energy, generira se signal zadanih karakteristika.

Ključne riječi: STM32WB55, AD9910, programska potpora, generiranje signala, podešavanje parametara, Bluetooth Low Energy

Software support for an embedded system with direct digital frequency synthesis

Abstract

In this paper, software support was developed for generating a signal with a specified waveform and frequency using a battery-powered signal generator based on direct digital synthesis. The STMCubeIDE tool was used for software development while the ST-LINK V2 device was used for its deployment. The software enables parameter adjustment of the generated signal (amplitude, phase, frequency) within the code. By sending a message from a device connected to the battery-powered generator via the Bluetooth Low Energy protocol, a signal with the desired characteristics is generated.

Keywords: STM32WB55, AD9910, software support, signal generation, parameter adjustment, Bluetooth Low Energy