



УНИВЕРЗИТЕТ
У НОВОМ САДУ



ФАКУЛТЕТ
ТЕХНИЧКИХ НАУКА

Трг Доситеја Обрадовића 6, 21000 Нови Сад, Југославија
Деканат: 021 350-413; 021 450-810; Централа: 021 350-122
Рачуноводство: 021 58-220; Студентска служба: 021 350-763
Телефакс: 021 58-133; e-mail: ftndean@uns.ns.ac.yu



Сертификован
систем
квалитета



PROJEKAT

iz predmeta **Primenjena optoelektronika**

TEMA PROJEKTA:

Realizacija infracrvene kamere

TEKST ZADATKA:

1. Očitavati podatke sa senzora IR Grid 3 Click putem I2C komunikacije
2. Pročitane podatke adekvatno obraditi u cilju dobijanja vrednosti temperature objekta
3. Omogućiti prikaz termalne slike u realnom vremenu na TFT displeju razvojnog sistema

Studenti:

Stefan Švenderman E1 17/2019
Jovan Slavujević EE 239/2015

Mentor:

dr Jovan Bajić

U Novom Sadu, 10.2.2020.

Sadržaj

Lista skraćenica.....	- 2 -
1. <i>IR</i> kamera.....	- 3 -
2. Mikrobolometri	- 4 -
3. Priroda elektromagnetnih zračenja	- 5 -
4. Komponente za realizaciju <i>IR</i> kamere	- 7 -
4.1 Senzor <i>IR</i> Grid 3 Click	- 7 -
4.2 Razvojni sistem mikromedia Plus for STM32F7	- 8 -
5. Realizacija <i>IR</i> kamere.....	- 9 -
5.1 Konfiguracija periferija mikrokontrolera STM32F7	- 10 -
5.2 Struktura izvršnog programa	- 11 -
5.3 Inicijalizacija detektora MLX90640.....	- 11 -
5.4 Čitanje podataka sa senzora.....	- 12 -
5.5 Izračunavanje podataka o temperaturi objekta	- 12 -
5.6 Izračunavanje vrednosti boja i njihova konverzija	- 12 -
5.6.1 <i>HSV</i> prostor boja	- 12 -
5.6.2 <i>RGB888</i> i <i>RGB565</i> prostori boja.....	- 13 -
5.7 Prikaz termalne slike na <i>TFT</i> ekranu	- 14 -
7. Zaključak	- 15 -
8. Literatura.....	- 16 -

Lista skraćenica

Spisak skraćenica na engleskom jeziku

API	Application program interface
EEPROM	Electrically erasable programmable read-only memory
FOV	Field of view
HSV	HUE-SATURATION-Value
I2C	Inter-Integrated Circuit
IR	Infrared
LED	Light-emitting diode
RAM	Random-access memory
RGB565	Red-Green-Blue(565)
RGB888	Red-Green-Blue(888)
SCK	Serial clock
SDA	Serial data
TFT	Thin film transistor
USB	Universal serial bus

1. IR kamera

Infracrvena kamera(*eng. Infrared camera*), u daljem tekstu *IR* kamera, predstavlja uređaj koji beskontaktno detektuje količinu infracrvenog zračenja koje određeno telo emituje. Infracrveno zračenje predstavlja toplotu koju telo emituje. *IR* kamera ima za cilj da infracrvenu energiju pretvori u električni signal. Potom je neophodna obrada električnog signala kako bi se dobili adekvatni podaci o temperaturi posmatranog tela. Poslednji korak je prikaz termalne slike i temperature objekta na određenom video monitoru koji najčešće predstavlja mali displej.

Zbog svog širokog mernog temperaturnog opsega *IR* kamere našle su veoma široku primenu. Najčešće primene su u oblastima kao što su građevina, industrija za dijagnostiku kvarova ili grešaka, automobilska industrija za noćnu autonomnu vožnju i posebne kamere namenjene snagama policije i vojske za noćni nadzor terena ili detekciju meta i navođenje ka njima. Na slici 1. je prikazan izgled *IR* kamere.



Slika 1. Izgled *IR* kamere

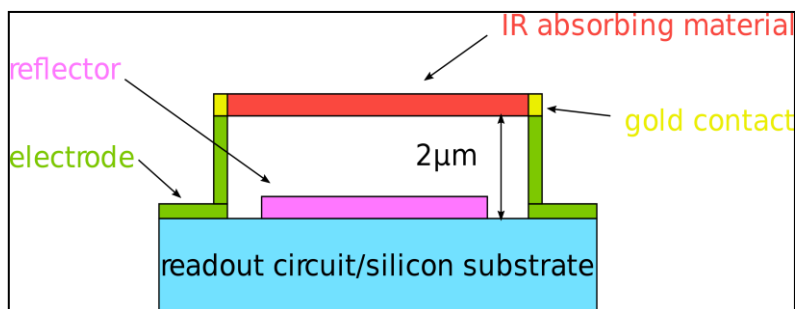
2. Mikrobolometri

Detektor *IR* zraka sastoji se od matrice piksela koji se nazivaju mikrobolometri. Mikrobolometri su osjetljivi na zrake talasne dužine u opsegu od $7.5\mu\text{m}$ do $14\mu\text{m}$ [3]. Prilikom ostvarivanja kontakta *IR* zraka sa površinom bolometra dolazi do promene njegove otpornosti što sa konstantnom strujom uzrokuje promenu pada napona na elementu. U ovoj promeni napona krije se podatak o temperaturi objekta koji emituje *IR* zrake.

Mikrobolometri spadaju u grupu termalnih senzora koje nije potrebno hladiti. Ova osobina ih čini mnogo jeftinijim za fabrikaciju i komercijalne upotrebe. Dimenzije mikrobolometra su između $12\mu\text{m}$ i $45\mu\text{m}$ i sastoji se od nekoliko slojeva. Osnovni delovi mikrobolometra su:

1. Donji sloji koji čini silicijumska podloga i integrisano kolo za čitanje podataka;
2. Električni kontakti koji su položeni i selektivno urezani;
3. *IR* absorber u čiju strukturu su urezani zlatni kontakti;
4. Reflektor koji čini titanijumsko ogledalo nalazi se odmah ispod *IR* absorbera kako bi reflektovao nazad ka absorberu onaj deo zraka koji prođe kroz njega.

Mikrobolometri ne zahtevaju nikakav vid hlađenja strukture, ali je potrebno izolovati *IR* absorber od integrisanog kola za čitanje podataka. Ova termalna izolacija se postiže uklanjanjem materijala između absorbera i reflektora. Rastojanje između ova dva elementa je $2\mu\text{m}$ i obavlja se u vakuumu. Izgled poprečnog preseka strukture mikrobolometra prikazan je na slici 2.

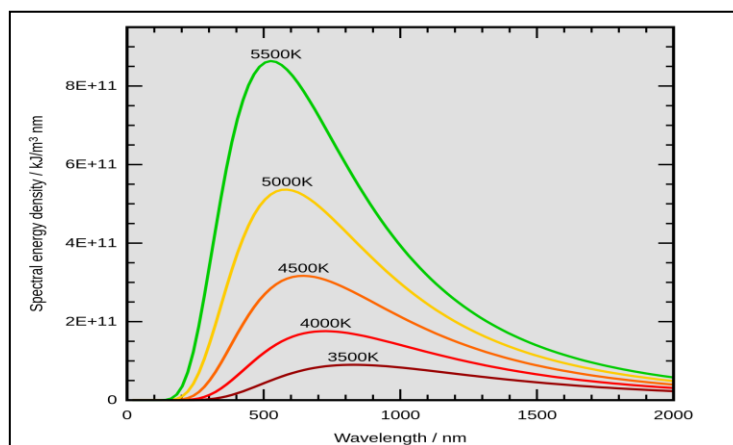


Slika 2. Poprečni presek mikrobolometra

3. Priroda elektromagnetnih zračenja

Usled termalnog kretanja molekula i atoma svako telo na temperaturi iznad apsolutne temperature zrači elektromagnetne talase. Sa porastom temperature raste intenzitet termalnog zračenja i količinu koje ono emituje. Promena temperature tela u znatnoj meri utiče na vrstu zračenja, odnosno dolazi do promene spektralne raspodele emitovane svetlosti. Na istoj temperaturi bolje zrače tela koja bolje apsorbuju toplotno zračenje. Glavni faktor koji utiče na ovaj proces predstavlja boja tela. Tela crne boje više zrače od tela drugih boja, takođe predstavljaju i bolje absorbere. Telo koje predstavlja idealni absorber i emiter naziva se apsolutno crno telo[5].

Plankov zakon zračenja definiše gustinu energije zračenja crnog tela u funkciji promene temperature i talasne dužine. Na slici 3. je prikaz promena spektralne gustine energije u zavisnosti od promene temperature i talasne dužine.



Slika 3. Spektralna gustina energije

Na slici 4. je prikazan matematički zapis Plankovog zakona, odnosno gustinu energije zračenja u funkciji promene talasne dužine (frekvencije) i temperature.

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \Leftrightarrow u(\lambda, T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

Slika 4. Matematički zapis Plankovog zakona

Štefan-Bolcmanov zakon pokazuje da je emisiona moć(intenzitet ili ukupna snaga zračenja na svim talasnim dužinama) direktno proporcionalna četvrtom stepenu njegove temperature i da je za crna tela mnogo veća nego za bela, kao i za tela veće površine. Iz Plankovog zakona se izvodi Štefan-Bolcmanov zakon. Na slici 5. je prikazano izvođenje i matematički zapis Štefan-Bolcmanovog zakona.

$$I(T) = \int_0^{\infty} u(\lambda, T) d\lambda \quad \Rightarrow \quad I(T) = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot T^4$$

Slika 5. Štefan-Bolcmanov zakon

Vinov zakon opisuje talasnu dužinu koja odgovara maksimalnoj emitovanoj energiji. Pomenuta talasna dužina obrnuto je proporcionalna odgovarajućoj apsolutnoj temperaturi. Merenjem talasne dužine možemo da odredimo kolika je temperatura površine objekta koji zrači. Vinov zakon se izvodi iz Plankovog zakona i njegov matematički zapis prikazan je na slici 6[6].

$$\frac{\partial u(\lambda, T)}{\partial \lambda} = 0 \quad \Rightarrow \quad \lambda_m = 0,228 \cdot 10^{-2} \frac{1}{T}$$

Slika 6. Vinov zakon

4. Komponente za realizaciju IR kamere

U ovom projektu cilj je realizacija primera IR kamere uz pomoć komercijalnih komponenti koje su lako dostupne, niskih su cena i imaju primenu samo u edukativnim svrhama. Komponente koje su upotrebljene u projektu su senzor za detekciju IR zračenja IR Grid 3 Click i razvojni sistem Mikromedia Plus for STM32F7 za obradu podataka sa senzora i prikaz termalne slike na displeju.

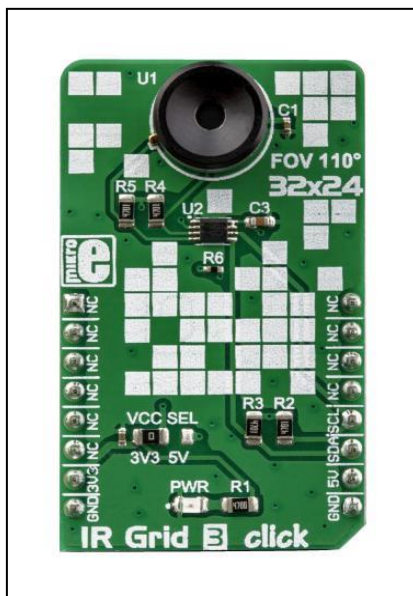
4.1 Senzor IR Grid 3 Click

IR Grid 3 Click je senzor koji sadrži detektor IR zračenja MLX90640, interfejs za I2C komunikaciju putem koje se vrše razmene podataka između mikrokontrolera i senzora i selekcionirani otpornik za određivanje vrednosti napajanja samog senzora.

Detektor zračenja MLX90640 u sebi sadrži matricu piksela koji su osetljivi na infracrveno zračenje. Dimenzija matrice je 32x24, ukupno 768 piksela. U samom detektoru je integrisan čip koji skladišti vrednosti napona sa svakog piksela u RAM memoriji. Dodatno, sam čip u sebi sadrži niz rezervisanih registara u koje se skladišti niz parametara koji su neophodni za računanje temperature. Detektor poseduje ugao gledanja od 110° (*eng.FOV*) i radnu temperaturu u opsegu od -40°C do 85°C. Ovim detektorom moguće je meriti temperaturu u opsegu od -40°C do 300°C.[1]

Putem I2C komunikacionog protokola vrši se razmena informacija između senzora i mikrokontrolera. Preko I2C vrši se čitanje vrednosti podataka iz tačno određenih registara, ali i upis vrednosti u određene registre.

Na senzoru IR Grid 3 Click postoji mogućnost odabira vrednosti napajanja putem selekcionog otpornika. Vrednosti napajanja mogu biti 5V ili 3.3V. Na senzoru je proizvođač već odlučio da vrednost napajanja iznosi 3.3V, ali ukoliko korisniku ne odgovara pomenuta vrednost postoji mogućnost da se selekcionirani otpornik prelema na pin koji omogućava vrednost napajanja od 5V. Na slici 6. nalazi se prikaz IR Grid 3 Click senzora.



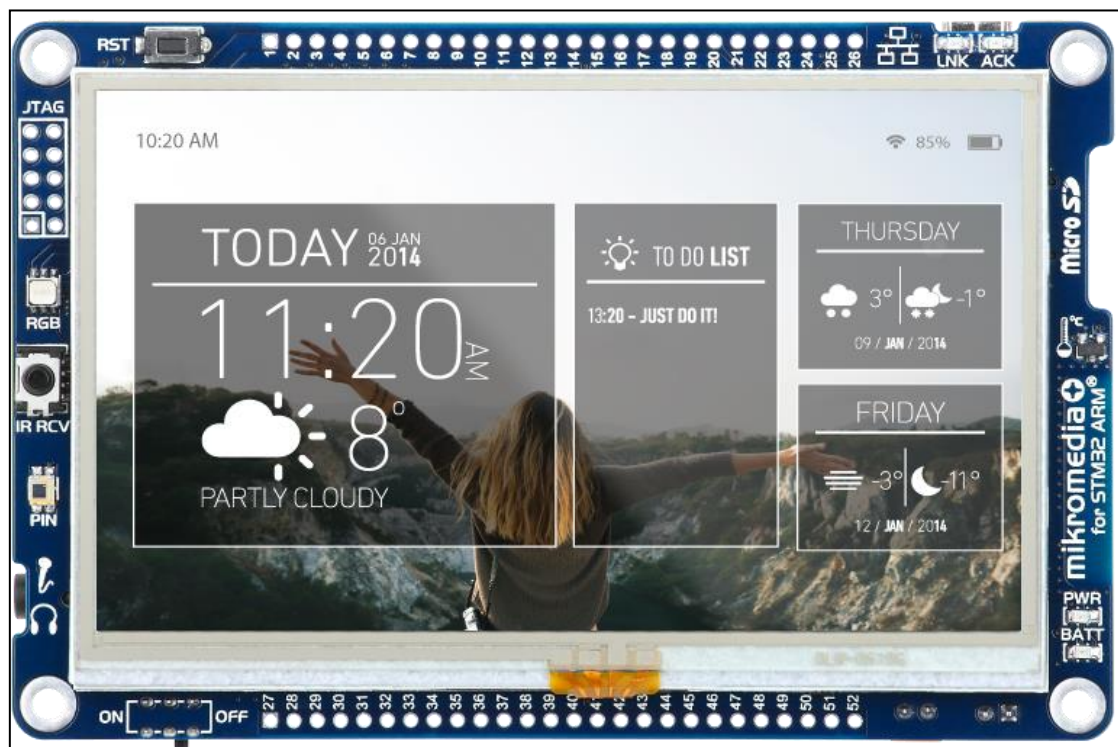
Slika 6. Izgled senzora IR Grid 3 Click

4.2 Razvojni sistem mikromedia Plus for STM32F7

Mikromedia Plus for STM32F7, u daljem tekstu mikromedia, predstavlja razvojni sistem koji na sebi sadrži mikrokontroler STM32F747ZG, *TFT* displej osetljiv na dodir i mnoštvo integrisanih osnovnih elektronskih komponenti a neke od njih su *PIN* dioda, *LED* dioda, senzor temperature, akcelerometar i mnoge druge.

Mikromedia ima mogućnost napajanja putem USB kabla ili eksternog adaptera. Mikromedia sadrži 52 pina kojima korisnik ima pristup. Maksimalna frekvencija rada mikrokontrolera iznosi 216MHz. Ona omogućava veoma efikasan rad i vrhunske performanse izvršavanja mašinskog koda.

Rezolucija *TFT* displeja je 480x272 piksela. Displej i mikrokontroler ostvaruju komunikaciju putem SSD1963 drajvera koji je takođe integrisan na razvojnom sistemu. Displej sadrži integrisanu rezistivnu foliju koja omogućava da ekran bude osetljiv na dodir. Upotreba SSD1963 drajvera omogućava prikaz kristalno jasne slike i veoma dobru responzivnost folije koja je osetljiva na dodir. Na slici 7. je prikazan izgled razvojnog sistema mikromedia Plus for STM32F7.[2]



Slika 7. Izgled mikromedia Plus for STM32F7

5. Realizacija *IR* kamere

Za realizaciju *IR* kamere sa prethodno pomenutim komponentama potrebno je ceo projekat podeliti u nekoliko koraka.

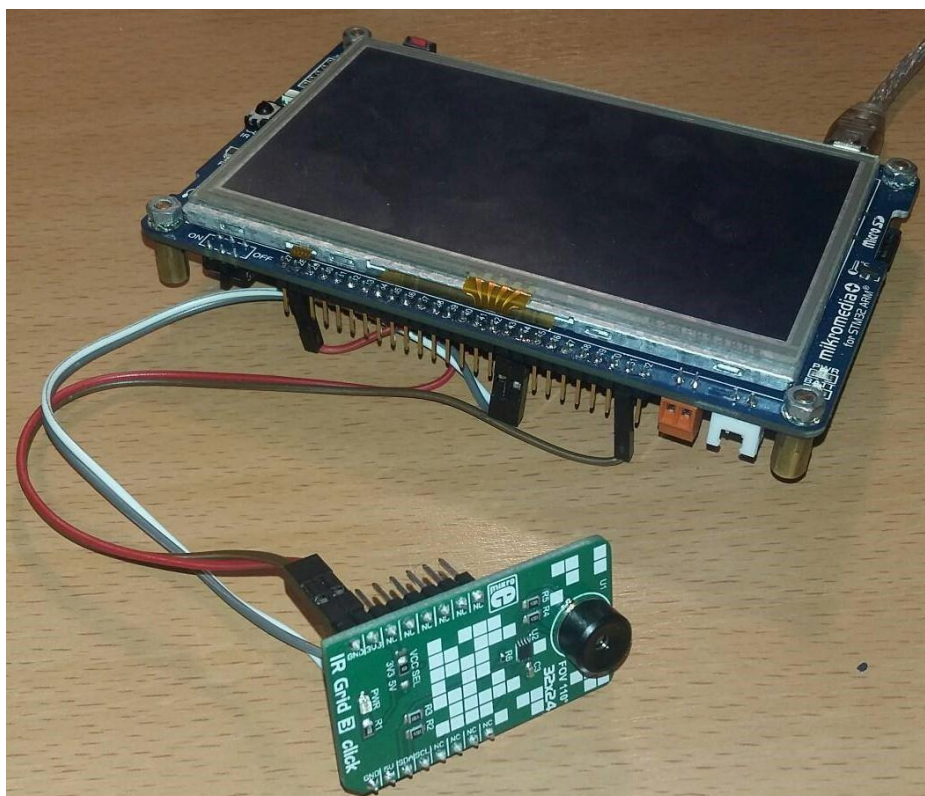
Prvi korak predstavlja povezivanje senzora sa razvojnim sistemom, a potom povezivanje razvojnog sistema sa računarom. Povezivanje senzora sa razvojnim sistemom ostvaruje se putem četiri kratkospojnika. Povezivanje razvojnog sistema sa računarom ostvareno je putem *USB* kablova. Ovim se obezbeđuje napajanje sistemu u vrednosti od 5V.

Drugi korak predstavlja konfiguraciju perifera mikrokontrolera u konfiguratoru STM32CubeMX. Inicijalizacija putema konfiguratora značajno ubrzava podešavanje osnovnih perifera.

Treći korak predstavlja upis određenih parametara u register detektora kako bi očitavanja bila što bolja i tačnija.

Četvrti korak čini obrada podataka sa senzora kada su svi neophodni parametri pročitani *I2C* protokolom iz memorije detektora.

Peti i završni korak jeste vizuelni prikaz termalne slike objekta koja se posmatra na *TFT* displeju razvojnog sistema. Na slici 8. je prikazan izgled povezanih komponenti, odnosno izgled *IR* kamere realizovane u ovom projektu.



Slika 8. Izgled *IR* kamere

5.1 Konfiguracija periferija mikrokontrolera STM32F7

Za konfiguraciju i inicijalizaciju periferija upotrebljen je konfigurator STM32CubeMX. Upotrebom konfiguratora omogućava se lakša i brža inicijalizacija i aktivacija periferija koja prvenstveno štedi vreme u samom dizajnu firmvera. Pomenuti konfigurator predstavlja grafički alat koji omogućava aktivaciju periferija familije mikrokontrolera STM32.

Prvi korak u konfiguratoru predstavlja selekcija tipa mikrokontrolera koji je odabran za upotrebu kako bi se omogućio adekvatan prikaz mogućih periferija. U ovom projektu upotrebljen je mikrokontroler STM32F746ZG. Nakon odabira mikrokontrolera u konfiguratoru pojavljuje se izgled kućišta mikrokontrolera sa pinovima i listama periferija koje je moguće aktivirati i inicijalizovati. Lista periferija nalazi se u panelu sa leve strane konfiguratora.

Drugi korak predstavlja sama aktivacija periferija. Potrebno je obratiti pažnju da su određeni pinovi na razvojnom sistemu rezervisani i njih nije moguće koristiti u konfiguratoru, ali postoji mogućnost aktivacije jedne iste periferije na pinovima koji nisu rezervisani. Zahteve ovog projekta ispunjava aktivacija svega nekoliko osnovnih modula koji su navedeni u nastavku.

U kartici *MiddleWares* potrebno je pristupiti podkartici *USB Device* i odabrati *Communication Device Class (Virtual Port Com)*. Ovim je omogućena aktivacija USB biblioteka kojima pristupa *API*.

U kartici *Peripherals* aktivirani su moduli *I2C2*, *RCC*, *SYS* i *USB OTG FS*.

Modul *I2C2* zauzima dva pina *PF0(I2C2_SDA)* i *PF1(I2C2_SCK)*. U kartici *Configuration* za *I2C2* nalaze se parametri koji određuju brzinu komunikacije. U tabeli 1. nalaze se vrednosti parametara za brzinu komunikacije koji su upotrebljeni u ovom projektu.

Tabela 1. Vrednosti parametara za brzinu *I2C* komunikacije

I2C Speed Mode	→	Fast Mode Plus
I2C Speed Frequency[kHz]	→	1000
PF0 Maximum Output Speed	→	Very High
PF1 Maximum Output Speed	→	Very High

U *RCC* kartici za parametar *High Speed Clock(HSE)* potrebno je odabrati *Crystal/Ceramic Resonator*. Ovim se omogućava aktivacija oscilatora. Dodatna podešavanja oscilatora nalaze se u kartici *Clock Configuration*. U polju *HCLK(MHz)* potrebno je uneti vrednost 216MHz. Ovim parametrom je vrednost sistemskog takta mikrokontrolera postavljena na 216MHz.

U *SYS* kartici podkartica *Debug* postavljena je na *Disable*, dok je podkartica *TimeBase Source* inicijalizovana na *SysTick*.

U kartici *USB OTG FS* odabran je *Mode, Device Only*. Ovim je omogućena komunikacija između računara i razvojnog sistema mikromedie.

U kartici *Project* pokrenuti opciju *Generate Code* i ovim postupkom je završena konfiguracija svih potrebnih periferija mikrokontrolera za ovaj projekat.

5.2 Struktura izvršnog programa

Razvojno okruženje u kom je dizajnirana i implementirana aplikacija za *IR* kameru u ovom projektu naziva se System Workbench for STM32(SW4STM32). Ovo razvojno okruženje bazirano je na Eclipse razvojnom okruženju i pruža veoma dobru podršku porodici mikrokontrolera STM32. Sadrži GCC C/C++ kompajler i kompatibilan je sa STM32 CubeMX konfiguratorom[4].

Izvršni program aplikacije podeljen je u nekoliko celina. Program se sastoji od četiri segmenta, a to su:

- 1) Inicijalizacija detektora MLX90640
- 2) Čitanje podataka sa senzora IR GRID 3 Click
- 3) Obrada pročitanih podataka sa senzora
- 4) Prikaz termalne slike na TFT ekranu razvojnog sistema

U prvom koraku u radu sa razvojnim okruženjem potrebno je otvoriti projekat fajl u kom su inicijalizovane periferije mikrokontrolera. Za potrebe ovog projekta dodatno su upotrebljene gotove biblioteke za inicijalizaciju *TFT* displeja razvojnog sistema i ispis slova i brojeva na displeju. Potrebno je uključiti u projekat *header* i *source* fajlove pod nazivom *GUICnf* i *LCDCnf*. Ovim postupkom je mikrokontroleru omogućeno prepoznavanje *TFT* ekrana na razvojnom sistemu. Sa ovim korakom je završena inicijalizacija svih periferija i komponenti na razvojnom sistemu. Ako je sve u prethodnim koracima mikrokontroler uspešno prepoznao i inicijalizovao sada je moguće započeti razvoj algoritma za celu aplikaciju *IR* kamere.

5.3 Inicijalizacija detektora MLX90640

Proizvođač detektora MLX90640 u *datasheet*-u senzora nudi niz određenih funkcija koje pristupaju memoriji detektora putem *I2C* protokola. Ovim se postiže ušteda na vremenu u programiranju i smanjivanje broja grešaka pri inicijalizaciji samog senzora. Ponuđene funkcije su kompatibilne za bilo koju platformu i moguće ih je adekvatno prilagoditi i promeniti u skladu sa potrebama projekta. Za rad sa pomenutim funkcijama potrebno je uključiti *header* i *source* fajlove pod nazivom *MLX90640_API* i *MLX90640_I2C_Driver*.

U funkciji *MLX90640_Init* se izvršava inicijalizacija određenih memorijskih lokacija u detektoru, ali i ekstrakcija podataka iz *eprom*-a. Prvo se izvršava funkcija *MLX90640_DumpEE* koja ima ulogu da pročita upisane podatke u *eprom*-u sa svih 832 lokacija. Ako su podaci adekvatno pročitani i nije došlo do greške u prenosu dolazi do izvršavanja funkcije *MLX90640_ExtractParameters* koja ima cilj da pročitane podatke adekvatno obradi. Obrada podataka i računanje vrši se na osnovu formula i preporuka u *datasheet*-u detektora. Neki od najznačajnijih parametara koji se čitaju i obrađuju sa senzora su napajanje(*eng.VDD*), offset(*eng.Offset*), pojačanje svakog piksela(*eng.Gain*), ambijentalna temperatura i osetljivost svakog piksela. U registre tačno definisane adrese upisane su vrednosti za način i brzinu osvežavanja piksela. U ovom projektu brzina osvežavanja podešena je na 4Hz i način osvežavanja je poput izgleda šahovskih polja(*eng.Chess pattern*). Ukoliko nije došlo do bilo kakve greške u obradi podataka ili prenosa smatra se da je inicijalizacija završena.

5.4 Čitanje podataka sa senzora

Čitanje podataka omogućava funkcija *MLX90640_GetFrame* koja je prilagođena potrebama ovog projekta i u njoj su integrirane funkcije *HAL_I2C_Mem_Read* i *HAL_I2C_Mem_Write*. U funkciji je prvo potrebno omogućiti čitanje vrednosti statusnog registra koji zauzima adresu 0x8000. Pročitane vrednosti je potrebno resetovati i upisati nazad u registar. Ovim je omogućeno da se u *RAM* memoriji detektora osveže podaci o temperaturi za novo čitanje. Ovo je potrebno uraditi u svakoj iteraciji kada se čitaju nove vrednosti svakog piksela. Kada je ovo ispunjeno omogućeno je čitanje vrednosti svih 768 piksela iz *RAM* memorije detektora.

5.5 Izračunavanje podataka o temperaturi objekta

Kako bi prikaz temperature objekta bio što približniji tačnoj vrednosti, pre računanja temperature objekta potrebno je izračunati temperaturu ambijenta po formuli iz *datasheet*-a. Proračun temperature ambijenta obavlja funkcija *MLX90640_GetTa* i dobijena vrednost ambijentalne temperature je zajednička za sve piksele.

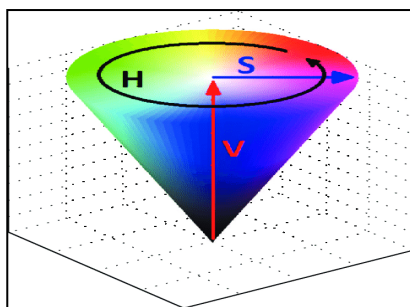
Uz podešen koeficijent emisivnosti objekta, odnosno površine koja emituje toplotno zračenje i izračunate vrednosti ambijentalne temperature na raspolaganju su svi neophodni podaci za proračun vrednosti temperature objekta. Funkcija *MLX90640_CalculateTo* vrši proračun temperature na osnovu svih prethodno pomenutih parametara za svaki piksel pojedinačno. U funkciji su uzeti u obzir parametri pojačanja, ofseta, vrednost napajanja i mnogi drugi.

5.6 Izračunavanje vrednosti boja i njihova konverzija

Nakon izračunate vrednosti temperature objekta svakog piksela moguće je dalje konvertovati podatak u različite prostore boja koji odgovaraju potrebama projekta. U ovom projektu vrednosti su konvertovane u *HSV* prostor boja, a potom u *RGB888* i *RGB565*.

5.6.1 HSV prostor boja

HSV prostor boja predstavlja alternativan prikaz boja za *RGB* prostor. Osnovan je u grafičkoj industriji kako bi se definisale razlike u boji i kako bi se poboljšala percepcija atributa boja ljudskom oku. Sastoji se od tri parametra ton boje(*eng.Hue*) koji određuje dominantnu talasnu dužinu boje, zasićenosti(*eng.Saturation*) koja opisuje sadržaj bele u boji i vrednosti(*eng.Value*) koja opisuje hromatske attribute. *HSV* prostor boja predstavljen je preko geometrijskog oblika obrnute kupe. *HSV* prostor boja je prikazan na slici 9.



Slika 9. HSV prostor boja

Funkcija *HSV* sadrži tri argumenta ton boje(*eng.Hue*), zasićenost(*eng.Saturation*) i vrednost boje(*eng.Value*). Ton boje u funkciji predstavlja skalirana i invertovana vrednost podatka o temperaturi sa senzora. Skaliranje i invertovanje je izvršeno u funkciji *Scale_Hue* preko koje se definiše opseg boja i u koju je implementirana formula za linearno skaliranje vrednosti u dve tačke. Opseg tona boje je ograničen između 0 i 240. Vrednost 0 u *HSV* prostoru boja predstavlja crvenu, a vrednost 240 plavu boju. Vrednosti zasićenosti i vrednosti su konstantni za svaki piksel i iznosi 100. Ovo omogućava 240 različitih boja za opseg koji je definisan(npr. opseg temperature od 0°C do 120°C). Vrednost koju funkcija *HSV* vraća je vrednost boje u *RGB888* prostoru boja i obavlja se na osnovu formule koja definiše konverziju iz *HSV* u *RGB888*. Formula po kojoj se obavlja konverzija prikazana je na slici 10.

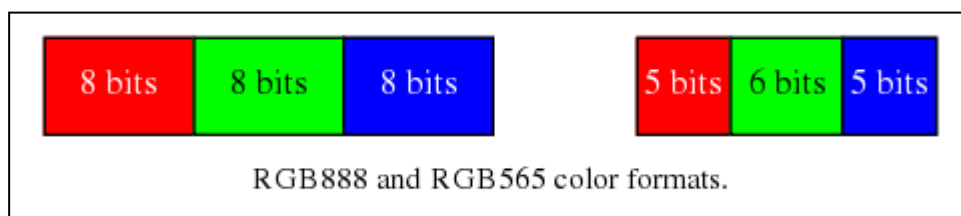
$$\begin{aligned}
 h_i &= \left\lfloor \frac{h}{60} \right\rfloor \bmod 6 \\
 f &= \frac{h}{60} - h_i \\
 p &= v \times (1 - s) \\
 q &= v \times (1 - f \times s) \\
 t &= v \times (1 - (1 - f) \times s) \\
 (r, g, b) &= \begin{cases} (v, t, p), & \text{if } h_i = 0 \\ (q, v, p), & \text{if } h_i = 1 \\ (p, v, t), & \text{if } h_i = 2 \\ (p, q, v), & \text{if } h_i = 3 \\ (t, p, v), & \text{if } h_i = 4 \\ (v, p, q), & \text{if } h_i = 5 \end{cases}
 \end{aligned}$$

Slika 10. Formula za konverziju iz *HSV* u *RGB888*

5.6.2 *RGB888* i *RGB565* prostori boja

U *RGB888* prostoru moguće je na raspolaganju imati 2^{24} različitih boja. Za reprezentaciju boja u ovom prostoru koriste se tri bajta, jedan bajt za crvenu(*eng.Red*), zelenu(*eng.Green*) i plavu(*eng.Blue*). Različite boje dobijaju se adekvatnom aditivnom sintezom tri osnovne boje.

RGB565 prostor boja nudi 2^{16} različitih boja. Dobija se tako što se vrši odsecanje bita najnižeg značaja za svaku osnovnu boju. U konverziji iz *RGB888* u *RGB565* dolazi do odsecanja 3 najmanje značajna bita za crvenu, 2 za zelenu i 3 za plavu. Ovim se postiže kod boje od 16 bita koji je pogodniji za manipulaciju i prikaz na uređajima koji zahtevaju izvor svetlosti(monitori). Razlika između *RGB888* i *RGB565* je prikazana na slici 11.



Slika 11. *RGB888* i *RGB565* prostori boja

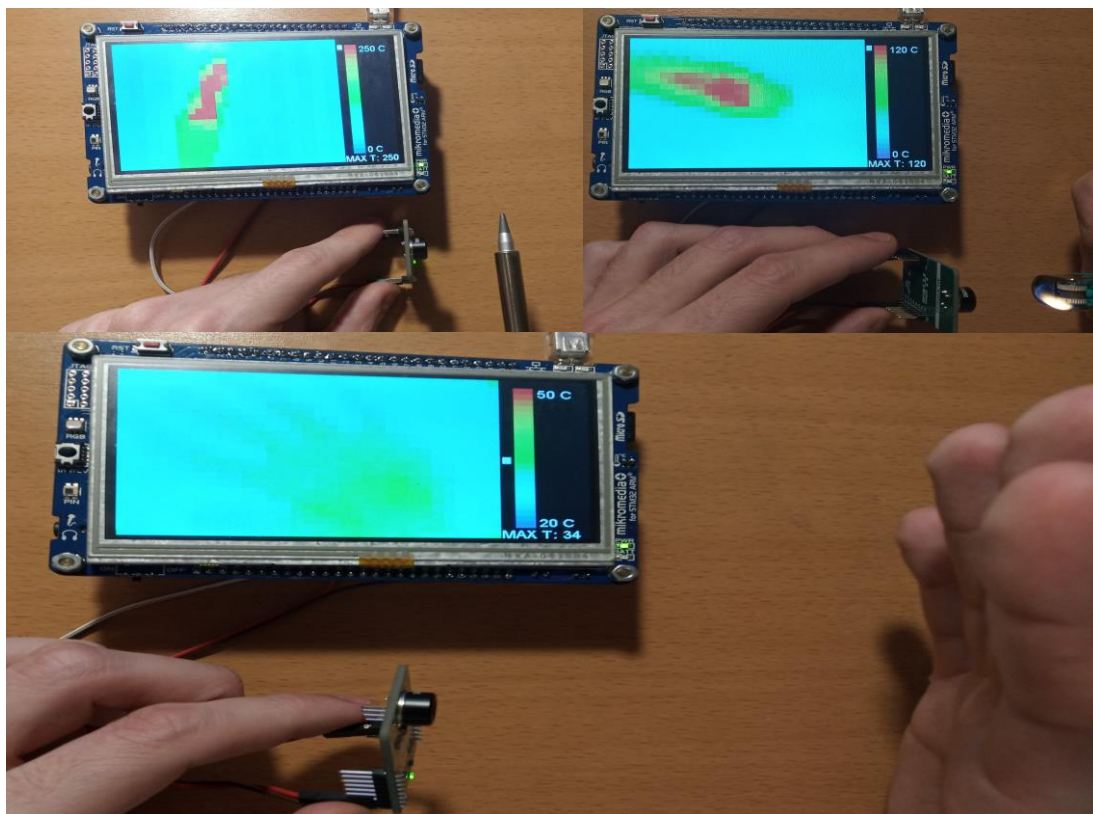
Funkcija koja obavlja konverziju boje iz *RGB888* u *RGB565* u ovom projektu naziva se *convertRGB*. Funkcija sadrži tri argumenta. Prvi argument je *source(src)* prostor boje iz kog se konvertuje a to je *RGB888*, drugi je *destination(dst)* i predstavlja prostor boja u koji se konvertuje u ovom slučaju *RGB565* i treći parameter je vrednost boje koja se konvertuje. Funkcija vrši odsecanje bita najmanjeg značaja i vraća 16-bitnu vrednost kao podatak o vrednosti boje.

Funkcije za skaliranje tona boje i konverziju boja pozvane se u funkciji *Change_me*. Nakon izvršavanja ove funkcije krajnji rezultat je boja u *RGB565* prostoru. Sa pozivom ove funkcije završena je celokupna obrada svih podataka i na raspolaganju su podaci koji se mogu poslati na *TFT* displej kako bi se omogućio prikaz termalne slike objekta koji se posmatra.

5.7 Prikaz termalne slike na *TFT* ekranu

Prikaz slike obavlja se preko drajvera za displej *SSD1963* koji je u stalnom dosluhu sa mikrokontrolerom. Rezolucija slike na ekranu displeja je 320x264 piksela. Senzor sadrži matricu 32x24 piksela osetljivih na *IR* zračenje. Jedan piksel senzora predstavlja 10 piksela po horizontalnoj ravni i 11 piksela po vertikalnoj ravni na *TFT* ekranu, odnosno pravougaonik dimenzija 10x11 piksela. Slanje podataka na ekran obavljeno je preko funkcije *SSD1963_FillArea*.

Dodatno, implementirana je skala temperaturnog opsega i skala boja kako bi korisnik znao približnu temperaturu objekta koji meri. Na ekranu se vrši ispis maksimalne temperature koju senzor detektuje. Pored skale nalazi se kursor bele boje koji ima slobodu kretanja u vertikalnoj ravni i na taj način pokazuje boju maksimalne temperature. Prikaz termalne slike za različite opsege nalazi se na slici 12.



Slika 12. Prikaz termalne slike za različite opsege i objekte

7. Zaključak

Uporebljene komponente za realizaciju IR kamere i njihova integracija u jednu celinu pružile su veoma dobru termalnu sliku na ekranu razvojnog sistema. Može se naglasiti da je projekat veoma uspešno realizovan i pohvaliti se niskom cenom izrade IR kamere koja je u ovom slučaju povoljnija u odnosu na komercijalno dostupne. Sa realizovanom IR kamerom u ovom projektu moguće je brzo meriti temperaturu nekog objekta, npr. temperaturu mikroprocesora koji se zagreva u toku rada.

Danas se pridaje veliki značaj upotrebi IR senzora i termalnih kamera kao uređaja u različitim oblastima nauke i tehnike. Ovo potvrđuje njihov razvoj i usavršavanje u poslednjih 60 godina. Našli su veoma široku primenu u astronomiji i savremenim teleskopima i uređajima.

8. Literatura

- [1] <https://www.melexis.com/en/product/mlx90640/far-infrared-thermal-sensor-array> pristupljeno: 4.2.2020.
- [2] <https://www.mikroe.com/mikromedia-4-stm32f7> pristupljeno: 4.2.2020.
- [3] <https://en.wikipedia.org/wiki/Microbolometer> pristupljeno: 6.2.2020.
- [4] <https://www.st.com/en/development-tools/sw4stm32.html> pristupljeno: 7.2.2020.
- [5] https://sr.wikipedia.org/sr-el/Планков_закон pristupljeno: 7.2.2020.
- [6] https://sr.wikipedia.org/sr/Vinov_zakon_pomeranja pristupljeno: 7.2.2020.