

# Radar koji prodire u zemlju

---

**Franić, Ivan**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies, Rijeka / Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:390230>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-08-10**



**Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**  
University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
POMORSKI FAKULTET**

**IVAN FRANIĆ**

**RADAR KOJI PRODIRE U ZEMLJU**

**DIPLOMSKI RAD**

Rijeka, 2023.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI**  
**POMORSKI FAKULTET**

**RADAR KOJI PRODIRE U ZEMLJU**  
**GROUND PENETRATING RADAR**

**DIPLOMSKI RAD**

Kolegij: Internet stvari

Mentor: izv. prof. dr. sc. Jasmin Čelić

Student: Ivan Franić

Studijski smjer: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0112074134

Rijeka, rujan 2023.

Student: Ivan Franić

Studijski program: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

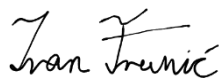
JMBAG: 0112074134

## IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI DIPLOMSKOG RADA

Kojom izjavljujem da sam diplomski rad s naslovom **Radar koji prodire u zemlju** izradio samostalno pod mentorstvom izv. prof. dr. sc. Jasmina Čelića.

U radu sam primijenio metodologiju izrade stručnog/znanstvenog rada i koristio literaturu koja je navedena na kraju diplomskog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući naveo u diplomskom radu na uobičajen, standardan način citirao sam i povezao s fusnotama i korištenim bibliografskim jedinicama, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Student



---

Ivan Franić

Student: Ivan Franić

Studijski program: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0112074134

IZJAVA STUDENTA – AUTORA  
O JAVNOJ OBJAVI OBRANJENOG DIPLOMSKOG RADA

Izjavljujem da kao student – autor diplomskog rada dozvoljavam Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci da ga trajno javno objavi i besplatno učini dostupnim javnosti u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta.

U svrhu podržavanja otvorenog pristupa diplomskim radovima trajno objavljenim u javno dostupnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta, ovom izjavom dajem neisključivo imovinsko pravo iskorištavanja bez sadržajnog, vremenskog i prostornog ograničenja mog diplomskog rada kao autorskog djela pod uvjetima *Creative Commons* licencije CC BY Imenovanje, prema opisu dostupnom na <http://creativecommons.org/licenses/>

Student – autor



---

## SAŽETAK

Radio valovi se danas koriste u svakoj grani industrije, principi rada su laki za razumjeti i uporabljivi u mnogo raznih sustava. Cilj ovoga rada jest objasniti na koji način se pomoću radio valova može odrediti prisutnosti poziciju određenog materijala u tlu. Rad sadrži opis komponenata sustava za detekciju različitih elemenata unutar tla do određene dubine. Bit će objašnjeno sklopovlje sustava radara koji prodire u zemlju te principi rada takvoga sustava na što jednostavniji način. Rad će sadržavati idejni projekt načina izrade radara koji prodire u zemlju na Arduino Mega 2560 platformi. Funkcija izrađenoga sustava će biti detekcija kamenih naslaga u suhome tlu, no uz male preinake sustav se može prilagoditi za razne uporabe.

Ključne riječi: RADAR, RADAR koji prodire u zemlju, Arduino Mega 2560, GPR, radio valovi.

## SUMMARY

Today, radio waves are employed in every industry; the operating principles are simple and applicable to a wide range of systems. The purpose of this study is to describe how radio waves may be used to locate items in the soil. The article describes the system's components for detecting various substances inside the soil up to a particular depth. The construction of the ground-penetrating radar system and its operating principles will be outlined as simply as possible. The paper will include a conceptual experiment demonstrating how to build a ground-penetrating radar using the Arduino Mega 2560 platform. The created system will identify stone deposits in dry soil, but with minor adjustments, it may be applied for other applications.

Keywords: RADAR, RADAR which penetrates the earth, Arduino Mega 2560, GPR, radio waves.

# SADRŽAJ

SAŽETAK .....	I
SUMMARY .....	I
SADRŽAJ .....	II
1. UVOD .....	1
1.1 PROBLEM I PREDMET ISTRAŽIVANJA .....	1
1.2 RADNA HIPOTEZA .....	1
1.3 SVRHA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA .....	2
1.4 ZNANSTVENE METODE .....	2
1.5 STRUKTURA RADA .....	2
2. POVIJEST RADIO VALOVA .....	4
1.4 VODEĆI ZNANSTVENICI VEZANI UZ NAPREDAK TEORIJE RADIO VALOVA ....	4
1.5 NAPREDAK RADARSKE TEHNOLOGIJE TOKOM VREMENA .....	6
1.6 POVIJEST RADARA KOJI PRODIRE U ZEMLJU .....	9
3. TEHNOLOGIJA RADARA KOJI PRODIRE U ZEMLJU .....	10
1.7 TEORIJA VALOVA .....	12
3.1.1 Longitudinalni val .....	13
3.1.2 Transverzalni val .....	14
3.1.3 Klasifikacija polarizacije radio valova .....	14
3.1.4 Dekompozicija polariziranih radio valova .....	16
3.2 RADIO VALOVI RADARA KOJI PRODIRE U ZEMLJU .....	20
3.2.1 Dielektrična konstanta materijala .....	23
3.2.2 Dipol antena .....	25

3.2.3 Antipodalna vivaldi antena .....	26
3.2.4 Pozicioniranje antena .....	28
3.2.5 Refleksija i difrakcija signala.....	29
3.2.6 Rezolucija sustava radara koji prodire u zemlju .....	32
3.3 GENERATOR FREKVENCIJE.....	35
3.3.1 Način rada VCO.....	35
3.4 RAČUNALNI SUSTAV RADARA KOJI PRODIRE U ZEMLJU.....	39
3.4.1 Brza Fourierova Transformacija .....	39
3.4.2 Pretvarač digitalnog signala u analogni .....	40
3.4.3 Niskošumno pojačalo.....	42
3.4.4 Niskopropusni filter .....	43
4. MODEL RADARA KOJI PRODIRE U ZEMLJU KAO SUSTAVA ZA DETEKCIJU KAMENIH NASLAGA.....	44
4.1 ZADATAK SUSTAVA RADARA KOJI PRODIRE U ZEMLJU KAO SUSTAVA ZA ZAŠTITU POLJOPRIVREDNE OPREME .....	45
4.2 OPIS IDEJNOG PROJEKTA .....	46
4.3 MODEL SUSTAVA RADARA ZA DETEKCIJU KAMENA.....	47
5. ZAKLJUČAK.....	50
POPIS LITERATURE .....	51
POPIS SLIKA.....	54
POPIS TABLICA .....	56
POPIS FORMULA .....	56
TABLICA KRATICA .....	58



# **1. UVOD**

Moderan svijet zahtjeva tehnološke napretke da bi se poboljšao način života ljudi i okoline. Radio valovi jesu tip radijacije na elektromagnetskom spektru koji se primarno koriste za prijenos informacija na daleke udaljenosti. Jedno svojstvo takvih valova jest mogućnost prolaska ili odbijanja od različite vrste materijala. Tako se radio valovi mogu koristiti kao osjetni medij za fizičke tvari koje postoje u životnoj okolini ljudi. Ovaj rad opisuje način rada koji prodire u zemlju.

## **1.1 PROBLEM I PREDMET ISTRAŽIVANJA**

Na osnovu relevantnih činjenica o problematici znanstvenog istraživanja može se definirati problem istraživanja: Relativno jednostavan oblik korištenja radio valova kao moderna tehnologija jest skupo cijenjen. Načini pretrage naslaga raznih materijala pod zemljom jest u bližnjoj prošlosti bio cjenovno neprihvatljiv u većini slučajeva izvan visoko profesionalne uporabe. Fizičke komponente te teorijski dio izrade su zahtijevali visoka monetarna ulaganja, pa kao takvi nisu bili isplativi osobama koje nisu profesionalno vezane za granu industrije kojoj je tehnologija radio valova koji prodiru u zemlju krajnje potrebna prilikom obavljanja dužnosti. Predmet istraživanja će biti način izrade sustava za detekciju kamena po zemljinoj površini, kao jedan od jednostavnijih sustava koji koriste tehnologiju koja se služi radio valovima.

## **1.2 RADNA HIPOTEZA**

Pretpostavka jest da sklop koji ima mogućnost kreiranja i odašiljanja radio valova, ima mogućnost dobivanja povratne informacije o mogućim preprekama na koje takav radio val može naići. Temeljnim zakonima fizikalnih svojstava radio valova moguće je pretpostaviti da prilikom odašiljanja elektromagnetskog vala određene frekvencije, sustav može dobiti povratnu informaciju o postojanju prepreke u koji radio val određene frekvencije ne može prodrijeti .

### **1.3 SVRHA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA**

Svrha završnoga rada jest opisati način rada sustava koji koristi radio valove za detekciju različitih materijala ispod zemljine površine. Cilj rada jest istraga sustava detekcije podzemnih nakupina kao što su cement, kamenje, prazan prostor.

### **1.4 ZNANSTVENE METODE**

Znanstvene metode koje su korištene u ovom radu jesu: metoda promatranja, deduktivna metoda, metoda analize i sinteze, te metoda deskripcije.

### **1.5 STRUKTURA RADA**

Diplomski rad podijeljen je u pet dijelova koji su međusobno povezani i sustavno upoznaju čitatelja sa svim potrebnim znanjima za upoznavanje koncepta radara koji prodire u zemlju

Prvi dio je Uvod i u njemu su opisani problem, predmet i objekt istraživanja. Potom je dana radna hipoteza, svrha i ciljevi istraživanja te znanstvene metode koje su korištene. Na kraju se nalazi struktura rada.

„POVIJEST RADIO VALOVA“ u drugom poglavlju pojašnjava događaje iz prošlosti koji su doveli do moderne tehnologije radara koji prodiru u zemlju.

Treći dio naslovljen „TEHNOLOGIJA RADARA KOJI PRODIRE U ZEMLJU“ se bavi konceptima i fizičkim komponentama radara koji prodire u zemlju. Isto tako objašnjava se način rada pojedine komponente te njihova važnost u sustavu.

U četvrtom dijelu pod naslovom „MODEL RADARA KOJI PRODIRE U ZEMLJU KAO SUSTAVA ZA DETEKCIJU KAMENIH NASLAGA“ prikazuje se konceptualni sustav kojega je autor rada osmislio kako bi se poboljšao život osoba u poljoprivrednom sektoru.

„Zaključak“ je peti dio ovog rada u kojem su iznesene najbitnije informacije iz svih navedenih dijelova, te se potvrđuje radna hipoteza. Također se govori o budućnosti tehnologije radio valova i radara koji prodiru u zemlju.

## 2. POVIJEST RADIO VALOVA

Danas nema informacijske tehnologije koja u nekom pogledu ne koristi elektromagnetski val za prijenos informacije. Radoznalost ljudske rase povezana je s potrebom da se otkriju tajne našega okružja. Davne 1700. ljudska rasa je počekala istraživati elektromagnetsku silu no nitko nije bio uspješan u dokazivanju takve pojave kao nečega što postoji. Postoji mnogo osoba tijekom povijesti koje su zaslužne za razvoj teorije elektromagnetskoga vala no niti jedna nije toliko bitna kao James Clerk Maxwell.

### 1.4 VODEĆI ZNANSTVENICI VEZANI UZ NAPREDAK TEORIJE RADIO VALOVA

James Clerk Maxwell (Slika 2.1), rođen 13. lipnja 1831. u Edinburghu jest Škotski fizičar koji je prvi matematički objasnio nastajanje elektromagnetskoga vala sa svojim jednadžbama za elektromagnetske valove kasnije poznatima po imenu Maxwellove jednadžbe. 1873. godine Maxwell objavljuje rad pod naslovom Rasprava o elektricitetu i magnetizmu (eng. *Treatise on Electricity and Magnetism*). Prvi matematički dokaz o postojanju i načinu nastanka električne sile oko voda električne struje je sažet u dvije strane njegovoga rada.



**Slika 2.1 James Clerk Maxwell**

Izvor: <https://www.britannica.com/biography/James-Clerk-Maxwell>

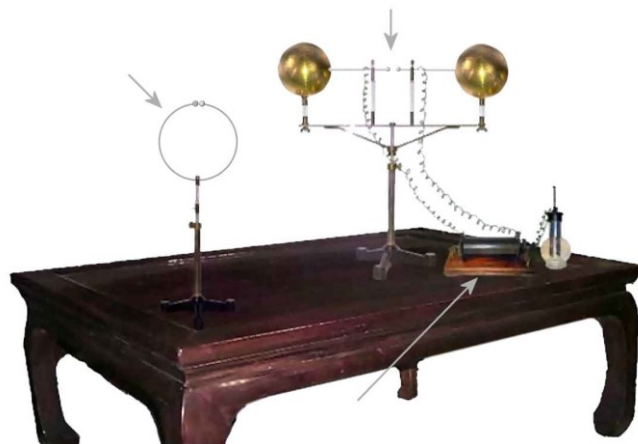
Heinrich Hertz (Slika 2.2), jest Njemački fizičar i izumitelj rođen u veljači 1857. u Hamburgu. Hertz je jedan od najupečatljivijih znanstvenika koji su se bavili fizikom elektrona. Kao takav Hertz je imao jako veliki utjecaj na znanost i fiziku 19. stoljeća. Hertz jest zaslužan za dokazivanje Maxwellove teorije o postojanju elektromagnetske sile no znanstvenik naime nije imao potrebu doseći viši stupanj shvaćanja ovakve teme po njegovim riječima (Meni ovakvo znanje nije korisno).



**Slika 2.2 Heinrich Hertz**

Izvor: <https://www.history-and-philosophy-of-physics.com/heinrich-hertz-fellowship.html>

Heinrich je 1888. u Karlsruhe Polytechnic u Berlinu izveo pokus sa slike 2.3 u kojem je prikazao da se valovi koji su stvoreni prisilnim stvaranjem iskre između dva vodiča mogu osjetiti na metalnoj šipci udaljenoj od iskre. Ovaj pokus je začetak prijenosa elektromagnetskih valova koji je direktno utjecao na doba informacija u kojemu danas živimo. Iz tog razloga jedinica za frekvenciju vala je dobila ime Hertz. Ovakav eksperiment je dokazao da elektromagnetski val putuje brzinom svjetla te da se elektromagnetski valovi reflektiraju od sjajne metale. Pokus naime s tim realizacijama dokazuje da su sunčeva svjetlost i valovi proizvedeni pokusom, ista vrsta vala ali s velikom razlikom u frekvencijama.



**Slika 2.3 Pokus elektromagnetskog zračenja.**

Izvor: <https://www.radartutorial.eu/04.history/hi84.en.html>

## **1.5 NAPREDAK RADARSKJE TEHNOLOGIJE TOKOM VREMENA**

Radarska tehnologija za detekciju metalnih predmeta počela se razvijati tijekom prvog svjetskog rata i ostaje u uporabi sve do današnjeg dana. Naime plovidba velikim metalnim brodovima kroz maglu je opasan pothvat koji zahtjeva dosta sreće i snalažljivosti. Prvi izumitelj koje je predložio korištenje radio valova za detekciju brodova u magli jest Nijemac Christian Hülsmeier.

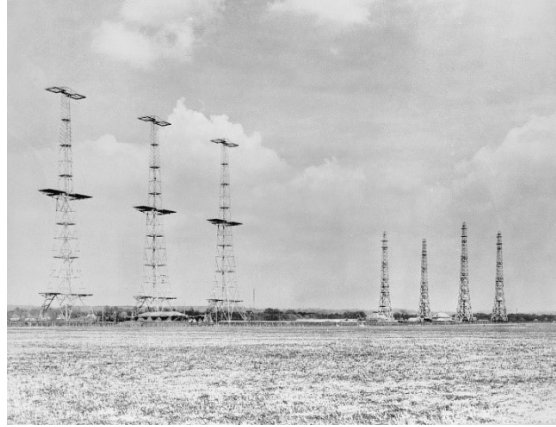
Christian Hülsmeier (Slika 2.4) rođen 25. prosinca 1881 u Eydelstedu je fizičar i izumitelj koji je zaslužan za prikazivanje tehnologije radio valova tada neupućenom puku. 1903 godine Christian Hülsmeier prvi put prikazuje svoj sustava za detekciju brodova u magli nedugo nakon čega dobiva značajnu svotu novca da patentira svoju ideju 1904. godine, pod nazivom „telemobiloscope“ što bi prevedeno na Hrvatski jezik imalo značenje sustav za daljinski prikaz kretanja. Potrebno je pojasniti da ovakav sustav nije imao mogućnost mjerenja udaljenosti već je samo ukazivao na postojanje velikoga metalnoga predmeta u nekome smjeru.



**Slika 2.4 Christian Hülsmeier**

Izvor: <https://www.radartutorial.eu/04.history/hi86.en.html>

Nedugo nakon patentiranja sustava za detekciju brodova koji radi na principu radio valova, ljudski rod je počeo osmišljavati nove modele korištenja takve tehnologije no nije bilo većih otkrića do perioda između 1934.-1939. gdje je svaka tehnološki sposobna nacija počela s razvojem svoje vrste radarske tehnologije. Nacije koje su bile uključene u razvoj su to obavljale u tajnosti no danas se mogu nabrojati: Velika Britanija, Njemačka, Sjedinjene Države, SSSR, Japan, Nizozemska, Francuska i Italija. Sve nabrojane nacije su imale neku vrstu radarske tehnologije koja mjeri udaljenost pomoći precizno namještenih sklopova oscilatora koji u impulsima šalju signal te mjere vrijeme povratka signala do antene. 1939. godine je osmišljen cjelokupni naziv za tehnologiju detekcije pomoću radio valova koji predlaže Obavještajni korpus Sjedinjenih Država. Riječ RADAR jest skraćenica koja opisuje svrhu uređaja istog imena, osmišljena na engleskom jeziku a znači radio detekcija i domet (eng. *Radio Detection and Ranging*). Početkom drugog svjetskog rata Britansko kraljevsko zrakoplovstvo dolazi na ideju radarskog sustava koji služi za uzbunjivanje. 1940 nastaje „Chain Home“ (Slika 2.5) sustav za ranu detekciju prijetnji, postavljen na obalu otoka Velike Britanije. Sustav je radio na frekvenciji od 20 do 55 MHz i imao je domet od 160 km, za usporedbu, moderni sustavi radarske detekcije D-band sustavi koji se koriste u vojne svrhe imaju osjetni domet do 450 km i rade na frekvencijama od 110 GHz do 170 GHz.



**Slika 2.5 Britanski Chain Home sustav radarske detekcije.**

Izvor: [https://www.researchgate.net/figure/Station-de-la-Chain-Home-GB-1939\\_fig3\\_334608598](https://www.researchgate.net/figure/Station-de-la-Chain-Home-GB-1939_fig3_334608598)

Radarska tehnologija je napredovala veoma brzo radi potrebe za informacijama i strateškom nadmoći tijekom drugog svjetskog rata. Neki fizičari spore da radar kao izum nije veliki doprinos ljudskoj rasi zato što su principi rada elektromagnetskoga vala bili poznati dugi niz godina prije početka drugog svjetskog rata. Kako bi francuski inženjer Maurice Ponte izjavio:

„Temeljni princip radara pripada zajedničkom naslijeđu fizičara; uostalom, ono što ostaje na čast tehničara mjeri se učinkovitom realizacijom operativnih materijala.“

Dok je druga strana rasprave sagledava praktičnu uporabu radara i radarske tehnologije koja je donijela pobjedu strani saveznika u drugome svjetskome ratu i koja doprinosi boljitku života naroda. New York Times novinar Matthew L. o recenziji knjige „The Invention that Changed the World, Simon & Schuster, 1996“:

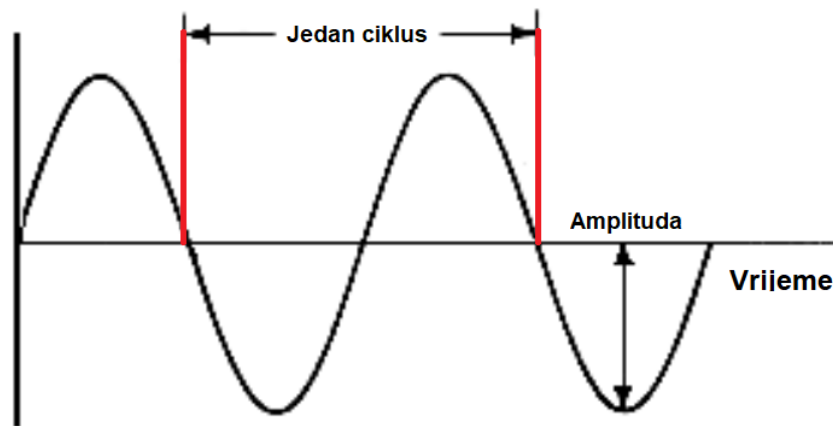
„radar has been the root of a wide range of achievements since the war, producing a veritable family tree of modern technologies. Because of radar, astronomers can map the contours of far-off planets, physicians can see images of internal organs, meteorologists can measure rain falling in distant places, air travel is hundreds of times safer than travel by road, long-distance telephone calls are cheaper than postage, computers have become ubiquitous and ordinary people can cook their daily dinners in the time between sitcoms, with what used to be called a radar range.“ [35]



## 1.6 POVIJEST RADARA KOJI PRODIRE U ZEMLJU

Važno je napomenuti da je radarska tehnologija zaslužna za prve najprimitivnije oblike računala, zbog potrebe za preciznim vremenski izračunatim impulsima elektromagnetskih valova. No takva tehnologija mjerenja vremena nije od koristi samo kroz medij zraka.

Radar koji prodire u zemlju poznat je i pod imenom „impulse radar“. Impulsni radari se razlikuju od klasičnih radara jer koriste sinusni val s jednim ciklusom. Impulsni radar se počeo koristiti 1960-ih. Slika 2.6 prikazuje najjednostavniji val koji se može opisati sinusnom funkcijom. Jedan val se naziva i jedna perioda vala ili jedan ciklus. Amplituda označava razmak između brijega vala i srednje točke.



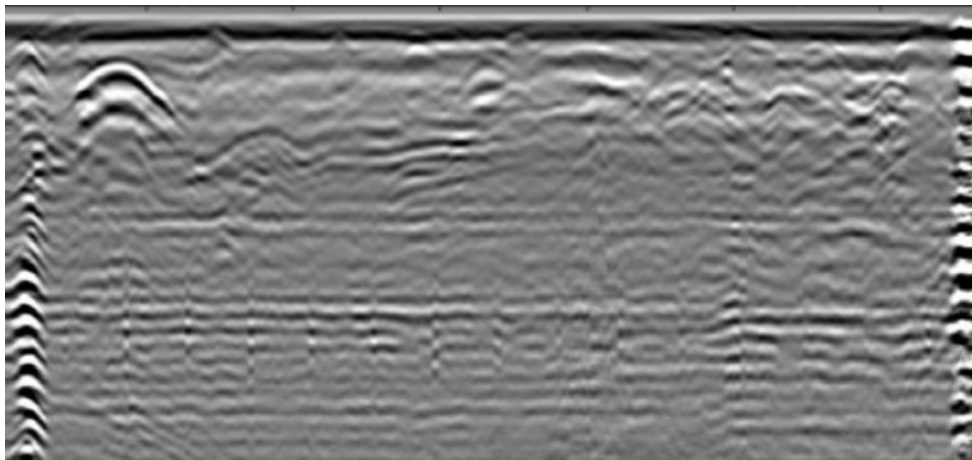
**Slika 2.6 Vizualna reprezentacija „Single cycle of sine wave“.**

Izvor: Izradio student

Prvi dokument koji spominje impulsni radar jest dokument koji je napisao znanstvenik John C. Cook i koji predlaže korištenje jedno ciklusnog VHF radara kako bi se mjerila debljina leda na polovima zemaljske kugle. Američka vlada je 1960. počela istraživati prije spomenutu tehnologiju kao alat za detekciju tunela u Viet Namu tijekom Vietnamskog rata, te se kasnije radarska tehnologija počela koristiti za pronalazak prirodnih i ne prirodnih naslaga i praznoga prostora pod zemljom. Komercijalizacijom tehnologije dolazi se do modernoga doba gdje se ovakva tehnologija koristi za pronalazak cijevi i kabela pod zemljom u gradovima prilikom operacija iskapanja i građevine.

### 3. TEHNOLOGIJA RADARA KOJI PRODIRE U ZEMLJU

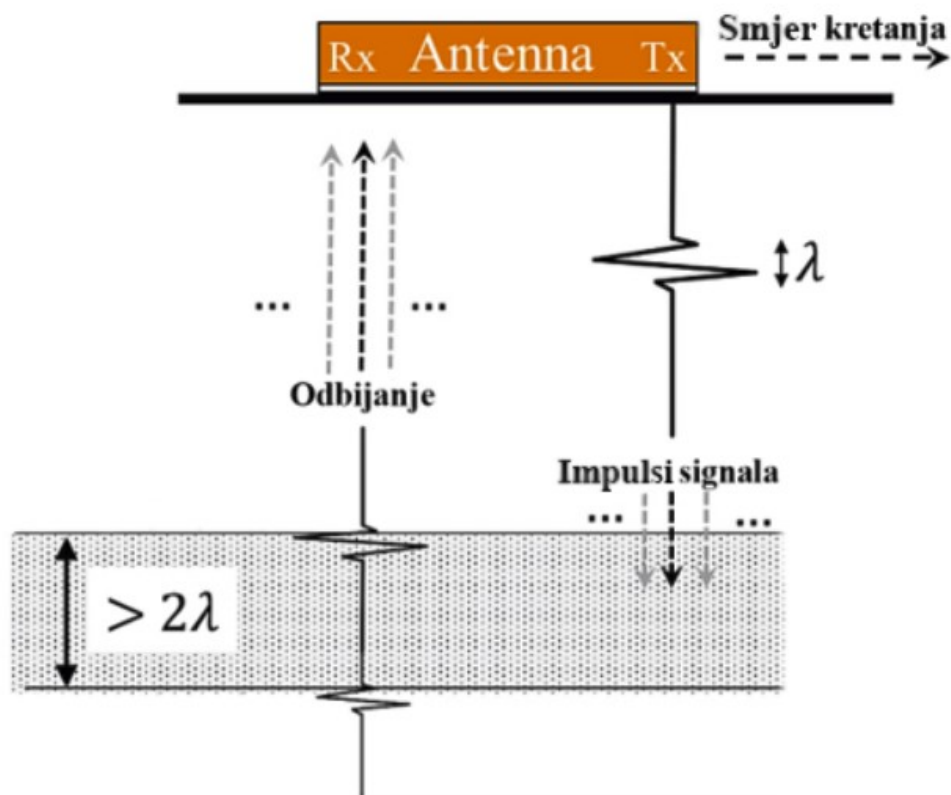
Radar koji prodire u zemlju, opće poznat pod skraćenim nazivom GPR (eng. *Ground Penetrating Radar*), jest uređaj koji služi za pretragu slojeva ispod zemljine površine. GPR uređaj se sastoji od nekoliko bitnih dijelova. Prvo i osnovno GPR sustav mora posjedovati neku vrstu računala koje kontrolira cijeli proces detekcije materije pod zemljom. Računalo naravno dolazi s nekom formom ekrana na kojemu se mogu određivati profili pretrage. Također, GPR uređaj ima monitor da bi operater mogao u stvarno vremenu imati uvid na dio podzemlja koji se skenira. Nakon računala drugi dio koji je bitan jest sklop za filtriranje i generiranje frekvencije. U većini slučajeva se koristi neka vrsta oscilatora kontroliranoga naponom zato što se lako uparuje s digitalnog na analogni pretvarač tako da računalo može direktno upravljati odaslanim signalom. Treći jako bitan dio GPR uređaja jesu i same antene. Ovisno o frekvencijama te o samoj svrsi i primjeni GPR uređaja te u neku ruku i cijeni, antene mogu biti raznih izvedbi no svaka mora imati mogućnost pokrivanja većega spektra frekvencije. Frekvencija odaslana prema zemlji putuje dok ne naiđe na prepreku nakon čega se onda reflektira prema površini, a GPR uređaj zatim pamti i upisuje u memoriju cijeli signal sa svim valnim imperfekcijama te ga nakon procesiranja iscrtava na ekranu kako bi ga operater mogao interpretirati (Slika 3.1) .



**Slika 3.1 Izgled podataka sa GPR uređaja. u skali sivih boja.**

Izvor: Image processing and neural network techniques for automatic detection and interpretation of ground penetrating radar. Jan 2002: Sazid Shihab, Waleed Al-Nuaimy, Asger Eriksen

Logično je zaključiti da ako se pregledava veća površina uređaj mora imati unaprijed određen način kretanja tom površinom. Kretanje površinom uređaj predočava raznim sensorima koji su ugrađeni na kotače uređaja. Senzor za kretanje šalje signal računalu koje naknadno šalje impuls signala na antenu. GPR koristi svojstvo elektromagnetskih valova da se odbijaju od materije, a radi na principu elektromagnetskih valova valne duljine  $\lambda$  koje uređaj preko Tx antene ispušta prema zemlji te nakon čega čeka na povratni signal iste frekvencije koji dolazi na Rx antenu (Slika 3.2). Nakon toga računalo preuzima primjeni signal te ga digitalno obrađuje i vizualno predočava korisniku (u ovom slučaju siva skala boja) kao na slici 3.1.



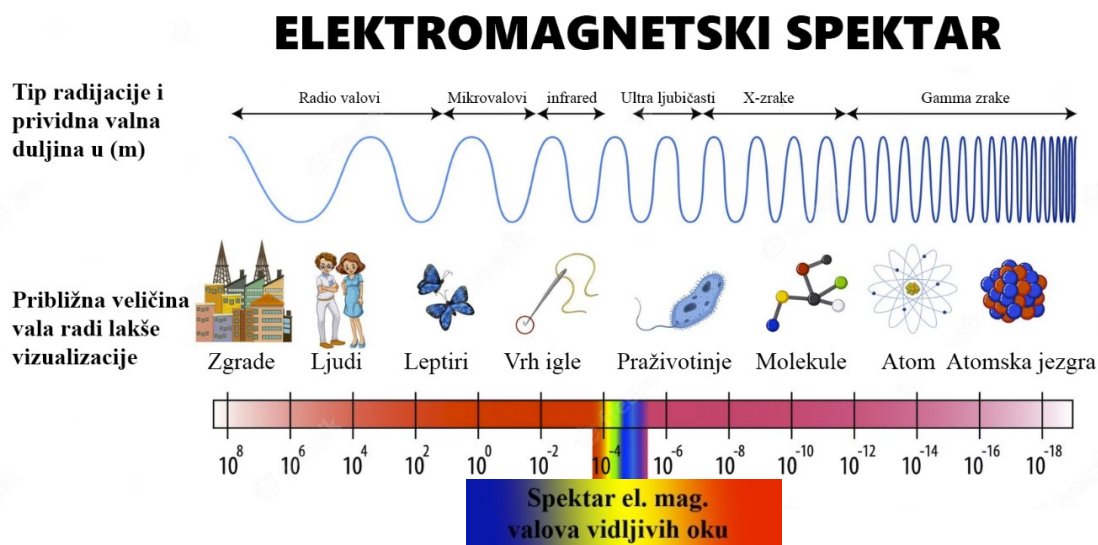
**Slika 3.2 Pojednostavljeni prikaz rada GPR sustava**

Izvor: Izradio student

## 1.7 TEORIJA VALOVA

Kako samo ime nalaže osnovna komponenta radara koji prodire u zemlju jest elektromagnetski val. Radar koji prodire u zemlju jest elektronički uređaj koji odašilje elektromagnetski val na određenoj frekvenciji pa potom čeka da se takav val odbije od unaprijed predviđenog materijala te prilikom povrata odbijenog vala, uređaj pomoću raznih matematičkih formula proračunava udaljenost takvoga materijala od antene odašiljača. Potrebno je objasniti djelovanja radio valova kako bi se lakše razumjela ograničenja takvih sustava.

Pojam elektromagnetskih valova (Slika 3.3) u današnje vrijeme nije nepoznanica, ali je bitno objasniti što su i kako se koriste kako bi se jednostavnije objasnio postupak rada radara koji prodire u zemlju. Elektromagnetski valovi se klasificiraju po spektru elektromagnetskoga zračenja. Slika 3.3 prikazuje elektromagnetske valove na lako zamisliv način. Ako bi zamislili val u dvodimenzionalnom prostoru visine zgrade fakulteta, onda bi se takav elektromagnetski val klasificirao kao radio val i na spektru sa slike bi bio skroz lijevo. Jedna činjenica koja zabrinjava mnoge stanovnike planeta je dali su radio valovi opasni po život. Naime najveće frekvencije radio valova graniče s mikrovalnim frekvencijama. Jedini efekt koji ljudi i životinje mogu osjetiti kod takvih frekvencija jest lagano isijavanje topline koje je zapravo vibriranje molekula vode u ljudskom tijelu.



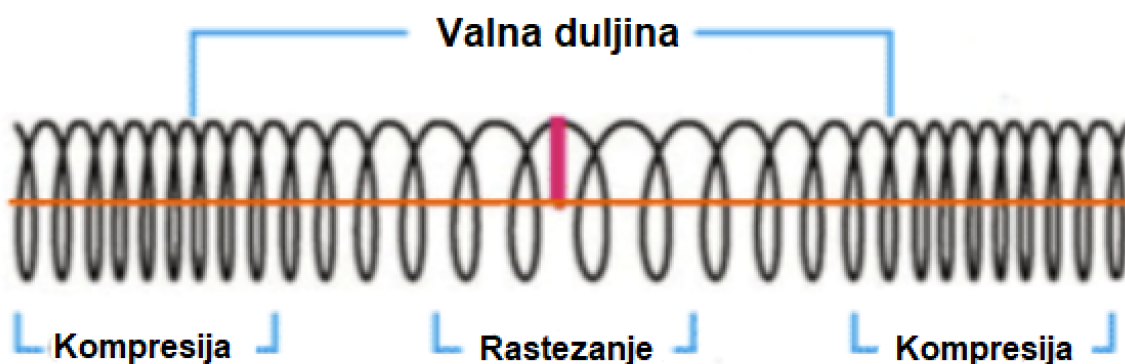
Slika 3.3 Elektromagnetski spektar

Izvor: <https://www.alamy.com/science-electromagnetic-spectrum-diagram-illustration-image431804922.html>

Valovi su smetnje na molekule koje se šire prostorom u nekom vremenu bez da se njima kroz prostor prenosi materija. Po vrsti valovi se dijele na analogne i elektromagnetske, no ako se valovi promatraju po načinu širenja, postoje dvije vrste valova koji postoje, transverzalni i longitudinalni valovi. Glavna i jedina razlika između gore navedena dva pojma jest način iskrivljenja medija kroz koji valovi prolaze. Da bi se takva smetnja nazvala valom mora imati uzvisinu i padinu koju opisuje pojam vala. Toplina koju ljudsko oko osjeti jest produkt zračenja elektromagnetskih valova. Ova pojava se naziva termalna radijacija i može se opisati kao elektromagnetski val. Što je valna duljina manja to je energija prenesena valom veća, kao primjer mogu se uzeti radio val i infracrveni val iz svakodnevnog života. Lako je odrediti koja vrsta vala više zagrijava to jest prenosi više energije, sudeći po tome da se u mikrovalnoj pećnici podgrijava hrana a WiFi odašiljač šalje mrežne podatke. Važno je napomenuti da kada elektromagnetski val dođe do smetnje njegova amplituda se promjeni kako je prikazano na slici 3.11.

### 3.1.1 Longitudinalni val

U longitudinalnom valu pomak čestice je paralelan sa smjerom širenja vala. Ako bi se uzela opruga u ruke i počeli se gurati i povlačiti prema smjeru poda, mogli bi se zamisliti kako izgleda longitudinalni val (Slika 3.4).



**Slika 3.4 Vizualna reprezentacija longitudinalnog vala**

Izvor: Izradio student

Ako se zamislilo kretanje elektrona u AC krugovima, takvi krugovi guraju elektrone kroz vodič laički rečeno naprijed nazad i tehnički takvo strujanje elektrona jest longitudinalni val.

### 3.1.2 Transverzalni val

U fizici, transverzalni val je val koji oscilira okomito na smjer napredovanja vala. Nasuprot tome, longitudinalni val putuje u smjeru svojih oscilacija. U slučaju primjene GPR uređaja jako su bitni transverzalni valovi jer radar koristi takvu vrstu vala. Najjednostavniji način da bi se dočarao oblik takvog vala jest kako je prikazano na slici 2.6 iz prijašnjeg poglavlja.

Općenito brzina vala se može izračunati dijeljenjem udaljenosti koju je prešla u određenom vremenu s vremenom potrebnim da se pređe ta udaljenost. Za transverzalne valove, ova se brzina može dobiti dijeljenjem valne duljine  $\lambda$  s periodom kao takvim:

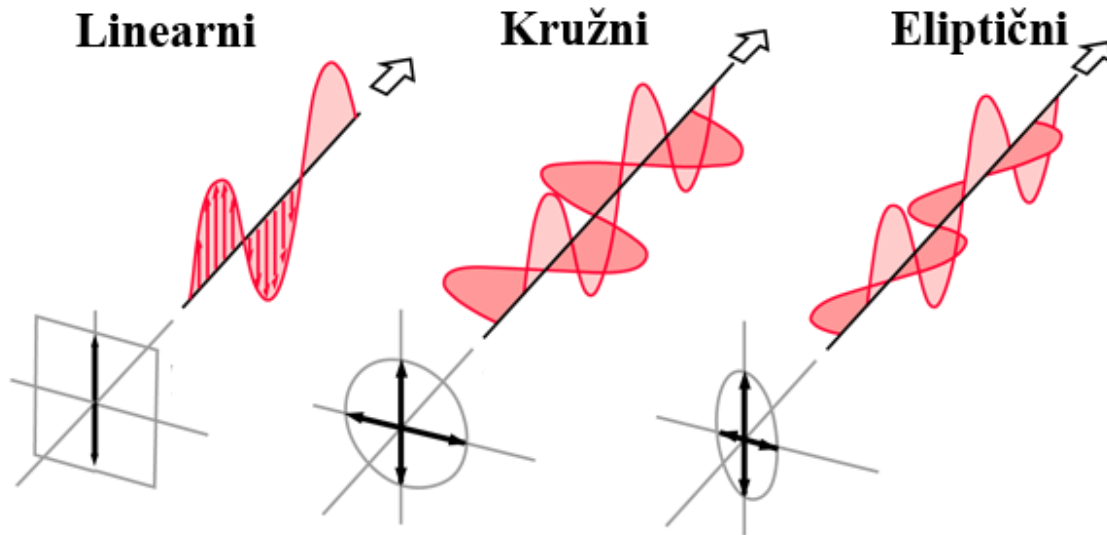
$$v = \lambda / T \quad (1)$$

Ako se uzme obrnuta proporcionalnost frekvenciji i periodu i primjeni se u gornjem izrazu, dobit će se:

$$v = \lambda \cdot f \quad (2)$$

### 3.1.3 Klasifikacija polarizacije radio valova

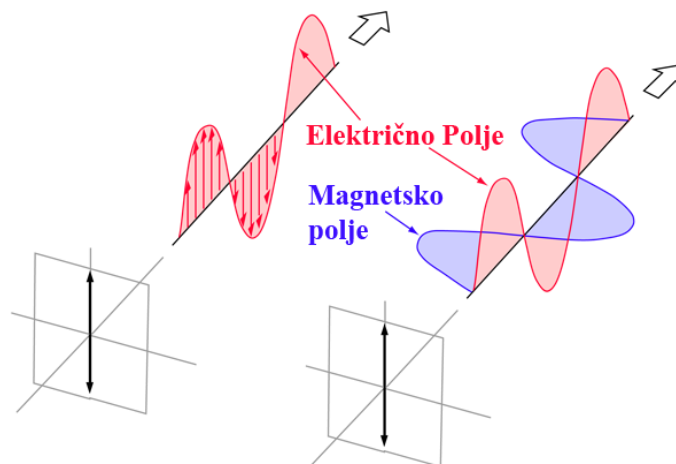
Kaže se da je svjetlost u obliku ravnog vala u prostoru linearno polarizirana. Svjetlost je transverzalni elektromagnetski val, ali je prirodna svjetlost općenito nepolarizirana, pri čemu su sve ravnine širenja jednako vjerojatne. Ako se svjetlost sastoji od dva ravna vala jednake amplitude s razlikom u fazi za  $90^\circ$ , tada se kaže da je svjetlost kružno polarizirana. Ako su dva ravna vala različite amplitude povezana u fazi za  $90^\circ$ , ili ako je relativna faza različita od  $90^\circ$ , tada se kaže da je svjetlost eliptično polarizirana (Slika 3.5).



**Slika 3.5 Polarizacija elektromagnetskog vala.**

Izvor: Izradio student prema <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/polclas.html>

Radio val se sastoji od dvije vrste polja: električnog i magnetskog polja. Ta dva polja osciliraju zajedno po istom periodu vremena. Potrebno je pojasniti da radio valovi koji proizlaze iz sklopova s antenama imaju svojstvo polarizacije, to jest polja vala su u trodimenzionalnom prostoru orijentirani tako reći pod kutom od 90 stupnjeva. Ako im se frekvencija poklapa takav se val naziva linearno polarizirani val i može se vidjeti na slici 3.6.



**Slika 3.6 Linearno polarizirani val u 3D prostoru**

Izvor: Izradio student prema <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/polclas.html>

Ako je signal sastavljen od dva vala jednake amplitude, ali se u fazi razlikuju za  $90^\circ$ , tada se kaže da je signal kružno polariziran. Kad bi se moglo gledati u smjeru širenja vala koji opisuju vektor električnog polja (Slika 3.5) činilo bi se da se vektorsko polje vala kreće u krug dok se približava. Kada bi se gledalo u izvor, električni vektor signala koji dolazi izgleda kao da rotira u smjeru suprotnom od kazaljke na satu, te se može reći da je signal desno-kružno polariziran. Ako je u smjeru kazaljke na satu, tada je lijevo-kružno polariziran tada je signal. Vektor električnog polja napravi jedan potpuni krug dok signal napreduje prema objektu za jednu valnu duljinu. Drugi način da se to prikaže je da kada bi palac desne ruke bio usmjeren u smjeru širenja vala, električni vektor bi rotirao u smjeru prstiju.

Eliptično polarizirani val (Slika 3.5) sastoji se od dva okomita vala nejednake amplitude koji se u fazi razlikuju za  $90^\circ$ . Kod eliptično polariziranog vala, kada bi palac desne ruke bio usmjeren u smjeru širenja vala, električni vektor bi rotirao u smjeru prstiju.

### 3.1.4 Dekompozicija polariziranih radio valova

Svaka vrsta radio vala se može matematički objasniti (ili opisati). Pošto postoje dvije kombinacije polarizacije vertikalnih i horizontalnih radio valova. Jedna kombinacija će proizvesti radio val s rotacijom koja ide na desno a druga kombinacija proizvede val s rotacijom na lijevu stranu. Koncept rješavanja radio valova s polariziranim komponentama bi se trebao shvatiti na način opisan u nastavku.

Neka se zamisle dva linearno polarizirana vala, jedan vertikalni i jedan horizontalni, iste frekvencije  $f$  i razlike u fazi  $\varphi$ . Ovakvi valovi se mogu opisati sljedećim jednadžbama:

$$\text{Val A} = a \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (3)$$

$$\text{Val B} = b \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) \quad (4)$$

gdje je  $\varphi$  fazna razlika u radijanima,  $\omega$  je frekvencija u radijanima ( $2 \cdot \pi \cdot f$ ),  $f$  je frekvencija u Hz i  $t$  je vrijeme u sekundama. Veličina  $\omega \cdot t$  je vremenska faza radio vala u radijanima. Pretpostavit će se da su amplitude valova  $a$  i  $b$  jednake.



Prvo će se ispitati slučaj kada je  $\varphi = 0^\circ$  odnosno:

$$\text{Val A} = a \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (3)$$

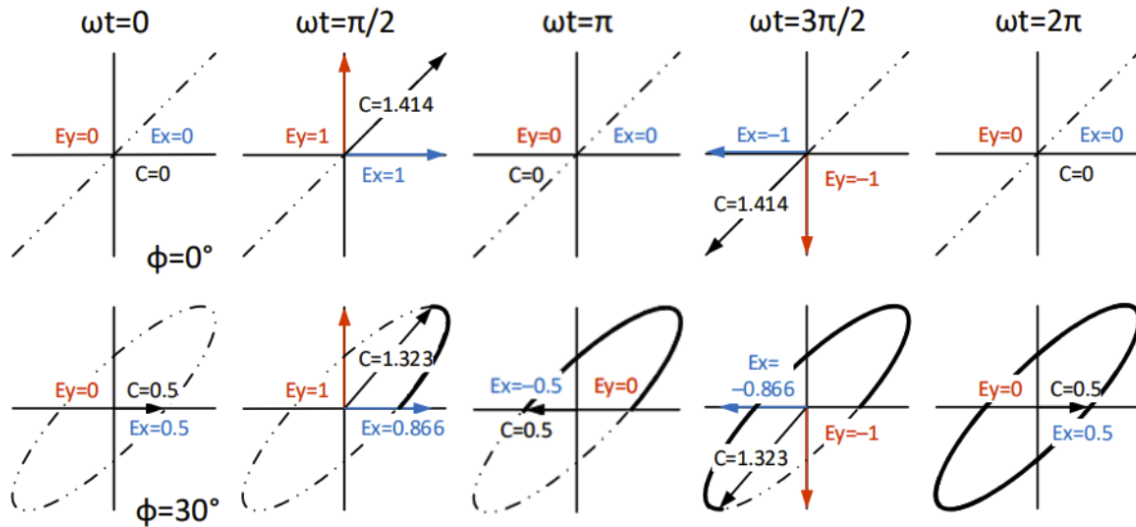
$$\text{Val B} = b \cdot \sin(\omega \cdot t + 0^\circ) = a \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (5)$$

Kada je fazni pomak jednak nuli val A i val B su u fazi to jest poklapaju se kao na slici 3.4. Takav val se naziva još i linearno polarizirani val. Jednadžba koja opisuje takav val s dvije komponente A i B jest:

$$|C| = \sqrt{A^2 + B^2} = \sqrt{[a \cdot \sin(\omega \cdot t)]^2 + [a \cdot \sin(\omega \cdot t)]^2} = a \cdot \sqrt{2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t)} \quad (6)$$

Ovisno o faznom pomaku između dvaju komponenti polariziranog vala. Vrsta vala se mijenja iz linearnoga u kružni ili eliptični. Kako bi se to lakše dočaralo, pretpostavimo da je fazni pomak između dva vala  $\varphi = 30^\circ$  (Slika 3.5). Tada vrijedi:

$$\text{Val B} = b \cdot \sin(\omega \cdot t + 30^\circ) = a \cdot \sin(\omega \cdot t + 30^\circ) \quad (7)$$

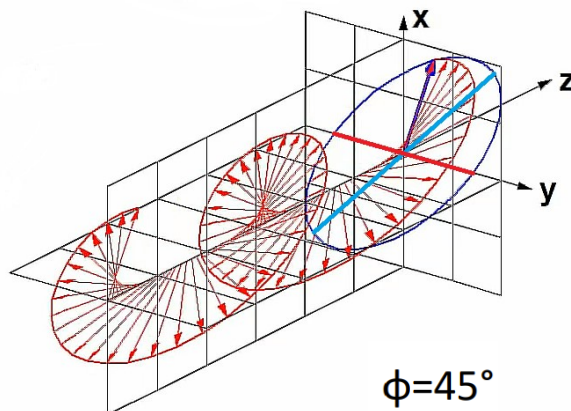


**Slika 3.7 Vizualna reprezentacija nagiba između vala A i B**

Izvor: Izradio student prema Introduction to Radio Wave Polarization Whitham D. Reeve

Lako je vizualizirati vektor kretanja ako se osloni na sliku 3.7. Kada je fazni pomak između dva vala jednak nuli  $\varphi = 0^\circ$  tada valovi teoretski govoreći leže jedan na drugome, no kada je kružni

pomak veći od nule a ne  $\varphi > 0^\circ$ ,  $\varphi < 90^\circ$ ,  $\varphi > 90^\circ$  tada vektorsko polje dva vala ima eliptičan oblik gledajući u smjeru kretanja kao što je to na slici 3.8.



**Slika 3.8 Simulacija širenja vala kojemu je kut  $\varphi > 45^\circ$**

Izvor: Izradio student prema <https://www.youtube.com/watch?v=Q0qrU4nprB0>

Kako je prije spomenuto, kružno polarizirani valovi imaju kut od  $\varphi = 90^\circ$  što bi se moglo interpretirati kao  $\pm\pi/2$  koji se mogu dodati na prethodnom prikazu pa ona izgleda ovako.

$$\text{Val B} = b \cdot \sin(\omega \cdot t \pm 90^\circ) \quad (8)$$

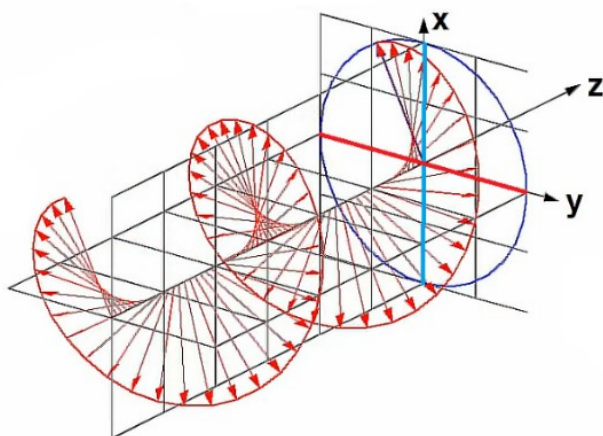
Kako bi se to moglo prikazati kao vektorsko polje, vektor amplitude uvijek je okomit na smjer širenja pa je  $C = 0$ :

$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \cdot \sin(\omega \cdot t) \\ b \cdot \sin(\omega \cdot t + 90^\circ) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Pošto B komponenta ima pomak od 90 stupnjeva, formula se može svesti na:

$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \cdot \sin(\omega \cdot t) \\ b \cdot \cos(\omega \cdot t) \\ 0 \end{bmatrix}$$

Ovakva formula prikazuje polje vektora kroz vrijeme  $t$  uz vizualnu reprezentaciju lako je pretpostaviti da signal putuje poljem kao kroz cijev (Slika 3.9).



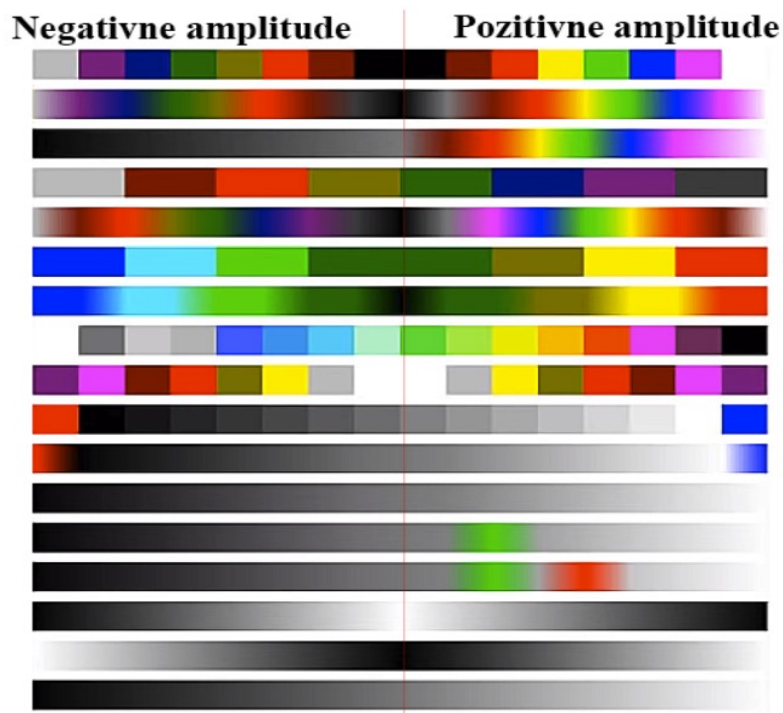
**Slika 3.9 širenje kružno polariziranoga vala kroz prostor  $\varphi = 90^\circ$**

Izvor: Izradio student prema <https://www.youtube.com/watch?v=Q0qrU4nprB0>

Najpoznatija metoda odašiljanja radio vala kod radara koji prodire u zemlju je preko dipol antene. Dipol antena proizvodi kružno polarizirani val kako je prikazano na slici 3.9.

### 3.2 RADIO VALOVI RADARA KOJI PRODIRE U ZEMLJU

Kako je prije objašnjeno, radar koji prodire u zemlju šalje impuls signala određene amplitude u zemlju te čeka odzivni signal. Kada zaprimi odzivni signal, na njega vrši filtriranje te ga zapisuje u memoriju računala. Računalo zatim iscrtava signal na ekran korisnika. Dobiveni signal se interpretira u raznim bojama koje su samo pitanje ukusa operatera. Amplitude valnog oblika su obično obojene radi lakše analize podataka, postoje različite nijanse kojima su dobivene amplitude obojene, obično sa slike 3.10.

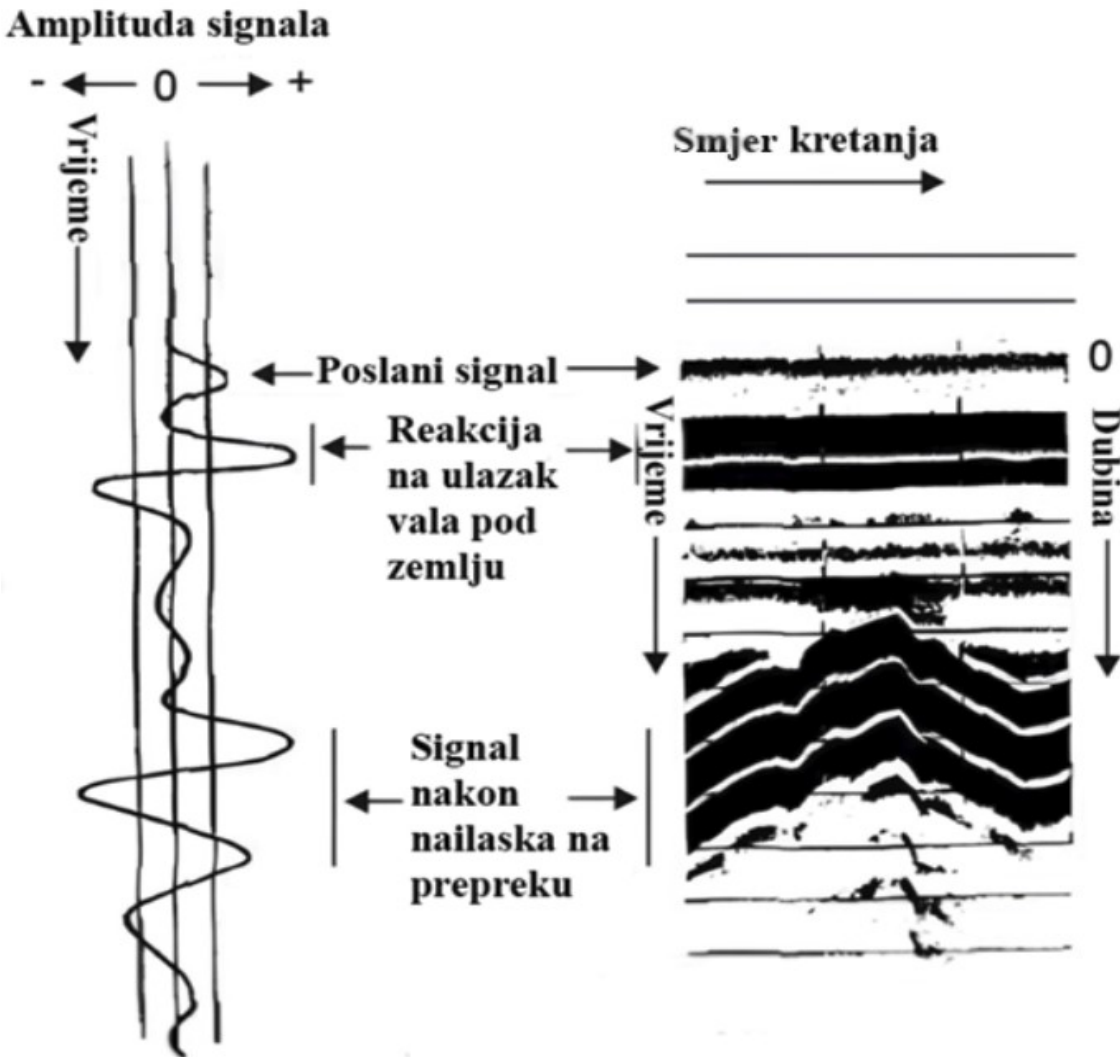


**Slika 3.10 Spektar boje**

Izvor: Izradio student prema <https://www.youtube.com/watch?v=G74Ht6C8uR8>

Radar koji prodire u zemlju koristi razne vrste antena no najraširenija je dipol antena.

Dipol antene u svojoj normalnoj orijentaciji proizvodi kružno polarizirani val kako je prikazano na slici 3.9.

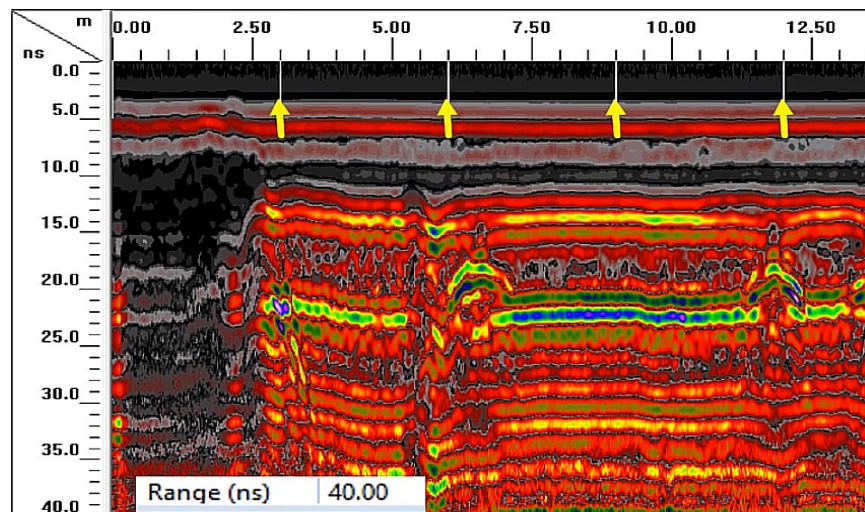


**Slika 3.11 Vizualna reprezentacija reakcije primljenog signala na nailazak prepreke**

Izvor: Izradio student prema [https://archive.epa.gov/esd/archive-geophysics/web/html/ground-penetrating\\_radar.html](https://archive.epa.gov/esd/archive-geophysics/web/html/ground-penetrating_radar.html)

Vrijeme putovanja vala se obično označava u nano sekundama i direktno je vezano za dubinu prodiranja vala. Korisnici najčešće očekuju rezultate skeniranja odnosno dubinu u metrima, a ne u nano sekundama. Kako bise dobila precizna dubina materijala kojega se skenira, mora se namjestiti skala kako bi se ukloni razmak između antene i zemljine površine. Takav razmak se vidi na slici 3.5 gdje je označen zelenim strelicama. Završni produkt skeniranja, ako ga se predstavlja

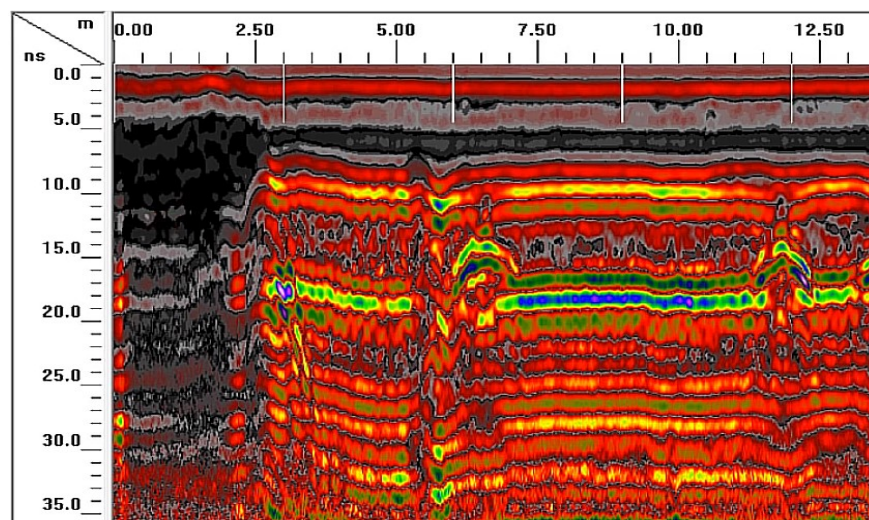
u boji, naziva se linijski pregled (eng. *Line Scan*) kao na primjeru na slici 3.12 gdje je pregled u 256 bitnoj shemi boja.



**Slika 3.12 Pregled rezultata s dometom prodiranja vala od 40 nano sekundi**

Izvor: Izradio student prema <https://www.youtube.com/watch?v=G74Ht6C8uR8>

Kako bi se uklonio razmak između antene i zemljine površine potrebno je prilikom zapisa podataka vala fizički obrisati prvih 0.3 ns u ovom primjeru sa slike. Takav pothvat se radi ugrađenom funkcijom (eng. *Auto peak*). Slika 3.13 prikazuje podatke bez razmaka.



**Slika 3.13 linijski pregled rezultata skeniranja bez zračnog razmaka**

Izvor: Izradio student prema <https://www.youtube.com/watch?v=G74Ht6C8uR8>

Kako bi se proračunala udaljenost predmeta do antene potrebno je znati nekolicinu parametara. Prvo i osnovno potrebno je znati dielektričnu konstantu materijala kroz koji prolazi val, a zatim je potrebno isto tako iščitati vrijeme putovanja vala  $u$  (ns) iz dobivenog grafa kao sa slike 3.6.

Relacija je:

$$\frac{ns}{m} = 2\sqrt{\epsilon t(\omega)} \quad (10)$$

gdje  $\epsilon t(\omega)$  predstavlja relativnu dielektričnu konstantu materijala, a  $m$  predstavlja duljinu u metrima.

### 3.2.1 Dielektrična konstanta materijala

Dielektrična konstanta je izraz koji opisuje do koje mjere materijal zadržava ili koncentrira električni tok. Suhi zrak ima nisku dielektričnu konstantu. Takav materija može doživjeti dielektrični proboj, stanje u kojem materijal koji se opire protoku elektrona ili ukratko dielektrik iznenada počinje provoditi električnu struju. Međutim, iskrivljenje rasporeda molekula zraka nije trajao jer kada se ukloni prekomjerno električno polje, zrak će se vratiti u svoje normalno dielektrično stanje. Neki drugi materijali također pokazuju ovo svojstvo, što sprječava njihovo trajno oštećenje. Na dielektričnu konstantu materijala jako utječe temperatura te frekvencija kroz materijal. Kada se govori o temperaturi moglo bi se reći da je dielektrična konstanta inverzno proporcionalna temperaturi materijala. Kako bi se to jednostavnije prikazalo koristiti će se voda kao element razmatranja. Voda na  $0^{\circ}\text{C}$  posjeduje dielektričnu konstantu od 80 no ako se zagrije na  $100^{\circ}\text{C}$  njena dielektrična konstanta pada s 80 na 55.

Promjena frekvencije ne utječe na dielektričnu konstantu materijala. Dielektrična čvrstoća, koja se može definirati kao maksimalno električno polje koje takav materijal može izdržati u idealnim uvjetima bez da materijal promjeni svojstva, opada s povećanjem frekvencije tog električnog polja. Dakle, dielektrični materijal s visokom dielektričnom konstantom može izdržati električno polje visoke frekvencije.

Dakle, svaki materijal ima svoju dielektričnu konstantu te ostale parametre kao što su vodljivost materijala, brzina prolaza elektromagnetskoga zračenja kroz materijal te prigušenje, odnosno koeficijent koji opisuje gubitak električnog polja kroz materijal. Takva svojstva nazivamo električnim svojstvima materijala (tablica 1.1).

**Tablica 1.1 Električna svojstva materijala**

Materijal	Dielektrična konstanta $\epsilon(\omega)$	Vodljivost (mS/m)	Brzina prolaza (m/ns)	Prigušenje materijala (dB/m)
Zrak	1	0	0.3	0
Destilirana voda	80	0.01	0.033	0.002
Svježa voda	80	0.5	0.033	0.1
Morska voda	80	30,000	0.01	1,000
Suhi pijesak	3-5	0.01	0.15	0.01
Zasićeni pijeska	20-30	0.1-1.0	0.06	0.03-0.3
Vapnenac	4-8	0.5-2	0.12	0.4-1
Škriljevac	5-15	1-100	0.09	1-100
Sitni pijesak	5-30	1-100	0.07	1-100
Glina	4-40	2-1,000	0.06	1-300
Granit	4-6	0.01-1	0.13	0.01-1
Suha sol	5-6	0.01-1	0.13	0.01-1
Led	3-4	0.01	0.16	0.01

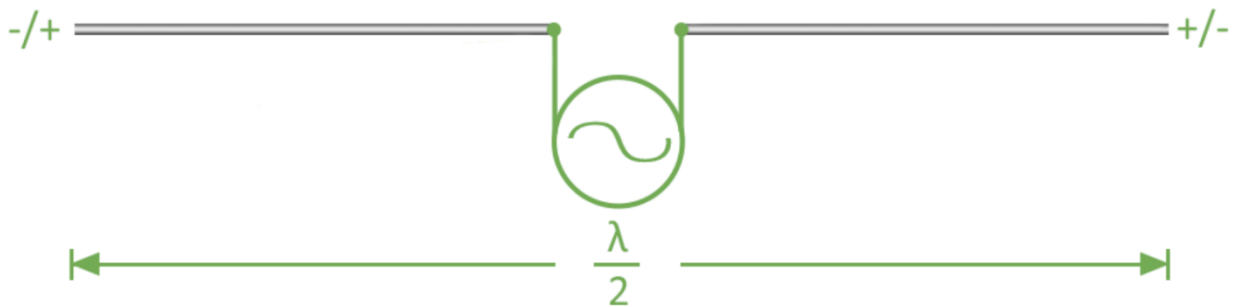
Izvor: Izradio student prema [https://archive.epa.gov/esd/archive-geophysics/web/html/ground-penetrating\\_radar.html](https://archive.epa.gov/esd/archive-geophysics/web/html/ground-penetrating_radar.html)

Antene koje se koriste u sustavima radara koji prodiru u zemlju moraju imati mogućnost podržavanja velikoga spektra frekvencija zato što radari koji prodiru u zemlju imaju opciju namještanja frekvencije koja odgovara dielektričnim konstantama materijala. Dobar operator zna vrstu materijala i elemente koji se traže pa mu je lako unijeti vrijednosti u računalo i započeti s radom.



### 3.2.2 Dipol antena

Većina radara koji prodiru u zemlju koriste dipol antenu bilo u monostatičkom ili bistatičkom rasporedu (monostatički kada se ista antena koristi za odašiljanje i prijem, i bistatički kada se koriste dvije odvojene antene). Dipol antena se zapravo sastoji od dvije antene od kojih svaka pokazuje na suprotnu stranu, jedna gleda lijevo dok druga u njenoj ravnini gleda desno (slika 3.14). Duljina vodljivih elemenata antene je otprilike polovica maksimalne valne duljine ( $\lambda/2$ , udaljenost između dvije uzastopne maksimalne ili minimalne točke)



**Slika 3.14 Dipol antena**

Izvor: Izradio student prema <https://jemengineering.com/blog-dipoles/>

Duljina dipol antene utječe na signal na način da što je dulja antena to je dulji period signala, laički rečeno što je dulja antena to dulje traje jedan impuls antene na nekoj frekvenciji. Način na koji antena proizvodi sinusoidalni signal je prema pravilu dipol antena. Struja je najveća, a napon minimalan u središtu dipolne antene. Nasuprot tome struja je minimalna, a napon maksimalan na krajevima dipolne antene.

Radarski sustavi koji prodiru u zemlju obično odašilju signale u intervalima i s istim frekvencijskim karakteristikama radi lakšega iščitavanja reflektiranog signala. Antena ili dio antene koji prima signal zna koji signal je poslan zbog ugrađenog miksera signala i iz tog razloga zna koje komponente računalo treba profiltrirati FFT metodom.

### 3.2.3 Antipodalna vivaldi antena

Glavni problem koji se predstavlja prilikom uporabe dipol antene jest njena veličina. Naime kako je spomenuto u prethodnom poglavlju, veličina dipol antene direktno utječe na maksimalnu moguću valnu duljinu koji ta antena može odaslati.

Antipodalne vivaldi antene se u takvoj situaciji predstavljaju kao elegantno rješenje ako se sustav treba koristiti na sitnim bespilotnim uređajima kao što su multi rotorne bespilotne letjelice ili čak vozila koja se lansiraju povodom svemirskih istraživanja, radi ograničenih dimenzija.

Vivaldi antena se smatra širokopojasnim radijatorom, čiji je originalni dizajn predstavio P. J. Gibson 1979. godine, a sastoji se od dvije plohe tankog metalnog profila s eksponencijalno suženim krajevima ugraviranim na jednoj strani tiskane pločice dok s druge strane ide odgovarajući simetričan oblik kako bi profil antene iz perspektive nacрта nalikovao na slovo Y. Simetrična eksponencijalna suženja koja se pojavljuju na gornjoj i donjoj strani predstavljaju eksponencijalni profil definiran sljedećom jednačbom:

$$y = C1e^{Rx} + C2 \quad (11)$$

gdje su:

$$C1 = (y2 - y1)/(e^{Rx1} - e^{Rx2}) \quad (12)$$

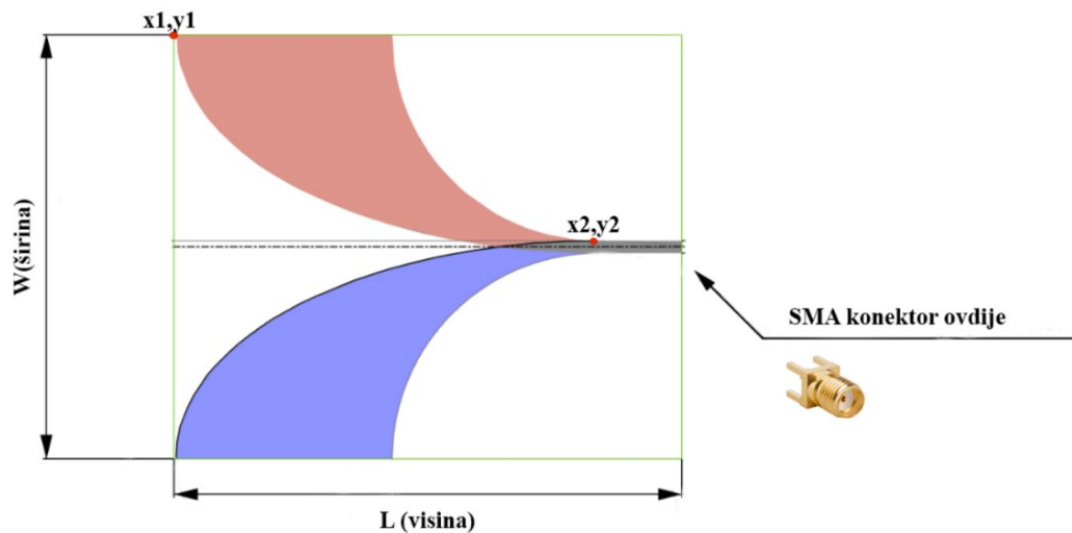
$$C2 = (y1e^{Rx2} - y2e^{Rx1})/(e^{Rx2} - e^{Rx1}) \quad (13)$$

R je faktor ekspanzije čija vrijednost uspostavlja kompromis između optimalnog pojačanja i koeficijenta refleksije; obično je u rasponu od 0,25 do 0,45.  $(x1, y1)$  i  $(x2, y2)$  su eksponencijalni i predstavljaju prvu i posljednju točku konusa dizajna antene.

Procjena fizičke duljine antene L se onda može dobiti sljedećom jednačbom:

$$L = c/fmin\sqrt{2/(\epsilon r + 1)} \quad (14)$$

Gdje je  $f_{min}$  najmanja podržana frekvencija antene,  $c$  je brzina svjetlosti a  $\epsilon_r$  je relativna permitivnost podloge od koje je antena izrađena. Izgled opisane antene je kao na slici 3.15. Važno je napomenuti da duljina vrata antene poslije točke  $x_2, y_2$  ne utječe na performanse antene.



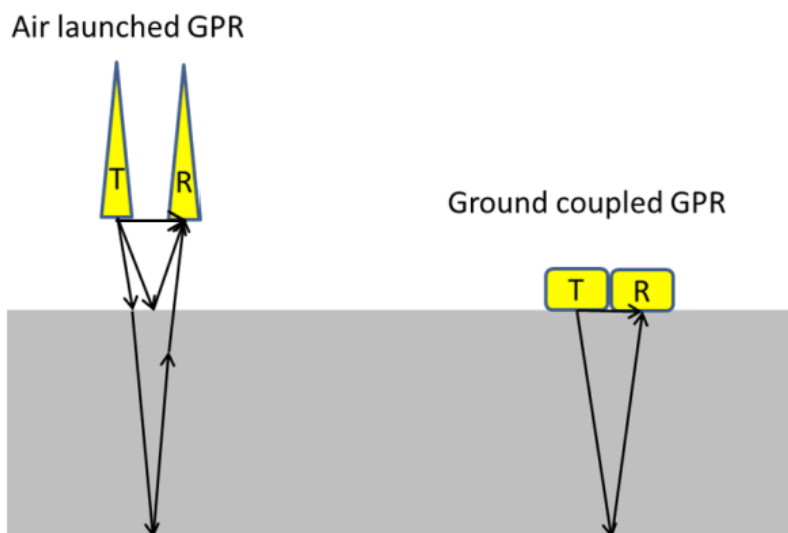
**Slika 3.15 Antipodalna Vivaldi antena**

Izvor: Izradio student prema : [https://www.changpuak.ch/electronics/Antipodal\\_Vivaldi\\_Antenna\\_Designer.php](https://www.changpuak.ch/electronics/Antipodal_Vivaldi_Antenna_Designer.php)

Antipodalne Vivaldi antene su veoma jednostavne za izradu pomoću već gotovih web aplikacija pa proces izrade te računski dio ne bi trebao predstavljati veliki problem osobama koje žele takvu antenu za svoj širokopolasni projekt.

### 3.2.4 Pozicioniranje antena

Svrha svake tehnologije je da služi čovjekovoj ideji. Radari koji prodiru u zemlju koriste se prilikom postupaka analize područja kod kojih se sumnja na postojanje određenih objekata ispod zemljine površine. Kao takav, uređaj se koristi na mnogo različitih mjesta koja se reljefno drastično razlikuju jedni od drugih. Zato postoje dvije vrste radara koji prodiru u zemlju i koji se razlikuju isključivo po načinu na koji su antene za odašiljanje i slanje signala pozicionirane. Dvije prethodno spomenute vrste antena se nazivaju antene koje se nalaze u zraku iznad zemljine površine (eng. *air launched*) i antene koje se nalaze što bliže zemljinoj površini, koje u većini slučajeva dotiču samo tlo (eng. *ground coupled*) (Slika 3.16). Visinska konfiguracija antena nije definirana no lako je zapaziti o kakvom se sustavu radi iz same vizualne usporedbe. Naime kada su antene što bliže zemlji, sustav radio valova daje bolju rezoluciju pregleda podzemlja. Dok ako se promatraju antene koje su odvojene od zemlje, takvi uređaju su više praktični na nejednakim reljefnim pozicijama te ih je lakše montirati na vozila koja se kreću takvim neravnim reljefima, a mogu se isto tako postaviti i na bespilotne letjelice.

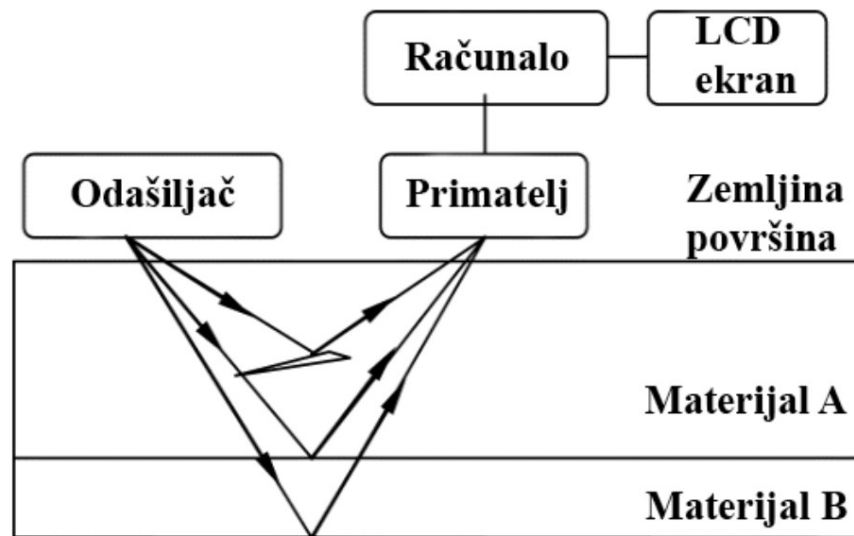


**Slika 3.16. Dvije konfiguracije različitih visina GPR antena**

Izvor: Air-launched and ground-coupled GPR data N. Diamanti, A. P. Annan Published 19 March 2017

### 3.2.5 Refleksija i difrakcija signala

Sustav radara koji prodire u zemlju se bori s problemom refleksije i difrakcije elektromagnetskih signala. Profil refleksije generira se kada GPR sustav radi u tipičnom načinu refleksije. Većina signala vraćenih u takvom profilu su refleksije od diskontinuiteta ispod površine, iako mogu biti prisutne i druge vrste valova. Valovi se odbijaju i reflektiraju od materijal koji je operater odabrao preko računala. Kao što je predviđeno teorijom valova i osnovnim matematičkim odnosima, tipovi valova kao što su izravni zračni val, kritično lomljeni zračni val i izravni prizemni val obično se pojavljuju (Slika 3.17).



**Slika 3.17 Vizualna reprezentacija teorije odbijanja valova od objekt pod zemljom**

Izvor: Izradio student prema *Service Life Estimation and Extension of Civil Engineering Structures Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering 2011, Stranice 193-222*

Tijekom korištenja radara koji prodire u zemlju zna se dogoditi da osjetna antena pokupi ne očekivane elektromagnetske valove, jer elektromagnetski valovi osim refleksija doživljavaju i difrakcije od manjih nehomogenih objekata. Ogibi u vremenskom presjeku koji se mogu karakterizirati kao hiperbole javljaju se u dvije situacije: kada je glavna valna duljina  $L_c$ , u radarskom impulsu veća od dimenzija izvora odbijanja i kada se valovi odbijaju od oštre rubove.

Fizički odnos između brzine elektromagnetskog vala,  $v$ , valne duljine,  $L$ , i frekvencije,  $f$ , opisuje se jednadžbom:

$$v = Lf \quad (15)$$

Prema formuli (15), ako bi signal radara koji prodire u zemlju bio poslan na središnjoj frekvenciji od 100 MHz u geološko okruženje kao što je granit s prosječnom brzinom širenja od 0,13 m/ns, lokalna dominantna valna duljina propagirajućeg signala bila bi oko 1 m.

Radio valovi imaju ista svojstva kao i svjetlost ili čak analogni valovi, to znači da se mogu odbijati od određenih elemenata. Radari koji prodire u zemlju upravo se oslanjaju na svojstvo valova da se difraktiraju ili reflektiraju od neke elemente. Najčešći radarski signal ili valni oblik jest slijed kratkih impulsa koji moduliraju nositelja sinusnog vala (također poznat kao niz impulsa). Domet do cilja izračunava se vremenom  $T_r$  koje je potrebno da radarski signal putuje do i od cilja. Elektromagnetska energija se kreće kroz prazni prostor brzinom svjetlosti,  $c=3 \cdot 10^8$  m/s. Vrijeme koje je potrebno da jedan impuls stigne do odredišta je opisan formulom:

$$T = 2R / c \quad (16)$$

Zatim se izračunava udaljenost od antene do prepreke:

$$Udaljenost = ct / 2 \quad (17)$$

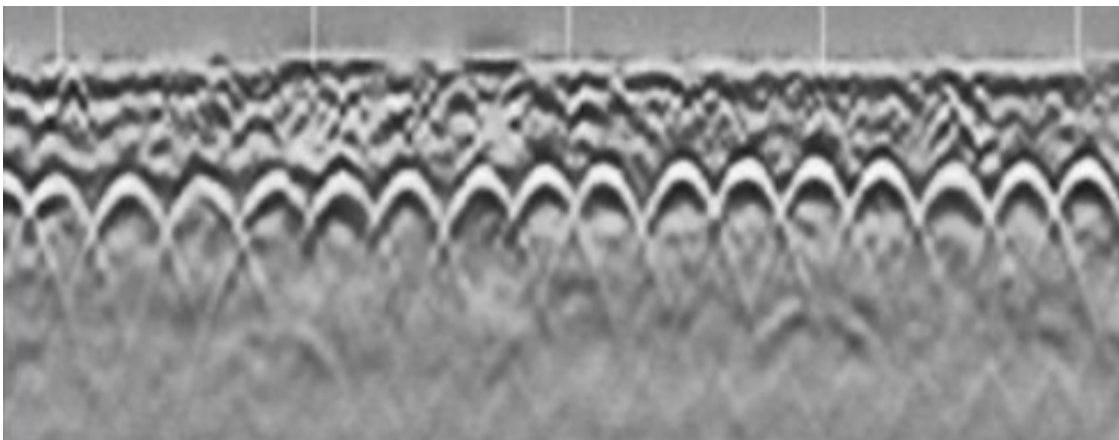
Kako je opisano u tablici 1 iz poglavlja 3.2.1 svaki materijal ima predodređenu vrijednost koja pokazuje koliko se brzo elektromagnetski val može kretati kroz njega. Ta brzina je opisana u m/s ili m/ns, kako bi se izračunala udaljenost od antene do prepreke signala GPR sustava potrebno je umjesto  $c$  koji opisuje kretanje elektromagnetskog vala kroz zrak uvrstiti konstantu  $c$  nekog drugog elementa iz tablice.

Način računanja dielektrične konstante je veoma jednostavan. Naime da bi se izračunala dielektrična konstanta, potrebno je podijeliti dva broja koja opisuju permitivnost tvari i permitivnost vakuuma.

Relativna permitivnost obično se označava kao  $\epsilon_r(\omega)$  (ponekad malim slovom kappa,  $\kappa$ ) i definira se kao:

$$\epsilon_t(\omega) = \epsilon(\omega) / \epsilon_0 \quad (18)$$

gdje je  $\epsilon(\omega)$  kompleksna permitivnost materijala ovisna o frekvenciji, a  $\epsilon_0$  je permitivnost vakuuma. Nakon procesiranja signala na računalo GPR sustava prikaže se neka vrsta vizualne reprezentacije podataka. Ako se promotri slika 3.18 svaki detektirani element u zemlji je na ekranu prikazan kao paraboličan oblik.

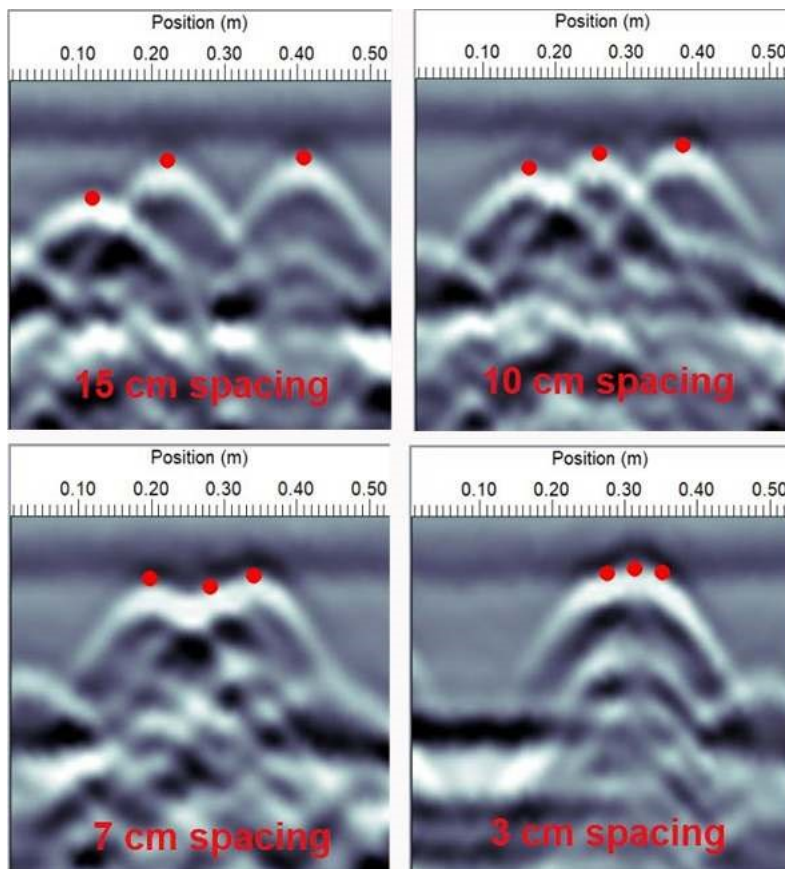


**Slika 3.18 Rezultati skeniranja podzemlja sa armaturnom žicom**

Izvor: <https://www.geoscan.ca/blog/why-use-gpr-and-em-when-locating-utilities/>

### 3.2.6 Rezolucija sustava radara koji prodire u zemlju

Kada se spominje rezolucija kod radara koji prodire u zemlju onda se misli na sposobnost uređaja da razlikuje točke koje su blizu jedna drugoj kao različite objekte. Kako bi se bolje dočarao taj fenomen neka se zamisli situacija da se sa radarom koji prodire u zemlju gleda prema armaturnom željezu različite udaljenosti (slika 3.19). Prikaz se sastoji od četiri kvadranta. Prvi na redu je prikaz armaturnoga željezo koje je međusobno udaljeno 15 cm. U drugom prikazu korišten je isti materijal i ista dubina ali je ovaj put željezo udaljeno 10 cm. Treći prikaz je uzeti iz situacije kada je željezo udaljeno 7 cm, te posljednji prikaz kada je željezo udaljeno samo 3 cm. Iz priloženog prikaza (Slika 3.19) se vidi kako radarski sustav može razlikovati udaljenosti do 7 cm no kada je u pitanju primjer za 3 cm razlike tada sustav sve preostale slučajeve pod zemljom predstavlja kao jedan objekt.

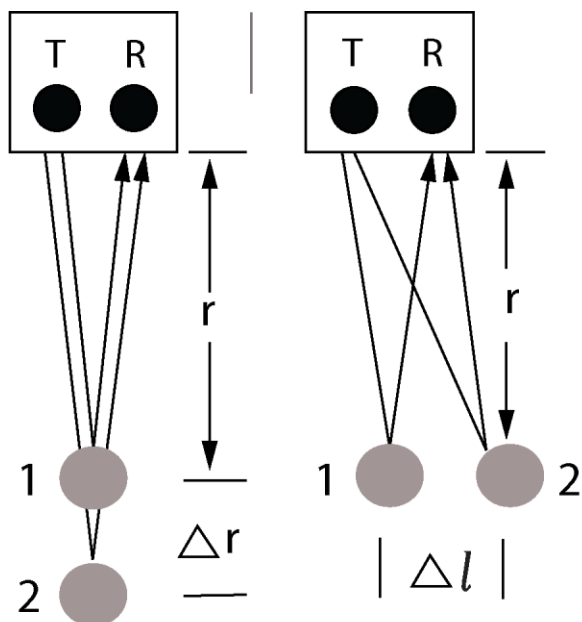


**Slika 3.19 rezolucija radara koji prodire u zemlju**

Izvor: <https://www.senssoft.ca/blog/understanding-gpr-resolution-and-target-detection/>



Pojam rezolucije kod radara koji prodire u zemlju, opisuje visinu između slojeva  $\Delta r$  te širinu predmeta  $\Delta l$ , (Slika 3.20). Prethodno prikazan slučaj kada je armaturno željezo blizu jedno drugome tek 3 cm (Slika 3.19). Može se zaključiti da radar koji prodire u zemlju koji je korišten prilikom izrade slike 3.19 ima minimalnu horizontalnu rezoluciju od svega 3 cm.



**Slika 3.20 Prikaz koncepta rezolucije sustava radara koji prodire u zemlju**

Izvor: <https://www.senssoft.ca/blog/understanding-gpr-resolution-and-target-detection/>

Kako bi se proračunala rezolucija radara koji prodire u zemlju potrebno je poznavati brzinu signala  $v$  kroz medij te središnju frekvenciju signala  $f_c$  koji se koristi. Prvo što se treba proračunati jest valna duljina, pa postupak računanja ide kako slijedi:

$$\lambda_c = \frac{v}{f_c} \quad (19)$$

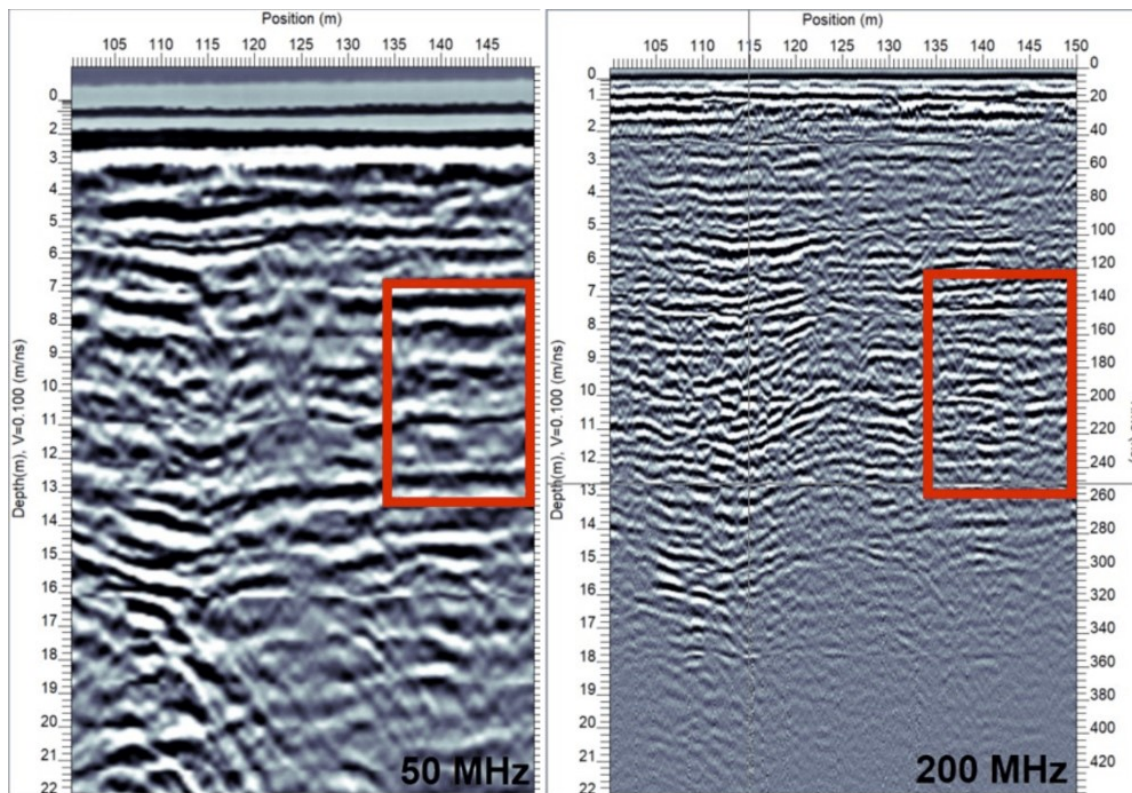
Kako se dobila visina slojeva  $\Delta r$  pojednostavljena formula ide kako slijedi:

$$\Delta r = \frac{\lambda_c}{4} \quad (20)$$

Ako se želi izračunati horizontalna duljina najmanjeg predmeta  $\Delta l$  koji se može osjetiti formula ide:

$$\Delta l = \sqrt{\frac{r\lambda c}{2}} \quad (21)$$

Važno je napomenuti da su formule koje se koriste u ovom poglavlju pojednostavljene. Dakle vrijednosti koje predstavljaju  $\Delta r$  i  $\Delta l$  jesu minimalan razmak potreban da bi se objekti mogli dočarati na ekranu kao različiti. Na vertikalnu rezoluciju jednostavno utječe valna duljina, ali na horizontalnu (bočnu) rezoluciju utječu i valna duljina i dubina objekta. Što se dublje gleda, to više opada kvaliteta horizontalne rezolucije. Drugim riječima manji predmeti su teži za razaznati kao individualni na većim dubinama pa je potrebno koristiti signal više frekvencije (slika 3.21).



**Slika 3.21** rezolucija radarskog sustav koji prodire u zemlju, signal od 50 MHz i 200 MHz

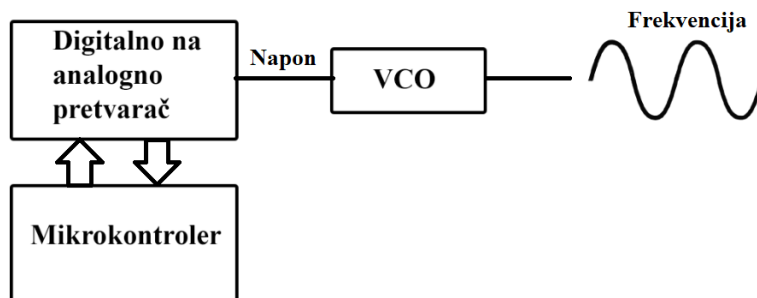
Izvor: <https://www.sensoft.ca/blog/understanding-gpr-resolution-and-target-detection/>

### 3.3 GENERATOR FREKVENCIJE

Ovaj sklop predstavlja najbitniju komponentu bilo kakvoga sustava koji rukuje frekvencijama. Naime teorija valova nije od koristi ako se ne mogu proizvesti frekvencije koje su potrebne za normalnu operaciju radara i drugih uređaja koji se koriste elektromagnetskim valovima. Kako bi se DC napon pretvorio u neku frekvenciju potrebno je koristiti već postojeći sklop ili ga modelirati prema potrebama pojedinca ili sklopovske opreme. Naime, radar koji prodire u zemlju mora biti sposoban pokriti veliki spektar elektromagnetske radijacije. Isto tako velika većina, ako ne i sve moderne solucije, koriste DC napon kao primarni način opskrbljivanja sklopovlja snagom. Radari koji prodiru u zemlju moraju imati računalni dio koji rukuje signalom te zapisuje i iscertava podatke koji opisuju topografiju željenog područja skeniranog od radarskog sustava. Tradicionalni oscilatori su sklopovi izrađeni isključivo od pasivnih filtarskih komponenti s nepromjenjivim vrijednostima, te kao takvi nemaju mogućnost biranja izlazne frekvencije osim u slučajevima kada se pasivne komponente varijabilnog tipa ili se fizički mijenjaju za druge komponente različitih vrijednosti. Najlakši način za pretvaranje DC napona u frekvenciju po želji jest prilikom korištenja VCO komponente (eng. *Voltage Controlled Oscillator*).

#### 3.3.1 Način rada VCO

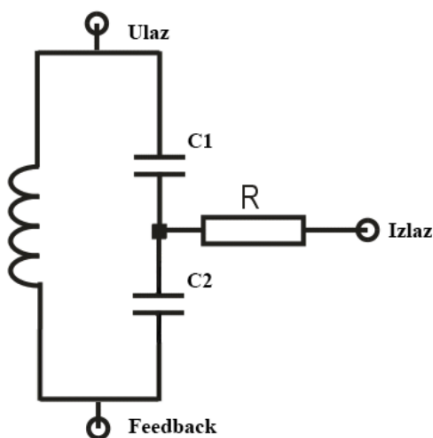
Oscilatori kontrolirani naponom su sklopovsko rješenje u obliku raznih površinski montiranih elektroničkih komponenti. Glavna i jedina zadaća mu je da se prilikom promjene ulaznoga istosmjernog napona na izlazu stvori frekvencija koja linearno raste ili pada ovisno o ulazu. VCO komponenta se sastoji primarno od pasivnih komponenti. Shema sklopa je dizajnirana kako bi se prilikom promjene ulaznoga napona promijenila izlazna frekvencija. Glavna funkcija koja je bitna jest mogućnost korištenja mikro kontrolera s pretvaračem digitalnoga u analogni signal koji se onda spaja na naponski ulaz VCO komponente. Na taj se način može reći da digitalne vrijednosti kontroliraju izlaznu frekvenciju (slika 3.22).



**Slika 3.22. VCO komponenta u spoju s digitalnom upravljačkom jedinicom**

Izvor: Izradio student

Kada se govori o VCO komponentama, postoje dvije vrste koje se koriste. Prva vrsta jesu harmonički oscilatori a druga vrsta se naziva opuštajući oscilatori. U ovom su slučaju važniji harmonički oscilatori zbog svoje mogućnosti da stvaraju sinusoidalan val. Harmonički oscilatori mogu koristiti 3 tipa oscilirajućeg sklopa: RC, LC i kristalni oscilator. U svakom od ta tri ako se zamijene R, L ili C komponente s nekom vrstom varijabilne komponente dobiva se vrsta VCO sklopa. Neka se za primjer promatra Colpitts oscilator kao jedan jednostavniji RC oscilator (slika 3.24).



**Slika 3.23 Colpitts oscilator**

Izvor: Izradio student

Sustav je veoma jednostavan. Na gornjoj slici prikazane su tri komponente, jedna zavojnica i dva kondenzatora. Proces počinje punjenjem dvaju kondenzatora C1 i C2. Zatim se unutar kruga

spremnika ova dva serijska kondenzatora prazne u paralelnu zavojnicu L1 i pohranjena energija u kondenzatoru prenosi se na zavojnicu. Zbog paralelnog spoja kondenzatora, zavojnica se tada prazni pomoću dva kondenzatora i kondenzatori se ponovno počinju puniti.

Punjenja i pražnjenja svih komponenti se konstantno izmjenjuju dodavanjem DC napona i na taj način daju signal oscilacije preko njih.

Sustav se jako oslanja na dimenzije dvaju kondenzatora i zavojnica. Formula koja opisuje izlaznu frekvenciju izgleda ovako:

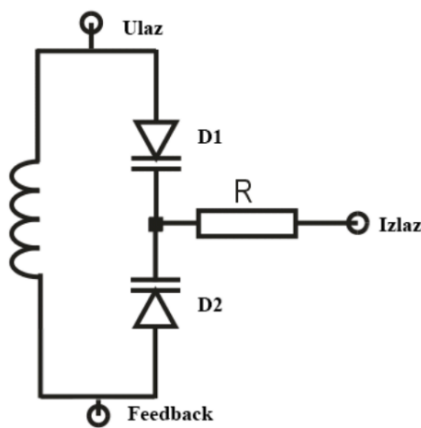
$$F = 1 / 2\pi\sqrt{LC} \quad (22)$$

gdje je F izlazna frekvencija, L je indukcija zavojnice a C jest ukupni kapacitet dvaju kondenzatora koji se može dobiti jednostavnom formulom koja glasi:

$$C = (C1 \times C2) / (C1 + C2) \quad (23)$$

gdje je C ukupni kapacitet, C1 je vrijednost kapaciteta prvog kondenzatora sa slike 3.9 a C2 je vrijednost kapaciteta drugog kondenzatora kondenzator s istoimene slike.

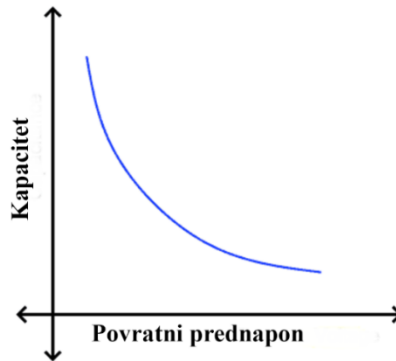
Neka se sada umjesto statičkih komponenti kao umjesto kondenzatora u sklop postave kapacitivne ili varicap diode. Takve diode promjenom napona na svojim kontaktima mijenjaju i svoj kapacitet. Efektivno to je kondenzator koji se može upravljati naponom (Slika 3.24).



**Slika 3.24 RC oscilator s kapacitivnim diodama**

Izvor: Izradio student

Formule za proračun su iste no potrebno je naglasiti da kapacitivne diode imaju krivulju koja karakterizira njihov kapacitet promjenom napona na izlaznim kontaktima (slika 3.25).



**Slika 3.25 krivulja karakteristike varicap dioda**

Izvor: Izradio student

Sada je lako zamisliti način funkcioniranja harmoničnih oscilatora frekvencija no pomicanjem vrijednosti ulaznoga napona frekvencija koja se dobiva na izlazu je proporcionalna kapacitivnim dimenzijama varicap dioda te zavojnice L1. Važno je nadodati da harmonički oscilatori imaju funkciju proizvodnje samo sinusoidalne frekvencije.

Prilikom odabira VCO komponente potrebno je paziti na napon sustava u koji se ugrađuje jer se preko napona regulira frekvencijski spektar na izlazu. Proizvođači u dokumentaciji za gotova rješenja prilažu frekvencijske karakteristike i naponske razine VCO komponente.

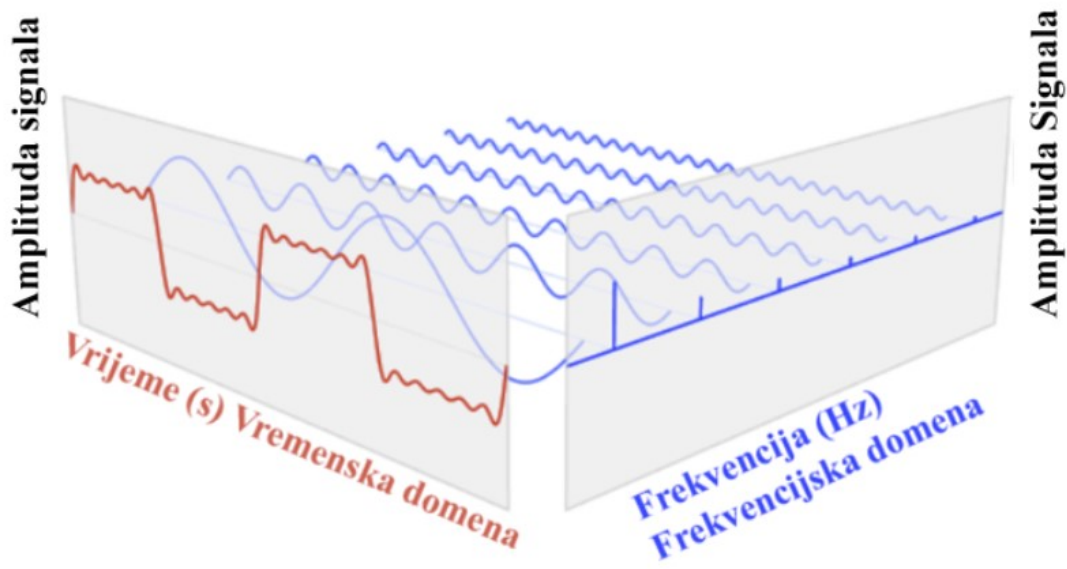
### 3.4 RAČUNALNI SUSTAV RADARA KOJI PRODIRE U ZEMLJU

Većina radara koji prodiru u temelju a koji su dostupni široj javnosti imaju neku vrstu računala ugrađeno u sebi s pripadajućim softverom koji dobiveni signal sakuplja i interpretira na način na koji trenirani korisnici mogu iskoristiti dobivene podatke. Računalo se sastoji od dva dijela od koji jedan dio čisti dobiveni signal a drugi ga iscrtava na predodređeni način za kasniju analizu. GPR sustavi se primarno koriste u civilnom inženjerstvu prilikom pregleda područja predviđenog za gradnju. Kao takvi, uređaji moraju imati funkciju mjerenja dubine te vizualizacije dobivenih podataka. Najjednostavniji oblik vizualizacije podataka radara koji prodire u zemlju se svodi na dvodimenzionalni prikaz frekvencijskog spektra dobivenog na anteni za primanje signala. Kako bi se počistio široki spektar frekvencija koje pokupi antena radara koji prodire u zemlju, računalni sustav mora signal obraditi s jednadžbom poznatom pod skraćenicom FFT.

#### 3.4.1 Brza Fourierova Transformacija

FFT (eng. *Fast Fourier Transformation*) jest postupak koji skraćuje DFT (eng. *Discrete Fourier Transform*) funkciju koja se koristi prilikom analiziranja frekvencijskog spektra dobivenoga signala. Metoda sama po sebi služi kako bi se signal pretvorio iz vremenske domene u frekvencijski domenu.

Ako se signal koji se sastoji od više harmoničnih komponenti prvo podjeli na točke koje se unesu u formulu Fourierove transformacije, takav se signal može prikazati u frekvencijskoj domeni umjesto signala u vremenskoj domeni. Slika 3.26 prikazuje kako se signal koji je u vremenskoj domeni dijeli na svoje harmoničke dijelove te se potom predstavlja u frekvencijskoj domeni.



**Slika 3.26 Vizualna reprezentacija procesa Fourierove transformacije signala**

Izvor: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/2b/Fourier\\_series\\_and\\_transform.gif](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/2b/Fourier_series_and_transform.gif)

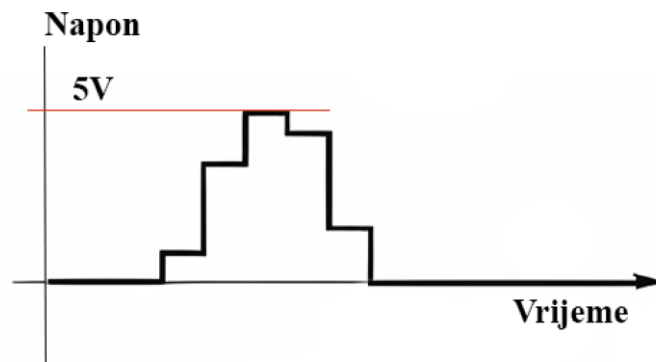
Radar koji prodire u zemlju mora imati mogućnost odabira frekvencije koja je postavljena za materijal na kojemu se koristi.

### **3.4.2 Pretvarač digitalnog signala u analogni**

Kako bi generator frekvencije funkcionirao mora dobiti analogni signal na ulazu. Pošto radar koji prodire u zemlju ima potrebu za digitalnom obradom signala radi lakšeg prikaza, u sustavu mora postojati sklop koji pretvara digitalni signal koji daje računalo u analogni signal koji oscilator interpretira kao napon te naknadno po tom signalu diktira frekvenciju odaslanog signala, neka se za primjer uzme sklopka sa dva stanja, uključeno i isključeno.



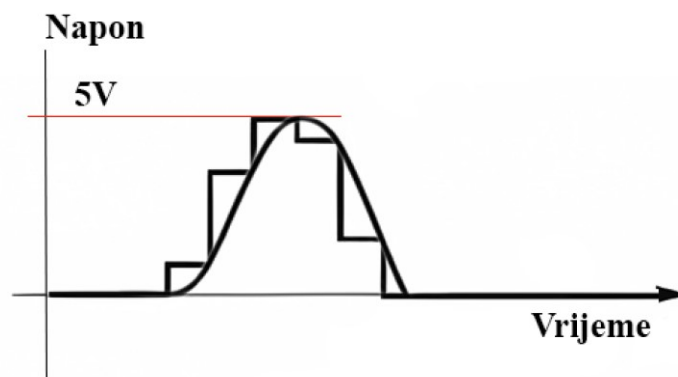
U suštini se digitalni signal opisuje s dva stanja, stanje visokog napona i stanje niskog napona. U trenutku kada je sklopka uključena na izlazu ima DC napon od 5V a kada je sklopka isključena na izlazu je 0V. Upravljanjem tim naponima pomoću naponskog dijelila može se namjestiti signal na izlazu koji priliči slici 3.27.



**Slika 3.27 Digitalni signal s promjenom napona**

Izvor: Izradio student prema <https://rockuapps.com/definition-of-adc-analog-to-digital-converter-and-other-details-as-well/>

Ovakav signal sliči nekoj vrsti brijega sinusoidnog signala no kako bi dobili tako takozvani ispeglani signal potrebno je koristiti filtarski kondenzator koji će se opirati nagloj promjeni napona kako bi signal izgubio „stepenice“ kao na slici 3.28.

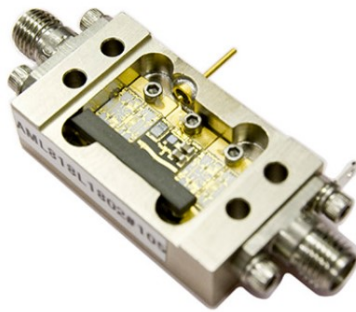


**Slika 3.28 Ispeglani signal pretvarača**

Izvor: Izradio student prema <https://rockuapps.com/definition-of-adc-analog-to-digital-converter-and-other-details-as-well/>

### 3.4.3 Niskošumno pojačalo

Signali koji se vraćaju nazad nakon odbijanja od materijala koji se želi detektirati i nakon putovanja kroz zemlju dolaze na antenu koja prima signal kao dosta slabiji signali. Kako bi se riješio ovakav problem RADAR-i koji prodiru u zemlju koriste sklop koji se zove nisko šumno pojačalo (eng. *Low Noise Amplifier*) ili LNA skraćeno. U stvarnosti LNA sklopovi su dosta maleni (slika 3.29).



**Slika 3.29 komercijalno dostupan LNA modul**

Izvor: <https://www.mrcy.com/products/rf-microwave-and-mixed-signal/amplifiers/low-noise-amplifiers>

LNA jest sklop koji pojačava cjelokupni signal koji dolazi na antenu što znači da pojačava glavni signal kao i buku u signalu. Nisko šumno pojačalo je ime koje opisuje sklop no može biti zbunjujuće, naime nisko šumno pojačalo ne pojačava niske šumove signala, već njegovo ime ukazuje na činjenicu de je sklop specifično izgrađen da ima jako mali šum koji unosi u veći krug obrade signala. Što znači da sklop ne utječe na omjer snage signala i šuma, SNR (eng. Signal to Noise Ratio).

SNR je jednostavan omjer snage željenog signala i snage šuma koji dolazi sa signalom. LNA modul uzima neki signal i zatim ga pojačava. Kako bi se sproveo izračun snage signala koji izađe iz modula (*Omjer snage na izlazu*), potrebno je prvo proračunati ulazni signal (*Omjer snage na ulazu*). Izrazi za snage ovih signala su sljedeći:

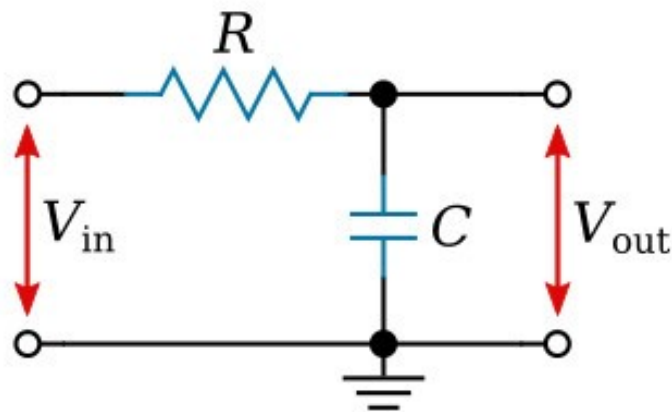
$$\text{Omjer snage na ulazu} = \frac{\text{Snaga signala}}{\text{Snaga šuma}} \quad (24)$$

$$\text{Omjer snage na izlazu} = \frac{\text{gain} \cdot \text{Snaga signala}}{\text{gain} \cdot \text{Snaga šuma} + \text{snaga šuma LNA modula}} \quad (25)$$

### 3.4.4 Niskopropusni filter

U svijetu radio valova uvijek se javlja potreba za manipulacijom signala. Svaki elektromagnetski signal koji prolazi kroz nekakav medij poprima nejednakosti u signalu koje se zovu šum. U svijetu radara koji prodiru u zemlju najuočljiviji problem jest šum visokih frekvencija. Najjednostavniji nisko propusni filter jest sačinjen od pasivnih komponenti kao što su otpornici, kondenzatori i zavojnice. Kako bih se bolje pojasnila svrha takvih filtera u GPR sustavima potrebno je pojasniti što nisko propusni filter radi.

Nisko propusni filter služi za uklanjanje komponenti visokih frekvencija iz signala. To radi na principu prigušenja visokih signala. Neka se promatra jednostavan sklop s jednim otpornikom te jednim kondenzatorom kako je prikazano na slici 3.30.



Slika 3.30 nisko propusni filter RC

Izvor: <https://ecstudiosystems.com/discover/textbooks/basic-electronics/filters/passive-low-pass-filter/>

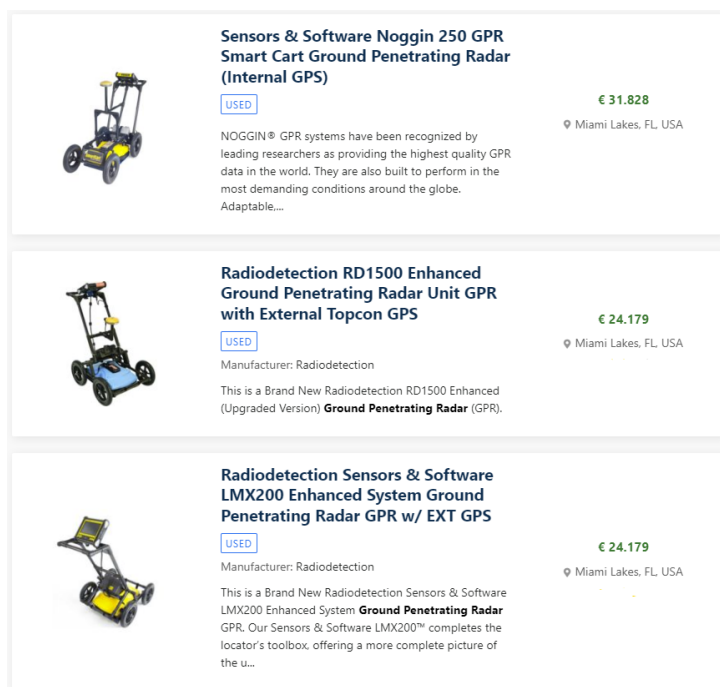
Ovakav filter se koristi svojstvom kondenzatora da se opire nagloj promjeni napona. Dakle kada se pusti neki signal kroz ovakav filter kondenzator u krugu se pokušava napuniti i isprazniti u svome vremenu punjenja no ne uspijeva kada su u pitanju visoke frekvencije zato što u kratkom periodu nema mogućnost napuniti se do kraja i propustiti signal. Moglo bi se reći da ovakav filter siječe visoke frekvencije (eng. *high cut filter*)

## 4. MODEL RADARA KOJI PRODIRE U ZEMLJU KAO SUSTAVA ZA DETEKCIJU KAMENIH NASLAGA

Radari koji prodiru u zemlju su opće poznati svakoj osobi koja radi na bilo kakvom terenskom istraživanju bilo to radi građevinskih dozvola ili u arheološke svrhe. Tehnologija koja se koristi nije nova no zna biti veoma složena te zahtjeva da se operater uređaja obučiti za rad na radarskim uređajima koji prodiru u zemlju.

Nažalost kompleksnost uređaja jest i njihova mana. Radari koji prodiru u zemlju su veoma skupi i njihova fizička veličina diktirana je potrebom za dubljim pretragama podzemlja.

Tržište na kojemu se nalaze takvi uređaju je upoznato s potrebom za njima pa su cijene vrtoglave čak i za cijenu najslabijih modela. Prosječna osoba može kupiti dobar rabljeni automobil uz istu cijenu (slika 4.1). Uz radar koji prodire u zemlju korisnik isto tako mora raspolagati softverom koji će podatke pretvoriti u vizualnu reprezentaciju u dvodimenzionalnom ili trodimenzionalnom obliku.



Slika 4.1 Internet tržište rabljenih radara koji prodiru u zemlju

Izvor: <https://www.machinio.com/cat/ground-penetrating-radar>

Sudeći po njihovom intervalu uporabe te činjenicom da radari koji prodiru u zemlju ne štete okolišu, u ovom radu se predstavlja ideja koja opisuje takav radarski sustav u svrhe zaštite poljoprivrednih strojeva i ljudi. Naime radari koji prodiru u zemlju jesu jako dobra solucija za pregled materijala pod zemljom no imaju jednu veliku manu. U današnje vrijeme svaka osoba koristi minimalno jedan uređaj koji komunicira na frekvenciji radio valova. Pošto radar koji prodire u zemlju koristi takve valove, njegova efektivnost tako reći opada prilikom uporabe u prostoru zasićenom radio valovima. Takve smetnje se mogu smanjiti uporabom antena koje su priljubljene uz zemlju no problem se nikada neće moći u potpunosti zanemariti. Postoji mnogo grana industrije koje obavljaju svoje djelatnosti van velikih gradova no rijetko koja ima koristi od pregleda zemljane površine kao grana poljoprivrede.

#### **4.1 ZADATAK SUSTAVA RADARA KOJI PRODIRE U ZEMLJU KAO SUSTAVA ZA ZAŠTITU POLJOPRIVREDNE OPREME**

Glavni se problem javlja kod obrade poljoprivrednog zemljišta strojevima gdje se pojavljuje nemogućnost predviđanja prepreka ispod površine zemlje te nemogućnost predviđanja biološke materije.

Kako bi se riješio ovakav problem predlaže se implementacija radara koji prodiru u zemlju na radne strojeve kao što su traktori i kombajni.

Ovakvi sustavi su obično jako skupi a to je zato što moraju imati mogućnost generiranja širokoga pojasa radio valova radi mogućnosti detekcije različitih elemenata na dubinama i do desetke metara. U poljoprivredi ne postoji takav problem jer se većina obradive zemlje obrađuje na dubinama ne većim od jednoga metra. Sustav mora biti lak za implementaciju na različite modele traktora i/ili kombajna. Sustav mora biti kvalitetno izrađen zbog nepredvidivih uvjeta korištenja.

## 4.2 OPIS IDEJNOG PROJEKTA

Za glavnu procesorsku jedinicu cijelog idejnog sustava bio bi predložen Arduino Mega 2560.

Arduino Mega 2560 izvršava naredbe na 5V no napajanje mu može biti od 7V do 12V zahvaljujući ugrađenom DC-DC pretvaraču.

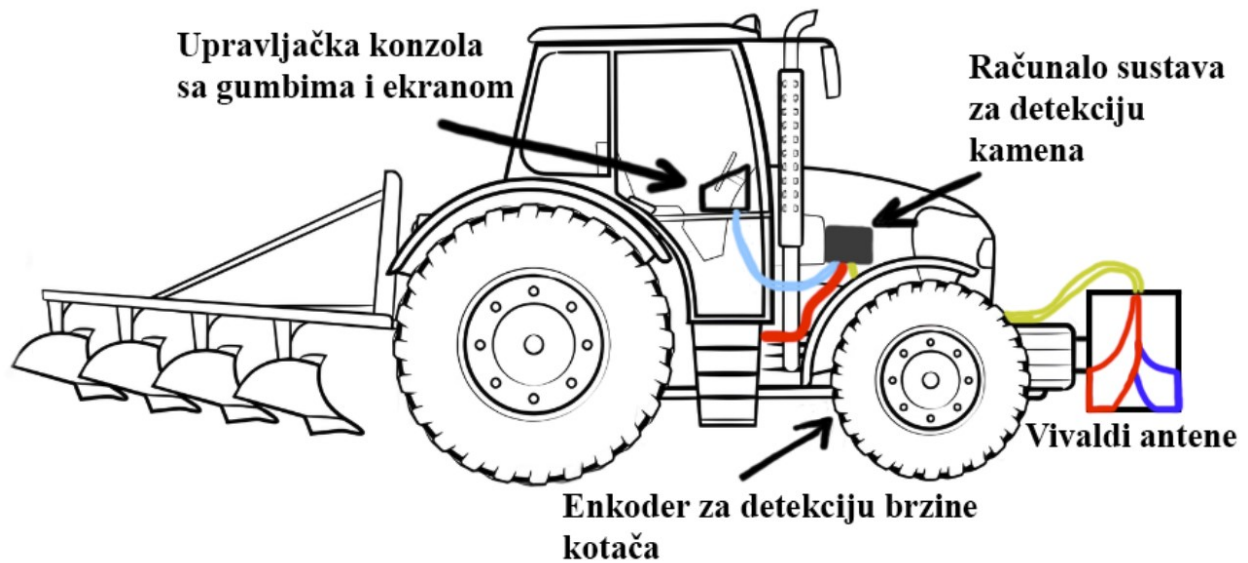
Svako prijevozno sredstvo pa tako i traktor u sebi ima neku vrstu istosmjernog izvora energije koje daje 12V ili 24V. Predlaže se varijabilni DC-DC (eng. *step down*) buck pretvarač koji spušta napajanje s akumulatora na 5V Arduino modula zato što bi sklop za filtriranje signala kao i VCO sklop trebali imati konstantan napon od 5V.

Antene koje bi se koristile bi bile antipodalne vivaldi antene radi svojih performansi gledajući na veliki spektar elektromagnetskih valova te radi njihove veličine.

Uređaj mora imati opciju zapisivanja rezultata skeniranja sustavom radara koji prodire u zemlju isto kao i opciju koja ne zapisuje dobivene rezultate u memoriju već samo daje zvučni signal kada se detektira dovoljno čvrsti materijal s pripadajućim iščitavanjem dubine na kojoj se nalazi.

Sustav bi trebao biti lako ugrađiv no dovoljno robustan za svakodnevni rad po različitim vremenskim uvjetima.

Glavni cilj je stvoriti sustav (slika 4.2) koji nije previše skup za proizvodnju te može služiti u poboljšanje života osoba koje su vezane za poljoprivredni sektor.



**Slika 4.2 Ilustracija željenog sustava**

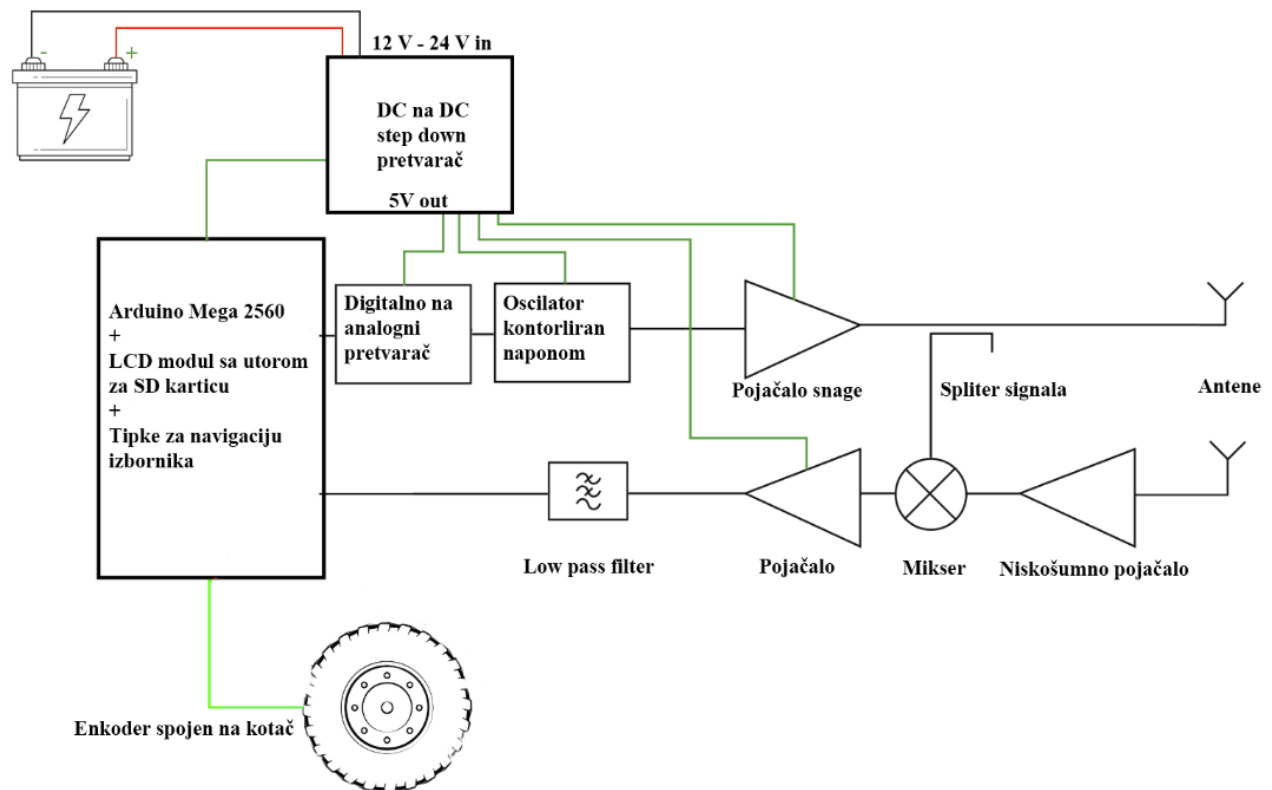
Izvor : Izradio student po uzoru na <https://www.istockphoto.com/vector/farm-tractor-with-plow-vector-illustration-of-a-vehicle-gm1351555897-427268414>

### **4.3 MODEL SUSTAVA RADARA ZA DETEKCIJU KAMENA**

Ovaj rad je opisao pojmove koji su potrebni za razumijevanje osnova rada GPR sklopovlja.

Opis koji slijedi se smatra prototipom a ne finalnim rješenjem koje je spremno za komercijalnu uporabu.

Glavne komponente su već objašnjene u prijašnjim poglavljima. Jedino što je ostalo jest objasniti način spajanja svih dijelova prototipa (slika 4.3).



**Slika 4.3 Ilustracija sklopovlja koncepta radarskog sustava za detekciju kamena**

Izvor : Izradio student

Dakle, s DC napajanja vozila napon dolazi na istosmjerni pretvarač napona. Istosmjerni pretvarač napona zatim pretvara 12V ili 24V u 5V koji su potrebni za operaciju ostalih komponenti sustava.

Arduino kao glavni centar cijele operacije ima dodatak LCD modul koji u sebi ima integrirani čitač SD kartica. Arduino prema izborniku po kojemu korisnik odabire metodu skeniranja, šalje signal na digitalno - analogni pretvarač koji je opisan u poglavlju 3.3.2.



Digitalno - analogni pretvarač upravljani Arduinom šalje signal na VCO modul koji svojim djelovanjem stvara željeni impuls signala i koji se zatim također šalje na antipodalnu vivaldi antenu za slanje signala prema zemlji.

Signal putuje do prve prepreke te se reflektira nazad gdje antena za primanje signala služi kao osjetni element te je spojena na nisko šumno pojačalo objašnjeno u poglavlju 3.3.4.

VCO komponenta se u ovom slučaju ponaša kao lokalni oscilator kruga. Kako bi sustav znao koje frekvencije treba slušati koristi se mikser koji zbraja pojačanu frekvenciju iz VCO modula sa frekvencijom primljenog signala. Signal koji izlazi iz miksera ide na tzv. pojačalo srednje frekvencije koja je bitna za iscrtavanje slike na zaslon GPR sustava kako je objašnjeno u poglavlju 3.

Nisko propusni filter tada filtrira dobiveni signal kako bi podatci koji se pohranjuju u memoriju bili što upotrebljiviji prilikom iscrtavanja dvodimenzionalnog presjeka skeniranoga područja.

Sve to objedinjuje enkoder okreta koji govori Arduinu koliko često treba odaslati signal za stvaranje novog dijela presjeka područja koje se pregledava.

Sustav bi se dao nadograditi sa GPS (eng. *Global Positioning System*) i GPRS (eng. *General Packet Radio Service*) modulom za arduino. GPS modul ima mogućnost određivanja geografske pozicije. GPRS modul ima mogućnost pristupa na internet Svaki put kada sustav osjeti nakupinu pod zemljom Arduino modul zapisuje geografsku lokaciju na memoriju te ju šalje preko interneta na aplikaciju koja prati područje obrade zemlje. Svaki proizvođač traktora i kombajna ima svoj vlastiti sustav navigacije koji bi se dao iskoristiti za istu svrhu.

## 5. ZAKLJUČAK

Radio valovi su neizbježan dio svakodnevnog života, sa prolaskom vremena tehnologija radio valova napreduje veoma brzo. Nagli napredak je prouzročen ljudskom potrebom za istraživanjem nepoznatog. Radar koji prodire u zemlju je relativno novi trend koji se u zadnjih 10 godina sve više i više širi u svim granama industrije. Činjenica je da ako se želi prodirati kroz materiju bez da ju se u procesu uništi. Najbolji način je korištenjem elektromagnetskog vala.

Jedina granica primjene GPR (eng. *Ground Penetrating Radar*) tehnologije je granica probojnosti elektromagnetskoga vala, no to je jedna od fizikalnih granica našega svemira. Konceptni zadatak se naravno ne mora koristiti u svrhe pronalaženja samo kamenih naslaga, frekvencijski se raspon može podesiti za pronalaženje praznoga prostora ispod zemlje ili čak eksplozivnih naprava koje su davno zaboravljene na obrađenoj parceli za poljoprivredne djelatnosti.

Moderna tehnologija obrade zemlje je iznimno složena. Svaki stroj je umrežen radi dijagnostike i navigacije preko bežične internetske mreže. Sustav bi se mogao opisati kao Internet stvari i uključuje razne senzore koji mjere svaku bitnu promjenu na složenom sustavu modernog traktora. Stroj ima stalnu potrebu za internetskom vezom radi dojave kvara i kako bi slao podatke o: geografskoj lokaciji, količini goriva, temperaturi ulja.

Postojanje ACGPR (eng. *Autonomous Cognitive Ground Penetrating Radar*) tehnologije predočava inovativni način koji se koristi radarom koji prodire u zemlju. Radi se o bespilotnoj letjelici koja prema geografskim kordonima pregledava zemljinu površinu GPR sustavom, Letjelica je spojena na sustav interneta stvari te se njime upravlja preko računala pa iz toga razloga može dokučiti jako neprohodne terene. Mogućnosti stvarno jesu beskrajne i nadam se da će ovakav rad inspirirati buduće generacije da se uhvate tehnologije radio valova.

## POPIS LITERATURE

- [1] Air-Launched and Ground-Coupled GPR Data Nectaria Diamanti, A. Peter Annan Sensors & Software Inc. 1040 Stacey Court, L4W 2X8, Mississauga, Canada.
- [2] An Ultra-Wideband Vivaldi Antenna System for Long-Distance Electromagnetic Detection Jinjing Ren 1, Hezhihan Fan 1, Qi Tang , Zhongyuan Yu 1, Yang Xiao 1 and Xiang Zhou 1
- [3] Near-Surface Geophysics Edited by Dwain K. Butler SOCIETY OF EXPLORATION GEOPHYSICISTS Tulsa, Oklahoma, U.S.A.
- [4] A Survey of Performance Enhancement Techniques of Antipodal Vivaldi Antenna AMRUTA S. DIXIT AND SUMIT KUMA
- [5] An Introduction to Impulse Radar MERRILL I. SKOLNIK Radar Division November 20, 1990
- [6] Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, Vol. 20, No. 4, December 2021
- [7] A guided tour of the fast Fourier transform G. D. Bergland Bell Telephone Laboratories, Inc.
- [8] The History of Power Transmission by Radio Waves WILLIAM C. BROWN, FELLOW, IEEE
- [9] DEVELOPMENT OF LOW PHASE NOISE SMALL FOOT PRINT SURFACE MOUNT VOLTAGE CONTROLLED OSCILLATOR Ameen Ahmed, Noushad S, Suchitav Khadanga, K.R.Suresh Nair, P.K.Radhakrishnan NeST Research & Development Center, Plot # 43, CEPZ, Kakkanad

- [10] Modelling ground penetrating radar by GprMax A. Giannopoulos School of Engineering and Electronics, Institute for Infrastructure and Environment, University of Edinburgh, Alexander Graham Bell Building, Kings Buildings, Edinburgh EH9 3JN, UK Available online 2 August 2005
- [11] Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress Adrian Neal\* School of Applied Sciences, University of Wolverhampton, Wulfruna Street, Wolverhampton WV1 1SB, UK Received 22 April 2003; accepted 19 January 2004
- [12] Introduction to Radio Wave Polarization, Author: Whitham D. Reeve Copyright: © 2014 W. Reeve
- [13] MILITARY ELECTRONICS Organized with the assistance of the IRE Professional Group on Military Electronics The Early History of Radar by R. M. Page The Impact of Missiles and Space on Electronics by Simon Ramo A Summary of Military Communication in the United States-1860 to 1962 by J. D. O'Connell, A. L. Pachynski, and L. S. Howeth Achievements and Prospects of Artificial Earth Satellites by S. F. Singer
- [14] Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, Vol. 20, No. 4, December 2021
- [15] <https://www.britannica.com/technology/radar/History-of-radar>
- [16] <https://safe2core.com/the-history-of-ground-penetrating-radar-gpr/>
- [17] [https://ethw.org/Electromagnetic\\_Waves](https://ethw.org/Electromagnetic_Waves)
- [18] [https://ethw.org/Heinrich\\_Hertz](https://ethw.org/Heinrich_Hertz)
- [19] <https://www.aaas.org/heinrich-hertz-and-electromagnetic-radiation>
- [20] <https://www.britannica.com/science/Maxwells-equations>
- [21] <https://blog.bliley.com/evolution-of-radio-wave-technology>

- [22] <https://web.archive.org/web/20090925102542/http://chem.ch.huji.ac.il/history/hertz.htm><https://www.cambridge.org/core/books/treatise-on-electricity-and-magnetism/130A7181ECAB0C990FBC2B88341A4141>
- [23] <https://www.wired.com/2010/02/0222heinrich-hertz-born/>
- [24] [https://en.wikipedia.org/wiki/History\\_of\\_radar](https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_radar)
- [25] <https://history.nasa.gov/SP-4218/ch1.htm>
- [26] <https://www.radartutorial.eu/04.history/hi05.en.html>
- [27] <https://www.radartutorial.eu/04.history/hi86.en.html>
- [28] <https://www.radartutorial.eu/02.basics/Classification%20of%20Radar%20systems%20%282%29.en.html#:~:text=Air-Defense%20Radars%20can%20detect,a%20complete%20360-degree%20circle.>
- [29] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/polclas.html>
- [30] <https://circuitdigest.com/tutorial/colpitts-oscillator#:~:text=Colpitts%20oscillator%20works%20with%20a,which%20produces%20a%20sinusoidal%20waveform.>
- [31] <https://www.techtarget.com/whatis/definition/dielectric-constant#:~:text=The%20dielectric%20constant%20of%20a,the%20permittivity%20of%20free%20space.>
- [32] <https://jemengineering.com/blog-dipoles/>
- [33] <https://www.senssoft.ca/blog/understanding-gpr-resolution-and-target-detection/>
- [34] [https://archive.epa.gov/esd/archive-geophysics/web/html/ground-penetrating\\_radar.html](https://archive.epa.gov/esd/archive-geophysics/web/html/ground-penetrating_radar.html)
- [35] The Invention that Changed the World, Simon & Schuster, 1996

## POPIS SLIKA

Slika 2.1 James Clerk Maxwell .....	4
Slika 2.2 Heinrich Hertz .....	5
Slika 2.3 Pokus elektromagnetskog zračenja.....	6
Slika 2.4 Christian Hülsmeier .....	7
Slika 2.5 Britanski Chain Home sustav radarske detekcije. ....	8
Slika 2.6 Vizualna reprezentacija „Single cycle of sine wave“.....	9
Slika 3.1 Izgled podataka sa GPR uređaja. u skali sivih boja.....	10
Slika 3.2 Pojednostavljeni prikaz rada GPR sustava .....	11
Slika 3.3 Elektromagnetski spektar.....	12
Slika 3.4 Vizualna reprezentacija longitudinalnog vala .....	13
Slika 3.5 Polarizacija elektromagnetskog vala. ....	15
Slika 3.6 Linearno polarizirani val u 3D prostoru .....	15
Slika 3.7 Vizualna reprezentacija nagiba između vala A i B.....	17
Slika 3.8 Simulacija širenja vala kojemu je kut $\varphi > 45^\circ$ .....	18
Slika 3.9 širenje kružno polariziranoga vala kroz prostor $\varphi = 90^\circ$ .....	19
Slika 3.10 Spektar boje .....	20
Slika 3.11 Vizualna reprezentacija reakcije primljenog signala na nailazak prepreke.....	21
Slika 3.12 Pregled rezultata s dometom prodiranja vala od 40 nano sekundi .....	22
Slika 3.13 linijski pregled rezultata skeniranja bez zračnog razmaka .....	22
Slika 3.14 Dipol antena.....	25
Slika 3.15 Antipodalna Vivaldi antena .....	27

Slika 3.16. Dvije konfiguracije različitih visina GPR antena .....	28
Slika 3.17 Vizualna reprezentacija teorije odbijanja valova od objekt pod zemljom.....	29
Slika 3.18 Rezultati skeniranja podzemlja sa armaturnom žicom .....	31
Slika 3.19 rezolucija radara koji prodire u zemlju.....	32
Slika 3.20 Prikaz koncepta rezolucije sustava radara koji prodire u zemlju .....	33
Slika 3.21 rezolucija radarskog sustav koji prodire u zemlju, signal od 50 MHz i 200 MHz .....	34
Slika 3.22. VCO komponenta u spoju s digitalnom upravljačkom jedinicom .....	36
Slika 3.23 Colpitts oscilator.....	36
Slika 3.24 RC oscilator s kapacitivnim diodama .....	37
Slika 3.25 krivulja karakteristike varicap dioda .....	38
Slika 3.26 Vizualna reprezentacija procesa Fourierove transformacije signala .....	40
Slika 3.27 Digitalni signal s promjenom napona.....	41
Slika 3.28 Ispeglani signal pretvarača .....	41
Slika 3.29 komercijalno dostupan LNA modul .....	42
Slika 3.30 nisko propusni filter RC.....	43
Slika 4.1 Internet tržište rabljenih radara koji prodiru u zemlju .....	44
Slika 4.2 Ilustracija željenog sustava .....	47
Slika 4.3 Ilustracija sklopovlja koncepta radarskog sustava za detekciju kamena .....	48

## POPIS TABLICA

Tablica 1.1 Električna svojstva materijala .....	24
--	----

## POPIS FORMULA

Formula za brzinu radio vala sa $\lambda$ (1) .....	14
Formula za brzinu radio vala sa frekvencijom (2) .....	14
Formula za izračun komponente A linearno polariziranog vala (3) .....	16
Formula za izračun komponente B linearno polariziranog vala (4) .....	16
Formula za izračun komponente B linearno polariziranog vala kada je $\varphi = 0^\circ$ (5) .....	17
Formula za izračun linearno polariziranog vala (6) .....	17
Formula za izračun komponente B linearno polariziranog vala kada je $\varphi = 30^\circ$ (7) .....	17
Formula za izračun komponente B linearno polariziranog vala kada je $\varphi = 90^\circ$ (8) .....	19
Formula za vektorsko polje kružno polariziranog vala (9) .....	19
Formula za udaljenost antene i elementa od koji se opbbije val (10) .....	23
Formula za računanje esponencijalnog profila Antipodalve Vivaldi antene (11) .....	26
Formula za računanje C1 komponente eksponencijalnog profila Antipodalve Vivaldi antene (12) .....	26



Formula za računanje C2 komponente eksponencijalnog profila Antipodalve	
Vivaldi antene (13) .....	26
Formula za procjenu duljine antene (14) .....	27
Formula koja opisuje fizički odnos između brzine elektromagnetskog vala, valne duljine i frekvencije (15) .....	30
Formula za vrijeme putovanja signala (16) .....	30
Formula za daljenost od antene do prepreke (17) .....	30
Formula za kompleksnu permitivnost materijala (18) .....	31
Formula za valnu duljinu (19) .....	33
Formula koja opisuje vertikalnu rezoluciju GPR sustava (20) .....	33
Formula koja opisuje horizontalnu rezoluciju GPR sustava (21) .....	34
Formula za izlaznu frekvenciju Colpitts oscilatora (22) .....	37
Formula za ukupni kapacitet C Colpitts oscilatora (23) .....	37
Formula za ulazni omjer signala i šuma (24) .....	42
Formula za izlazni omjer signala i šuma LNA modula (25) .....	42

## TABLICA KRATICA

<b>Kratica</b>	<b>Puni naziv na stranim jeziku</b>	<b>Tumačenje na hrvatskom jeziku</b>
<b>RADAR</b>	<i>Radio Detection and Ranging</i>	Radio detekcija i domet
<b>DC</b>	<i>Direct current</i>	Istosmjerna struja
<b>SNR</b>	<i>Signal to Noise Ratio</i>	Omjer signala i šuma
<b>GPR</b>	<i>Ground Penetrating Radar</i>	Radar koji prodire u zemlju
<b>LNA</b>	<i>Low Noise Amplifier</i>	Pojačalo niskog šuma
<b>FFT</b>	<i>Fast Fourier Transform</i>	Brza Fourierova transformacija
<b>VCO</b>	<i>Voltage Controlled Oscillator</i>	Oscilator kontroliran naponom
<b>DFT</b>	<i>Discrete Fourier Transform</i>	Diskretna Fourierova transformacija
<b>GPS</b>	<i>Global Positioning System</i>	Globalni sustav za pozicioniranje
<b>GPRS</b>	<i>General Packet Radio Service</i>	Opća paketna radio usluga
<b>ACGPR</b>	<i>Autonomous Cognitive Ground Penetrating Radar</i>	Autonomni kognitivni radadar koji prodire u zemlju