

# Slikanje z radijskimi valovi

Marko Čebokli S57UUU

**Povzetek:** Pogosto slišimo, da so radijski valovi samo druga vrsta svetlobe, razlika je edino v frekvenci. Ljudje svetlobo povezujejo predvsem z vidom in slikami, zato se postavlja vprašanje: ali je mogoče "videti" tudi z radijskimi valovi? Podal bom nekaj teoretskih osnov različnih vrst radijkega "vida" in na koncu predstavil se rezultate mojih poskusov na tem področju.

## 1. Televizija?

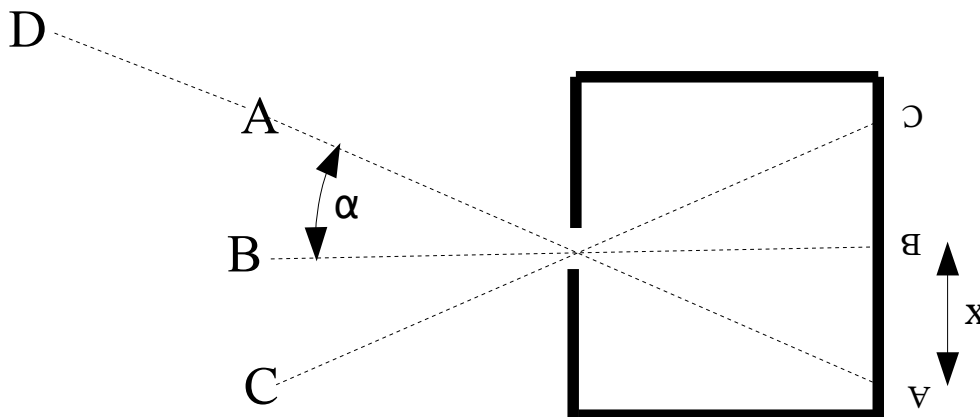
Ko v mislih povežemo slike in radijske valove, verjetno najprej pomislimo na televizijo. Vendar pa "to ni to", kajti pri televiziji radijske valove uporabimo le kot sredstvo za prenos slik, ki pa smo jih posneli z navadno vidno svetlobo.

Prvi sistemi za pravo slikanje z radijskimi valovi so bili klasični radarji. Danes je radarsko slikanje zelo izpopolnjeno, najbolj v obliki radarja s sintetično odprtino. Značilnost radarja je, da oddaja lastno "svetlobo", ki se potem odbija od opazovane scene.

V 60 in 70 letih prejšnjega stoletja pa so radijski astronomi razvili še eno tehniko radijskega slikanja (seveda predvsem nebesnih teles) in sicer s pomočjo interferometrije. O tem pišem v tem članku.

## 2. Camera Obscura

Camera obscura (dobesedno: temna soba) je najpreprostejši način tehničnega (brez slikarja) slikanja, ki so ga opisali že stari Grki in Kitajci. Na njej si najlaže ogledamo, kaj je bistvo slikanja.



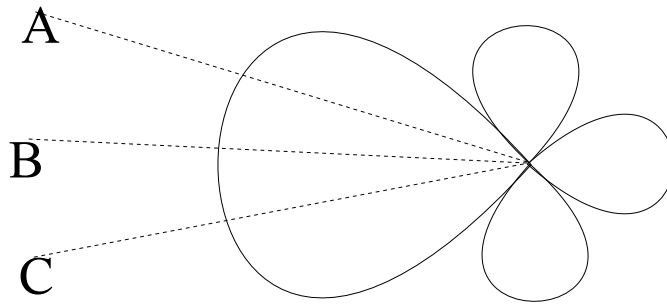
Predmeti A...D, ki oddajajo lastno sevanje ali pa jih osvetljuje kak drug vir sevanja, se skozi luknjo v sprednji steni sobe preslikajo na nasprotno (zadnjo) steno. V foto ali video kameri tja postavimo občutljivo površino (film ali čip) s katero sliko shranimo.

Očitno je pomembno, da se različni predmeti preslikajo v različne točke na površini slike. Iz skice vidimo, da camera obscura "sortira" predmete glede na kot, pod katerim od danega predmeta prihaja svetloba. Vsakemu kotu dodeli dolčeno točko na sliki. Opraviti imamo s pretvorbo kotov " $\alpha$ " v razdalje " $x$ ".

Vidimo tudi, da razdalja do predmeta ni važna: predmeta A in D, od katerih svetloba prihaja iz iste smeri (pod enakim kotom) se preslikata v isto točko.

### 3. Radijski valovi: antene

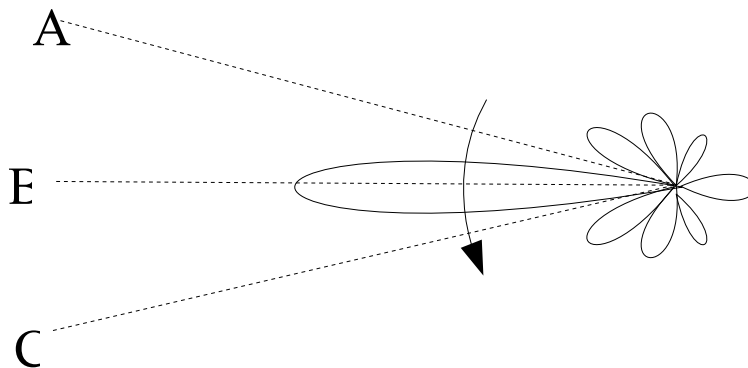
Filmi in čipi ponavadi za radijske valove niso občutljivi, zato bomo morali za občutljivo površino uporabiti radijske antene. Če želimo dobro ločljivost, bomo potrebovali anteno z ustrezno ozkim



smernim diagramom, ki ne bo širši od minimalnega kota med dvema predmetoma, ki ju želimo na sliki še razločiti. Optični astronomi to zahtevo že dolgo poznajo pod imenom "Rayleighov kriterij". Ta pravi, da če želimo razločiti dve točki, po kotu med seboj oddaljeni za  $x$  radianov, mora imeti naša antena (objektiv teleskopa) premer odprtine vsaj  $1.2 \cdot \lambda / x$ , kjer je  $\lambda$  valovna dolžina uporabljene "svetlobe".

Radijski valovi so precej daljši od svetlobnih, zato bomo potrebovali precej velike odprtine! N. pr. s 3m parabolnim zrcalom na 10GHz znaša ločljivost še slabo stopinjo!

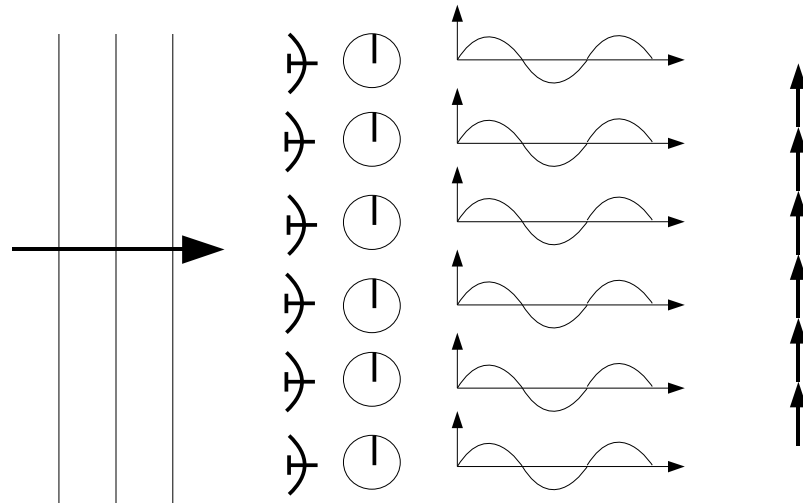
Če imamo dovolj veliko anteno (ozek diagram), lahko posamezne predmete zajamemo z obračanjem antene:



Tako delujejo "klasični" radarji.

#### 4. Antenske skupine

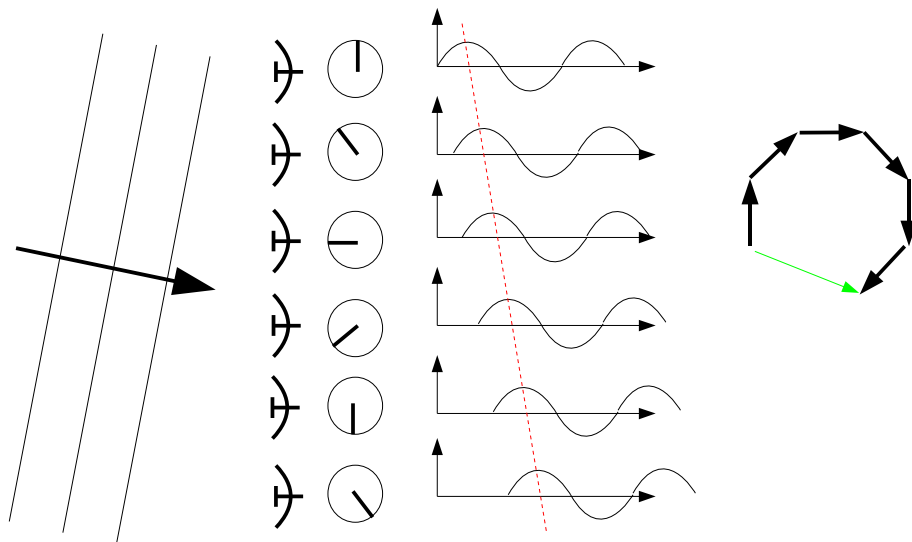
Veliko anteno, kakršno zahteva dobra ločljivost slikanja, je seveda zelo nerodno mehansko obračati. Zato si pomagamo tako, da potrebno velikost odprtine dosežemo s kombiniranjem več manjših anten. V klasični radijski praksi, ko želimo sprejemati le en sam signal iz določene smeri, posamezne antene postavimo tako, da tvorijo površino, pravokotno na smer vpadnega vala.



Tako val pride istočasno na vse antene. Če njihove izhode preprosto združimo, se prispevki lepo seštevajo v fazi.

Kaj pa valovi, ki priletijo “malo postrani”?

V tem primeru bodo valovna čela na posamezne antene prihajala ob rahlo različnih trenutkih:

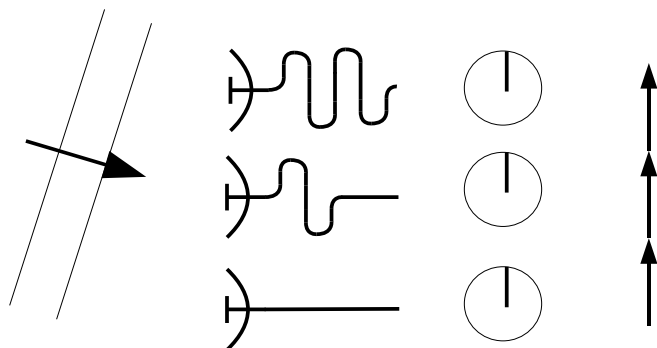


Izhodi posameznih anten se ne bodo več sešteli v fazi (desna stran slike), zato bo izhodni signal

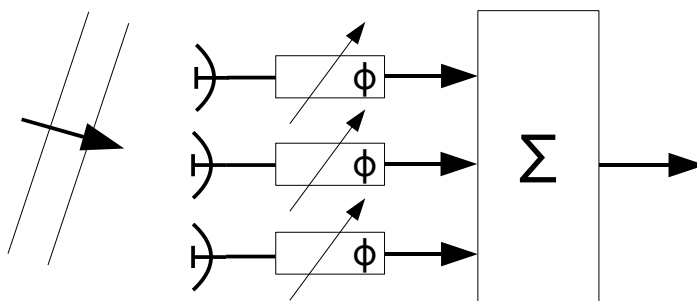
skupine bistveno manjši. Če so antene razporejene na enakih razdaljah, bo tudi časovna razlika med sosednjima antenama vedno enaka. Na zgornji sliki sem narisal primer, ko je ta razlika osminko periode valovanja ali 45 stopinj faze. (Razdalja med sosednjima antenama krat sinus vpadnega kota je osmina valovne dolžine).

Kako bi lahko dosegli, da bi v tem primeru dobili maksimalni signal?

Ena rešitev je, da anteno, na katero val najprej pride, povežemo z najdaljšim kablom, naslednjo z malo krajšim (kolikor znaša zakasnitev med sosednjima antenama), in tako dalje, do najkrajšega kabla pri zadnji anteni, na katero val pride najkasneje.



Če naredimo zakasnitve spremenljive, lahko z njimi poljubno usmerjamo našo antensko skupino (seveda znotraj širine diagrama posamezne antene).



Tako lahko posnamemo sliko podobno, kot če bi mehansko vrteli eno samo veliko anteno.

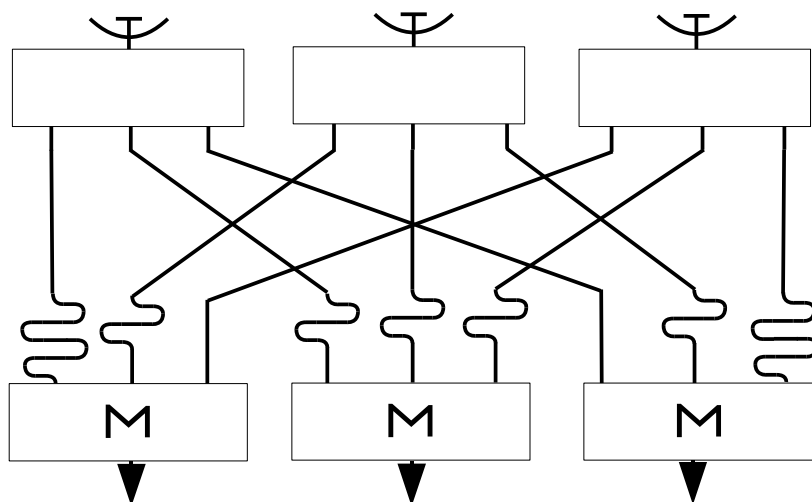
Ker večinoma delamo z relativno ozkopasovnimi radijskimi signali, lahko spremenljive zakasnilnike zamenjamo kar s faznimi sukalniki.

Takšne antenske skupine pogosto uporabljajo v praksi ("Phased Array"), največ za radarje.

Če delamo sliko večje ločljivosti (več "pikslov"), je malo zamudno pobirati vsakega po vrsti. V astronomiji so signali tudi izredno šibki, in moramo signal za vsako točko zbirati dalj časa, kar bi še dodatno upočasnilo zbiranje slike piksel po piksel.

Idealno bi bilo, če bi naša antena lahko istočasno poslušala iz več smeri, tako da bi se vsi piksli polnili istočasno in ves čas slikanja.

To lahko dosežemo tako, da uporabimo za vsako točko na sliki svoj seštevalnik:



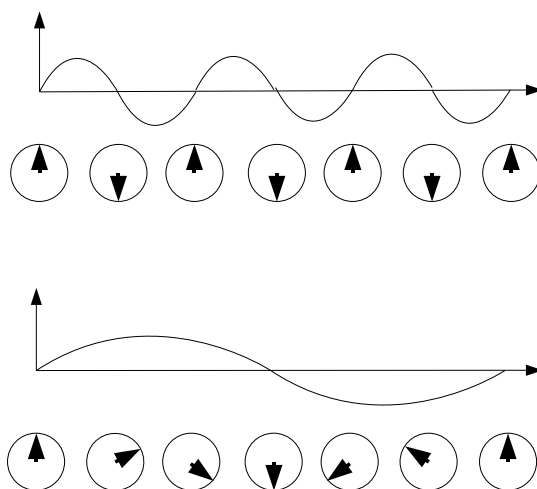
Pred delilnikom signala pri vsaki anteni lahko upoabimo predojačevalnik, da ne izgublamo na občutljivosti.

Za sliko večje ločljivosti bi takšno vezje seveda postalo preobsežno za hardversko realizacijo. Sicer obstaja tudi poenostavljena verzija takšnega vezja, ki opravi natančno isto nalogo (t.i. Butlerjeva matrika), vendar pa bi bila tudi ta za veliko število pikic praktično neizvedljiva. Zato si oglejmo, ali bi bilo morda možno enako procesiranje izvesti z DSP programi?

### 5. Digitalno procesiranje signalov antenske skupine

Zgoraj smo videli, da pri določenem vpadnem kotu valovanja dobimo določeno zakasnitev ali fazni zasuk med sosednjimi antenami. Večji kot je vpadni kot (glede na normalo), večji so ti fazni zasuki.

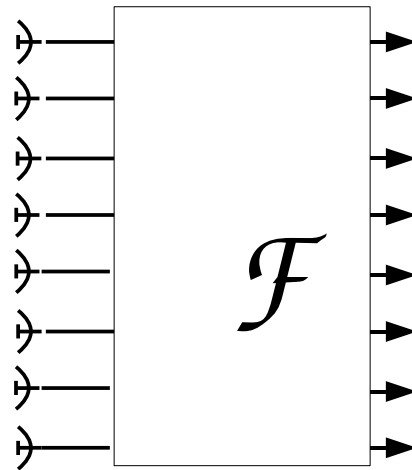
V časovnem prostoru pomeni konstanten fazni zasuk v enoti časa določeno frekvenco - večji zasuk višjo frekvenco (frekvenca je odvod faze).



Na sliki sta narisana primera 180 in 60 stopinj na enoto časa / razdalje.

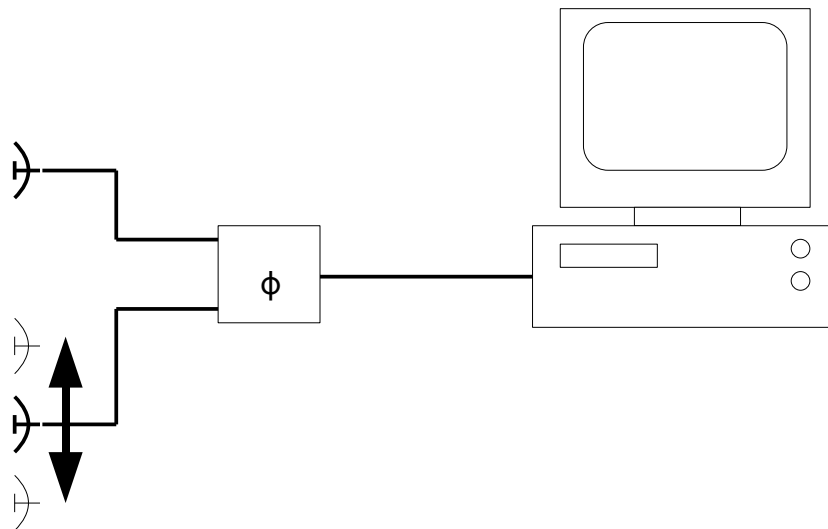
Različnim vpadnim kotom torej v nekem smislu pripadajo različne frekvence.. Ker pa tu ne gre za fazni zasuk v enoti časa ampak na enoto dolžine (razdaljo med sosednjima antenama), frekvenca ni časovna ampak prostorska, ciklov na meter.

Da ločimo valove, ki so pispeli iz različnih smeri, moramo torej izvesti nekakšno spektralno analizo. Na računalnikih v ta namen najpogosteje uporabljamo diskretno Fourierovo transformacijo, realizirano kot FFT (hitri Fourierov transform).



V računalniku so vhodni vzorci predstavljeni kot polje števil, programu, ki jih procesira pa je povem vseeno ali smo ta števila nabrali po času ali po razdalji.

Preden poženemo FFT algoritem, moramo imeti vse vhodne vzorce v pomilniku. Ni pa nujno, da jih tja vpišemo hkrati! Slikanje zato lahko izvedemo v dveh korakih: nabiranje vzorcev in procesiranje. Ker nas zanima medsebojna faza signala v točkah posameznih anten, moramo meritve izvesti z najmanj dvema antenama. Prva je lahko fiksna, drugo pa po vrsti postavimo v položaje preostalih anten:



Tak način nam omogoča radijsko slikanje z zelo preprosto opremo! Če uporabimo manj anten kot je pikselov, smo se seveda odpovedali hkratnemu in trajnemu zbiranju signala na celotni površini. To pomeni manjšo občutljivost in/ali daljši čas zbiranja podatkov.

## 6. Drobní tisk....

Zgornja predstavitev radijskega slikanja je bila seveda zelo poenostavljena. Pri praktični izvedbi nas čaka kup zoprnih podrobnosti, za katere moramo poskrbeti. Najbolj zoprna je verjetno zahtevana točnost postavljanja anten in dolžin kablov. Spet lahko potegnemo analogijo z optičnim teleskopom: njegovi optični elementi (zrcalo) morajo biti obdelani s točnostjo delčka valovne dolžine, n. pr.  $\lambda/16$ . Enako velja za položaje naših anten in dolžine kablov itd.

## 7. Uporaba interferometriškega slikanja

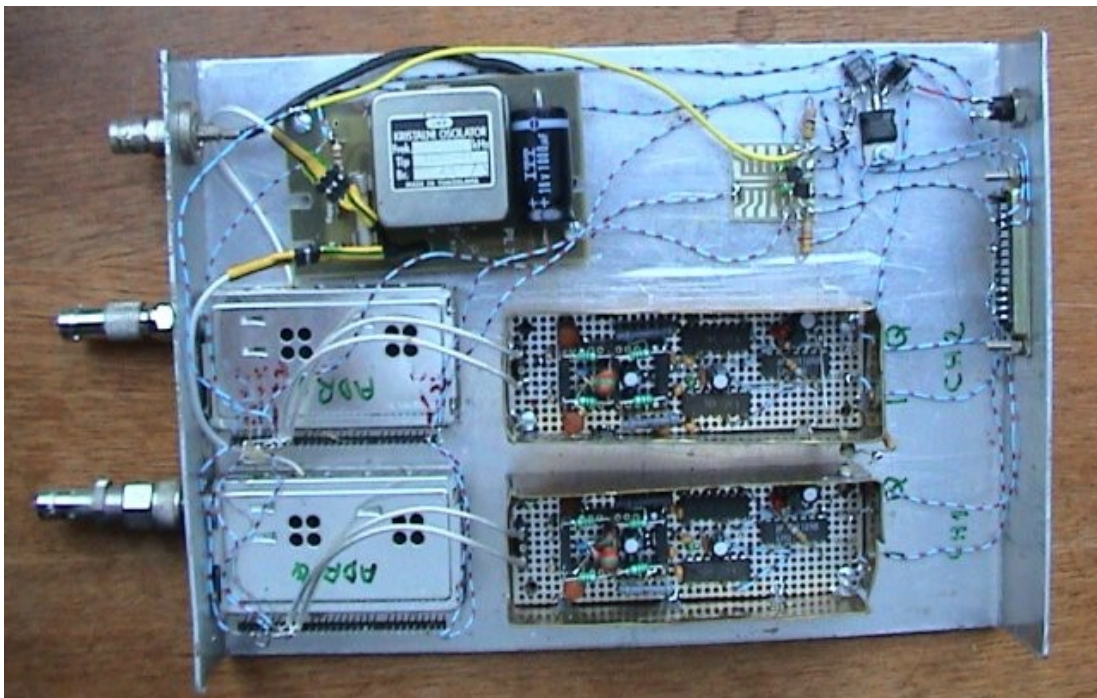
To metodo so razvili radijski astronomi, ki jo tudi največ uporabljajo. Poleg fizično povezanih sistemov (n. pr. VLA v Socorro NM, ZDA: 27 30m parabol na tračnicah dolžine nekaj km) so razvili tudi metodo, pri kateri ni potrebna direktna povezava med antenami t.i. "VLBI" (interferometrija z zelo dolgimi osnovnicami). Pri tem pri vsaki anteni za časovno (faza!) referenco uporabijo zelo natančne atomske ure (vodikove maserje) in signale snemajo ločeno pri vsaki anteni. Pozneje posnetke skupaj obdelajo, da dobijo slike.

Ker večina velikih anten ni na tračnicah, za premikanje anten uporabljajo tudi kar vrtenje zemlje. To seveda prinese nekatere probleme (signal ni vzorčen v ravnih črtah, odprtina ni povsem pokrita), ki jih je treba reševati z domiselnim dodatnim procesiranjem in matematiko.

Z VLBI metodo lahko uporabljajo osnovnice velikosti premera Zemlje (in več, če je ena antena na satelitu), tako da danes ločljivost radijskega slikanja dosega tisočinke kotne sekunde (!!! kot če bi iz Kopra v Muski Soboti ločili dve pikici na razdalji 1mm), kar je precej boljše od največjih optičnih teleskopov Hubble v vesolju im ločljivost približno desetinko kotne sekunde, na Zemlji pa zaradi turbulenc v atmosferi tudi večji teleskopi brez adaptivne optike ne dosegajo niti tega.

## 8. Moji poskusi

Pred približno dvema letoma sem pričel z razvojem preprostega digitalnega interferometra za amatersko radijsko astronomijo.



Prve rezultate sem pokazal že na Inskem srečanju (ris05). Od takrat pa sem izvedel tudi preprost poskus s slikanjem GPS konstelacije. Tudi pri tej fazi mi je pomagal Pavle, S57RA.

GPS sateliti predstavljajo relativno močne točkaste vire na frekvenci 1575MHz, razporejene po vsem nebu. Kotne razdalje med njimi so velike (do nekaj deset stopinj), zato jih lahko med seboj razločimo že z dokaj malo skupino.

Odločil sem se narediti sliko 16x16, ker se v času zbiranja podatkov (premikanje antene v vse položaje) sateliti na nebu ne smejo premakniti več kot del piksla. Sateliti so razporejeni po celotni nebesni polobli, zato sem izbral raster mreže  $\lambda/2$ , tako da slika pokriva vse nebo.

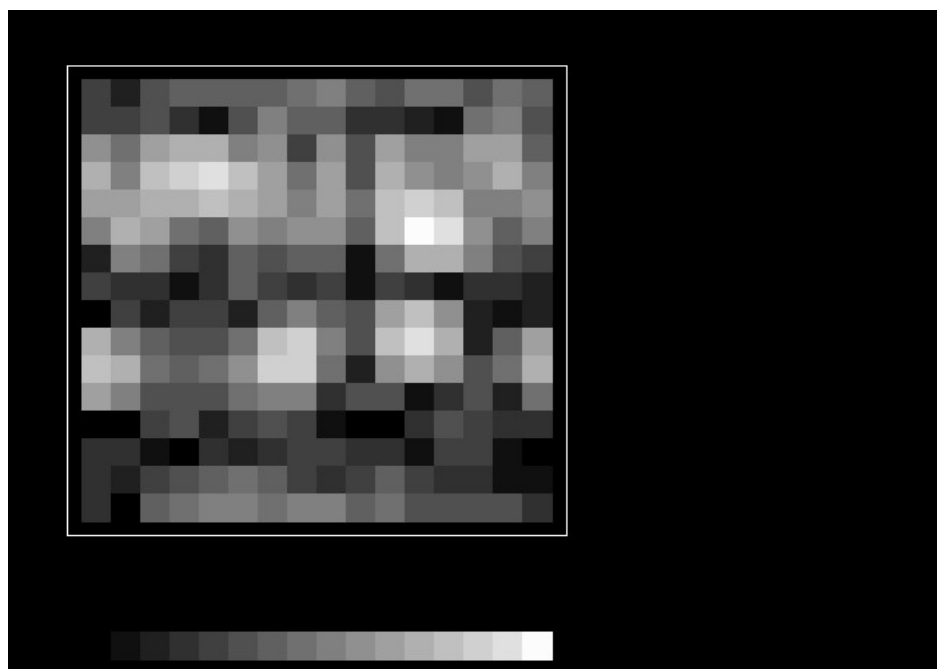
Na tla pred hišo sva narisala mrežo 16x16, po kateri sva premikala malo GPS anteno.







Na palci na lestvi je samo oddajni dipolček, s katerim sva testirala delovanje sistema. Izdelava ene slike je trajala približno 17 minut, v vsaki od 256 točk pa je zbiranje signala trajalo dve sekundi. Pasovna širina sprejemnika je bila cca 400kHz, pri procesiranju pa nisem uporabil spread kod. Signal GPS satelitov z razpšenim spektrom je tako simuliral sprejem zares naključnih naravnih virov. Po dvodimenzionalni FFT je rezultat izgledal takole



Razločimo lahko štiri satelite, peti na obzorju pa se je “poaliasal” na obe strani.

Vse podrobnosti (električne sheme, izvorna koda) o tem poskusu so na moji domači strani:

[http://lea.hamradio.si/~s57uuu/astro/sidi1\\_1/imaging/index.htm](http://lea.hamradio.si/~s57uuu/astro/sidi1_1/imaging/index.htm)