

Seinale eta Sistemak: Seinale baten transmisioa QAM modulazioa erabiliz

Andoni Vazquez Arza eta Benat Arberas Larrinaga

Hurrengo orrieta garatuko den praktikaren helburu nagusia Seinaleak eta Sistemak irakasgaiaren eduki teoriko-praktikoen implementazioa izango da. Zehazki, seinaleen transmisioa QAM modulazioaren bitartez lortzen duen aplikazioa. Hori lortzeko, urtean zehar garatutako kontzeptu eta lan-tresnetan oinarrituko gara.

1 Seinalearen ibilbidea ulertzen

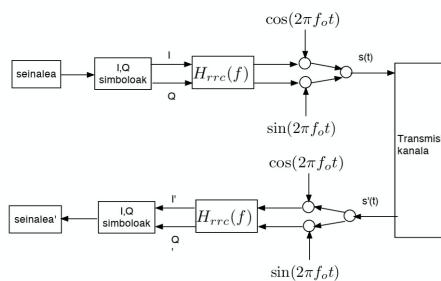
Lehenik eta behin, transmitituko dugun seinalearen izaera azaldu behar da. Mezu bat (adi-bidez, "A") ASCII kodean ($A=65$) era binarioan ($65=01000001$) izango da gure abiapuntua, baina guk mezu hau kode hamaseitarrean lortu nahi dugu ($01000001=41$). Behin era hamaseitarrean adierazita, 16 elementuko konstelazio bateko koordenatuak bezala adieraz ahal izango da. Errespresentazio hamaseitarra bitak 4 elementuko taldeetan elkartzea errazten digu, gero 16-QAM konstelazioan mapeatzeko. Honi deritzogu QAM kodifikazioa, ingelesez "Quadrature Amplitude Modulation".

Behin QAM kodifikazioa lortuta, bi seinale aterako ditugu, I eta Q. Seinale hauek H_{rrc} (Root-Raised-Cosine) izeneko iragazki batetik pasatuko dira iragazketa banda zabalera mugatzeko. Jarraian, modulazio bat egingo dugu, I eta Q seinaleetatik $s(t)$ deituriko seinale bakarra lortzeko. Honako $s(t)$ seinalea izango da transmisio kanal baten bitartez tartsmitituko dena. Hemen amaitzen da igorlearen papera.

Hala eta guztiz ere, hartzaileak ez du $s(t)$ jasotzen, errealtitatean transmisio kanalak idealak ez direlako. Zaratak, potentzia galerak edo ezlinealtasunak besteak beste, jatorrizko seinalea aldatzen dute, eta jasotakoa $s'(t)$ deituko dugu.

Seinalearen transmisioa jadanik gertatu den arren, gure helburua lehen aipatutako mezua lortzea da. Horretarako, hartzaileak demodulazio eta iragazketa prozesu bat jarraituko du, igorlearen bidea kontrako noranzkoan ibiltzen.

Hurrengo puntuatan, aipatutako pausu guztiak banan azalduko dira. Irudia 1 [1] diagraman aplikazioaren eskema orokorra aurki dezakegu.



Irudia 1: Aplikazioaren eskema orokorra [1]

1.1 QAM modulazioa: IQ konstelazioa

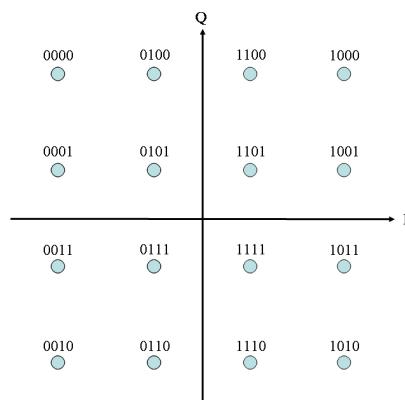
QAM modulazioa egiteko era bat baino gehiago existitzen da, baina guztiak "konstelazio" izeneko diagrama bidimentsionalean oinarrituta dade. Ardatz horizontalean (I) eta bertikalean (Q) era simetrikoan sakabanatuta dauden N modulazio egoera errepresentatzen, modu hauek I eta Q ardatzetan tarte bera izanez haien artean. N modu kantitatea erabiliko dugun biten arabera definitzen da, N-QAM koadratura formak sortuz.

Ohikoena konstelazio hauek karratuak izatea da. Hori dela eta, QAM kuadraturan gehien erabili diren moduak 16-QAM (4 bit), 64-QAM (6 bit) edo 256-QAM (8 bite) dira. Dena den, IQ konstelazio zirkularrak ere existitzen dira, ez da mugatzen konfigurazio karratueta.



Irudia 2: QAM modulazioaren IQ konstelazio ezberdinak

Gure kasuan, elementu bakoitzeko 4 bit erabiltzen duen 16-QAM eredua karratua erabiliko dugu. Behin transmititu nahi dugun seinalea era hamaiseitarrean adierazita dugunean, zuzenean mezua konstelazioaren elementuen bitartez adieraz dezakegu. 3 Irudian ikus dezakegu konstelazio honen konfigurazioa.



Irudia 3: 16-QAM IQ konstelazioa [1]

Kasu partikularrean honetan, bai I bai Q ardatzean, elementuen arteko distantzia 6 unitatekoa izango da. Hau da, I ardatzean, 0 baliotik hasita, lehen elementu zutabea $I=3$ zuzenean kokatuko da, eta bigarren elementu zutabea $I=9$ zuzenean. Konstelazioa simetrikoa da I eta Q ardatzekiko. Beraz, adibide bezala, 1100 puntu (3,9) puntuarekin adierazi dezaketu (I,Q) planoan.

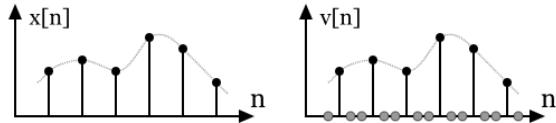
1.2 Upsampling

Denbora eremuan seinale digital diskretu bat izanda, $x[n]$, edo $x[k \cdot T_s]$ seinale laginduaren kasuan, T_s laginketa-periodoa izanik, haren azterketa gauzatu ahal dugu Fourieren transformatua eginez, maiztasun eremuan jorratu ahal izateko. Kontuan izanda seinalea T luzera finitukoa dela eta haren pausua $dt = T_s$ -koa dela, hurrengo formulak erabili dezakegu F frekuentzia zabalera eta df , haren pausua, jakin ahal izateko:

$$F = \frac{1}{dt} \quad (1)$$

$$df = \frac{1}{T} \quad (2)$$

Baina, espektroa kopien bitartez luzatu nahi badugu, seinalea upsampling prozesu batetik pasa beharko da. Ez da informazioa ezta banda zabalera gehitzen. Upsampling metodoaren oinarria $x[n]$ genituen puntuen artean balio nuluko zenbait elementuen txertaketan datza. $x[n]$ eta $x[n+1]$ tarteko zabalera bakotzean ($m-1$) puntu gehituko ditugu, 4 Irudian adierazten den bezala.



Irudia 4: Upsampling [5]

Jatorrizko seinalean N puntu bageneukan, tarte bakotzean ($m-1$) elementuen txertaketa eta gero daukagun seinalearen elementu kopurua $N_m = m \cdot N$ izango dugu. $x[k \cdot T_s]$ seinale lagindu batekin lan egiten ari bagara, praktikan laginketa periodoa txikiagotzen ari gara. Horrela aldatzen dira seinale berriaren propietateak denbora eremuan:

$$dt_m = \frac{dt}{m} = \frac{T_s}{m} \quad (3)$$

$$T_m = dt_m \cdot N_m = T \quad (4)$$

$$F_m = \frac{1}{dt_m} = \frac{m}{dt} = m \cdot F \quad (5)$$

$$df_m = \frac{1}{T_m} = \frac{1}{T} = df \quad (6)$$

Ekuazioetara begiratuz informazioa lor dezakegu. Alde batetik, bi seinaleen T eta T_m berdinak dira denbora eremuan, puntu berriak ez baititugu T periodoaren kanpo txertatu. Gainera, honen ondorioz, maiztasun eremuko pausua ere berdina da, $df = df_m$. Beraz, upsampling metodoa ez du erresoluzioa handituko maiztasun eremuan.

Beste alde batetik, F_m frekuentzia berria jatorrizko seinalearen F -a baino m aldiz handiagoa dela nabaritzen da. Seinale berri honetan Fourier-en transformatua gauzatzen badugu, jatorrizko seinalearen transformatuan agertzen zen seinalearen kopiak agertzen direlataz konturatuko gara.

1.3 Hrrc iragazkia

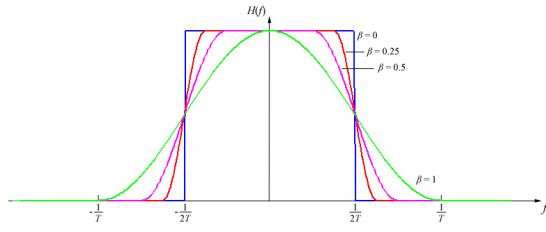
H_{rc} , edo Root Raised Cosine iragazkia, 1 Irudian ikusi ahal duguna aplikazioan implementatuta, telekomunikazio digitalen munduko atal oso garrantzitsua da. Prozesamendu digitalean, T_s denbora unitate bakoitzeko igortzen dira simboloak, eta horrekin batera zenbait arazo datozi. ISI (Inter-Symbol Interference) deitzen den fenomenoa seinalearen distorsioarekin du erlazioa, simbolo bata hurrengo simboloekin interferitzen baita. Ondorioz, hartzaileak jasotzen duen seinalea ez da igorleak bidali duen berdina.

Nozki, gure eskuan dagoen bitartean saihestu nahi dugun fenomeno bat da, seinalearen fidagarritasuna bermatzeko. Hori lortu ahal izateko, bai igorlearen bai hartzailearen iragazkiak diseinatu behar dira efektu hauek minimora eramateko. Iragazki hauek Nyquist motatakoak dira, Nyquist-en irizpidea jarraitzen baitute, hau da, $\pm n \cdot T_s$ denboran sisteman erantzuna 0 izatea, n edozein zenbaki natural izanda zeroa izan ezik ($n = 1, 2, 3, 4, \dots$).

Raised Cosine (H_{rc}) iragazkiak Nyquist baldintza hori betetzen du. Gainera, behe paseko iragazkia dela dakigu, maiztasun baxuko seinaleak pasatzen uzten baitu, baina maiztasun handiagokoak gutxiagotzen edo ezabatzen baititu.

$$H_{rc}(f) = \begin{cases} T, & |f| \leq \frac{1-\beta}{2T} \\ \frac{T}{2} [1 + \cos \frac{\pi \cdot T}{\beta} [|f| - \frac{1-\beta}{2T}]], & \frac{1-\beta}{2T} \leq |f| \leq \frac{1+\beta}{2T} \\ 0, & |f| > \frac{1+\beta}{2T} \end{cases} \quad (7)$$

T periodo eta $0 \leq \beta \leq 1$ izanda, iragazkia eraikitzeko informazio guztia daukagu. 5 Irudian β balio ezberdinatarako iragazkiak hartzen duen forma ezberdinak ikus ditzakegu, $\beta = 1$ eta $\beta = 0$ kasu limiteak eta tarteko balio birena.

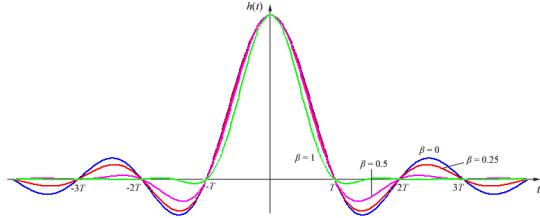


Irudia 5: Raised Cosine Irregularity (H_{rc}) maiztasun (f) eremuan [6]

Raised Cosine iragazkiaren pultsu erantzuna hurrengoa da:

$$h_{rc}(t) = \text{sinc}\left(\frac{t}{T}\right) \frac{\cos\left(\frac{\pi\beta t}{T}\right)}{1 - \frac{4\beta^2 t^2}{T^2}} \quad (8)$$

Eta pultsu erantzunaren errepresentazioa β -ren balio ezberdinatarako denbora eremuan hurrengo hau daukagu:



Irudia 6: Raised Cosine Irregularity pultsu erantzuna denbora (t) eremuan [7]

Orain, iragazkia bi zati simetrikotan banatu nahi dugu, bata igorlearen iragazkiari (H_{rci}) dagokiona eta bestea hartzaleari (H_{rch}), biak berdinak izanda. Hemendik aterako dugu H_{rrc} -ren, edo Root Raised Cosine iragazkia, definizioa. Helburua SNR-a (Signal-to-Noise-Ratio), edo seinale-zarata erlazioa, ahalik eta gehien handitzea izango da hartzalean. Beraz,

$$H_{rc}(f) = H_{rci}(f) \cdot H_{rch}(f) = H_{rrc}(f) \cdot H_{rrc}(f) \quad (9)$$

Edo, magnitudetan:

$$|H_{rrc}(f)| = \sqrt{H_{rc}(f)} \quad (10)$$

Eta denbora eremuan, Root Raised Cosine iragazki bien konboluzioa izanez:

$$h_{rc}(t) = h_{rrc}(t) * h_{rrc}(t) \quad (11)$$

Garrantzitsua da sistema osoak Raised Cosine (H_{rc}) iragazki bat osatzen duela, baina bitan banatuz lehen aipatutako SNR optimoa lortzen da, seinale-zarata erlazioa.

1.4 Modulazioa eta demodulazioa

1.1 atalean gure seinalea bitan banatu dugu, $I(t)$ eta $Q(t)$. Orain, QAM modulazio prozesuarekin jarraituko da biak seinale bakar batean fusionatuz, $s(t)$ izan ere, transmisio kanalaren bitartez garraiatu ahal izateko. Kuadratura anplutideko modulazio honen pausu honetan, I eta Q seinaleak $\frac{\pi}{2}$ radianeko desfasearekin transmitituko dira, 90 gradu.

$$s(t) = I(t) \cos(2\pi f_o \cdot t) + Q(t) \sin(2\pi f_o \cdot t) \quad (12)$$

f_o garraiatzailearen maiztasuna izanik. Horrela, bi seinaleak banda zabalera bera hartzen dute, eta berriz banatu ahal izango ditugu hartailera ailegatzerakoan, demodulazio prozesu baten bitartez.

Demodulazioa gauzatzeko, ailegatutako seinalea kosinu batekin biderkatuko dugu $I(t)$ berriz lortzeko, eta sinu batekin $Q(t)$ lortu ahal izateko. Ala eta guztiz ere, transimisio kanaletik pasa eta gero, jatorrizko $s(t)$ seinalea halabeharrez zenbait aldaketa jasan ditu, eta hartaileari $s'(t)$ seinale modifikatua ailegatzen zaio. Hori dela eta, $I(t)$ eta $Q(t)$ ordez, $I'(t)$ eta $Q'(t)$ seinaleak lortuko ditugu.

$$s'(t) = I'(t) \cos(2\pi f_o \cdot t) + Q'(t) \sin(2\pi f_o \cdot t) \quad (13)$$

$$r_I(t) = s(t) \cdot \cos(2\pi f_o \cdot t) \quad (14)$$

$$r_Q(t) = s(t) \cdot \sin(2\pi f_o \cdot t) \quad (15)$$

2 Praktikaren Garapena

Seinaleen transmisioa eta modulazioa jorratzen duen praktika honen garapena bi egun ezberdinatan banandutako bi saioetan gauzatu egin da. Lehenengoan, zaratarik gabeko kanal batean transmititzen den mezua aztertu genuen, kasu ideala. Horrela, mezuaren konstelazioaren garapena, modulazioa, iragazkiak eta demodulazioa landuko da. Helburu nagusien artean, QAM modulazioaren ezagutza garatzeaz gain, Scilab programazio lenguia-rekin lantzea izango da, eta telekomunikazioen munduan erabilgarriak diren erremintak jorratzea.

Bigarren saioan, aldiz, kasu idealetik pixka bat aldenduko gara zarataren eragina konprobatu ahal izateko. Ingurune errealaista batean, seinaleak nahi gabezko modifikazioak jasango ditu, eta honek hartzailera ailegatzen den informazioan arazo bat izan daiteke. Honekin batera, gure aplikazioaren limiteak ezagutuko ditugu, igorlek bidaltzen duen mezua hartzialeak problema barik jasotzeko zarata maximora ailegatuz.

2.1 Scilabeko funtzioak

Praktikan zehar aurrera eramango ditugun prozesuak Scilab software zientifikoan formulatu ahal izateko, zenbait funtzio erabilgarri izan ditugu eskuragarri. Hona hemen irakasleak hornitu zigun funtzioen zerrenda:

- dec2hex(x) : x aldagaiaren informazioa lengoai hamartarretik hamaseitarrera pasatzeko baliagarria da. Scilab-ek daukan dec2hex(d) berezko funtzioa erabiltzen du bere kodigoan.
- hex2data(x) : x aldagaiaren informazioa ateratzeko, data=dex2data(x) erabiliz, gero Scilab-eko ascii(data) berezko funtzioaren bitartez mezua berriz lortzeko.
- hex2IQ(x) : Behin mezuaren informazioa lengoai hamaseitarrean izanda, IQ konstelazioa eraikiko duen funtzioa da. Elementu bakoitza 16 koordenatu posiblleen artean sailkatzen du.
- IQ2hex(IQ) : hex2IQ(x) funtzioaren alderantzizkoa, IQ konstelazio baten elementuak lengoai hamaseitarrean adierazten du. Hartzaileak mezua dekodifikazio prozesua gauzatzeko erabiliko dena.
- iragazkia_fft(x,L) : Iragazki ideal bat aplikatzen du Scilab-eko fft(x) Fast Fourier Transform berezko funtzioa erabiliz.
- upsample(x,m) : x balio diskretuen segida batean erabiltzean funtzioak bueltatzen duena m aldiz puntu gehiago izango dituen beste segida diskretua da. x(i) eta x(i-1) puntuen artean (m-1) puntu nuluak (=0) kokatuko ditu.
- modulazioa(x,T,w_mod,bandaelem,modbandaelem) : IQ seinaleak sartuta nx2 bektore bat osaturik T abiaduran, Tmod maiztasuneko modulazioa lortzen da (koadraturan, 1 ekuazioan bezala), [t_min,t_max] tartean.
- rrc_iragazkia : H_{rrc} (Root Raised Cosine) iragazki eraikia.

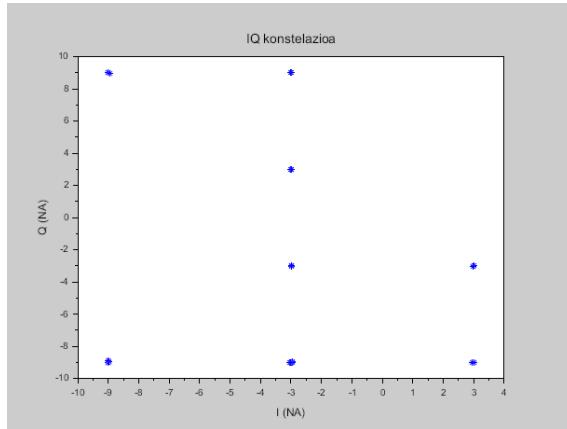
2.2 Zaratarik gabeko transmisioa

Hasi baino lehen, transmititu nahi den mezuaren aukeraketa egin beharko da. Gure kasuan, "Egun on" 'string' motatako mezua transmititzea erabaki dugu, edo zehazki "Egun on" mezua eta 6 zuriune. Sei zuriune horiek ez dira hartzaileari ailegatu behar zaion informazioa, baina transmisioa gertatzeko ezinbestekoak dira. Izan ere, praktikaren bukaeran ikusiko dugun moduan, zuriune horiek desagertuko dira hartzaileak mezua dekodifikatzean.

1.2 Upsampling teoria atalean aipatutako upsample prozesuarekin daude erlazionatuta. Seinalearen upsampling edo downsampling egiterakoan, sinkronizazio erroreak gerta litzateke, eta espazio zuri horien presentzia akats hauen desagerpena eragiten du.

Behin mezua aukeratuta, IQ konstelazioan adieraziko dugu. Dakigunez, "string" motatako ASCII kodeak errepresentazio bat dauka sistema bitarrean eta sistema hamaseitarrean, besteak beste. Gure konstelazioa, sistema hamaseitarraren elementuei esleituta dauden 16 koordenatu ditu, eta horrela adierazten da mezua konstelazioan. Ez dugu eskuz mezua sistema hamaseitarrera pasatu behar, ezta hamaseitarretik IQ konstelaziora. Scilaben bi funtzio oso interesgarriak lagungarri izango ditugu: dec2hex1("Mezua") eta hex2IQ(),

ASCII kodean dagoen mezua hamaseitarrera pasatzeko eta hamaseitarrean dagoena IQ konstelazioa trasladatzeko.

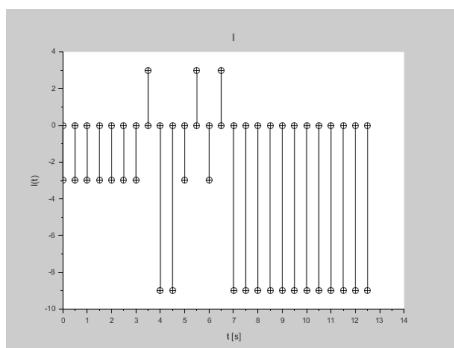


Irudia 7: "Egun on"mezuaren IQ konstelazioa

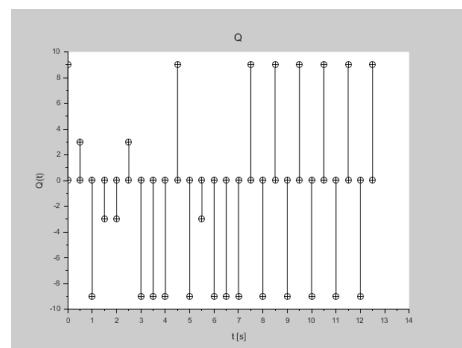
2.2 atal honen amaieran, hartzailak jasotako konstelazioaren grafikoa ikusiko dugu ere. Gure suposizioak egiazkoak badira, puntuak posizio berberan egongo dira, ez baitago zaratarik. Interesgarria izango da hiru konstelazioa hauek konparatzea: igorlearena, hartzailarena transmisio kanal zaratagabeen eta hartzailarena transmisio kanal zaratatsuan. Zarataren eragina begibistaz ikusteko ariketa oso interesgarria da.

16-QAM IQ konstelaziotik bi $I(t)$ eta $Q(t)$ seinale lortzeko karaktereak igorriko diren abiadura (srate) segundu batekoa izatea erabaki dugu. Karaktere bakoitzak bi puntu errepresentatzen dituenez IQ konstelazioan, haren elementuen arteko igorketa denbora (dt) srate-aren erdia izango da, 0.5 segundoko. Mezua bidaltzeko denbora totala (T) elementu kopuruaren eta elementu bakoitza bidaltzeko denboraren arteko biderketa izango da.

Hurrengo grafikoetan ikusten denez, 12.5 segundoko seinaleak ditugu, $I(t)$ eta $Q(t)$ -9, -3, 3 eta 9 balioak harti ahal dituzte, $t = n \cdot dt$ balio diskretuak hartuz.



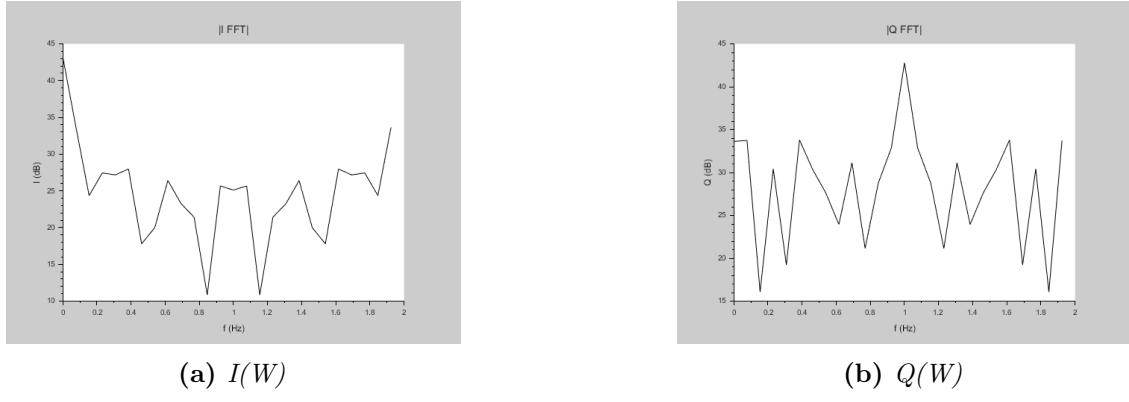
(a) $I(t)$ seinalea



(b) $Q(t)$ seinalea

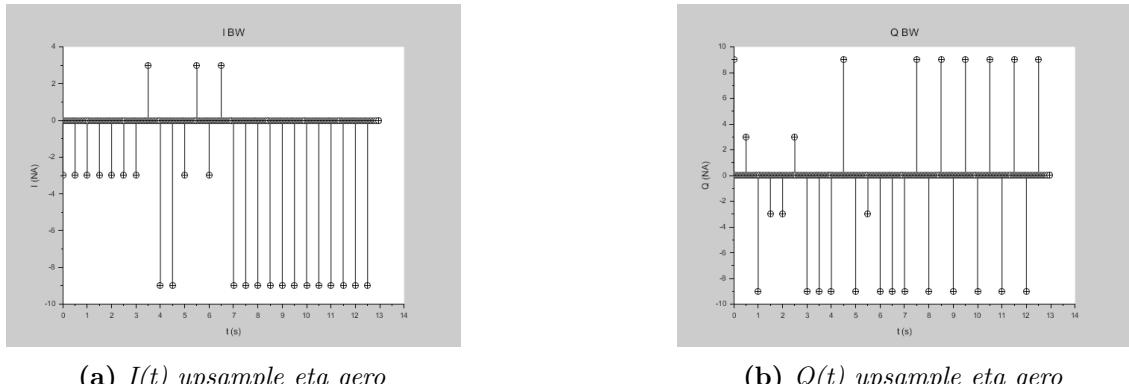
Irudia 8: IQ konstelazioaren deskonposaketa $I(t)$ eta $Q(t)$ seinaleetan

Hurrengo pausua denbora eremutik maiztasun eremura pasatzea izango da FFT-aren (Fast Fourier Transform) bitartez, anplitude-espektroa ikustarazteko. Scilab-eko funtzioa erabili baino lehen banda zabalera (F) eta frekuentziaren pausua (df) kalkulatzea posiblea da, teoriako upsample atalean ikusitako (1) eta (2) formulak erabiliz. $F = 2 \text{ Hz}$ eta $df = 0.08 \text{ Hz}$ izanda.



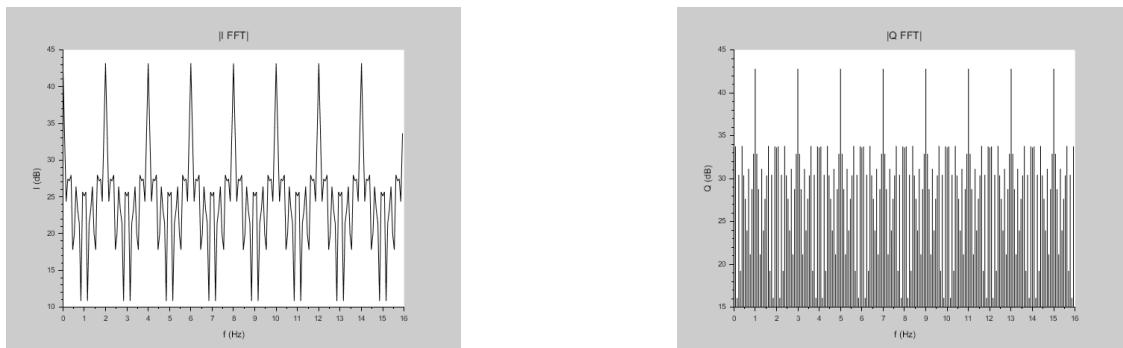
Irudia 9: $I(t)$ eta $Q(t)$ FFT-a eta gero, maiztasun eremuan

Maiztasun eremuan espektroa luzatzeko $I(t)$ eta $Q(t)$ seinaleen denbora eremuan zero balioko puntuak kokatuko ditugu, denbora totala, T (eta beraz, baita df), aldatu gabe, baina pausua (dt) txikiagotuz.



Irudia 10: $I(t)$ eta $Q(t)$ seinaletan upsample prozesuaren aplikazioa eta gero

Gure kasuan lehen genuen elementu bakoitzeko orain 8 elementu izango ditugu ($m=8$). Teoriako (5) eta (6) formulak erabiliz anplitude espektro zabalera berria (F_m) eta maiztasun pausu berria (dt_m) lor ditzakegu. Hori dela eta, 16 Hz-ko espektroa dugula dakigu maiztasun eremuan. Konprobazioa egiteko, I eta Q berri horiei FFT-a aplikatu zaie.

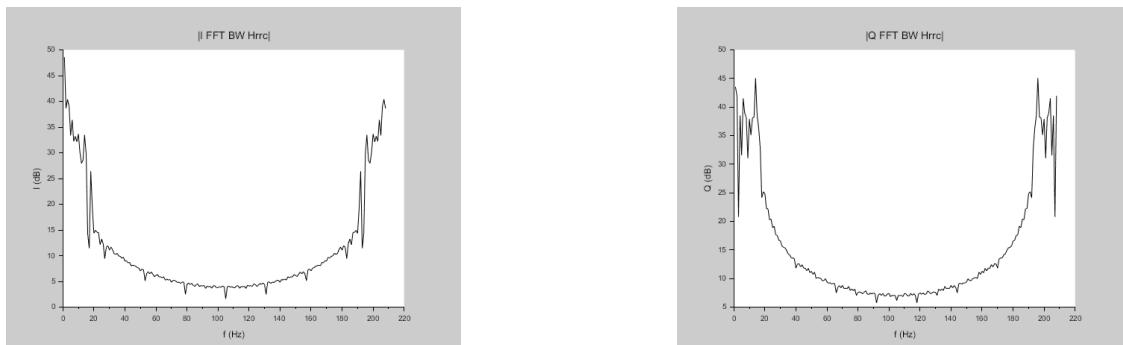


(a) $I(w)$ eta bere kopiak

(b) $Q(w)$ eta bere kopiak

Irudia 11: $I(w)$ eta $Q(w)$ espektroaren handipena

11 Irudian ikusi ahal dugunez, bi grafiko horiek ematen diguten informazioa gure emaitza teorikoekin bat dator. Frekuentzia pausua ez da handiagotzen, upsample-ak ez baitu erresoluzioa handitzen, baina espektroaren luzapena lortu da kopien bitartez. Orain, bi seinalean gainean Root Raised Cosine iragazkia aplikatuko dugu. 12 Irudi-ko bi grafikoetan ikus dezakegu iragazketan honen emaitza.

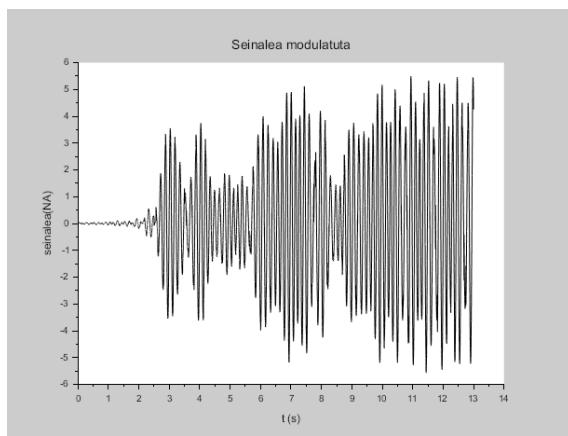


(a) $I(w)$ Hrrc

(b) $Q(w)$ Hrrc

Irudia 12: $I(w)$ eta $Q(w)$ espektroak Hrrc iragazkia eta gero

Iragazkia aplikatu eta gero I eta Q seinaleak modulatuko ditugu, denbora eremuan kosinu eta sinuarekin biderkatuz, (12) ekuazioan adierazi dugun bezala. Modulazioa egitean beste upsampling bat aplikatuko dugu. Upsample honi ezker bermatzen dugu aliasing-a ez gertatzea, izan ere maiatasun pausu berria ($dt_m = dt'_m \times \text{modbandaelem}$) non modbandaelem elementu bakoitzeko geitutako elementu kopurua den ($\text{modbandaelem}=1000$ gure kasuan). Honen ondorioz, T_s laginketa periodoa asko handituko da, bermatuz $T_s > \frac{\pi}{w_o}$ betetzen dela, gure kasuan $w_o = \text{mod}w$.

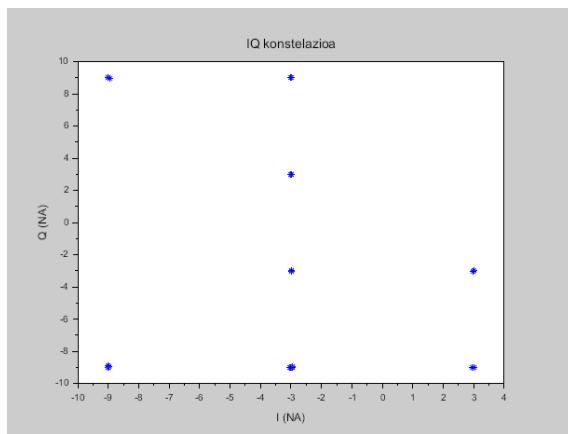


Irudia 13: Seinale modulatua denbora eremuan

Bein hau eginda mezua transmizio kanal baten bidez bidaliko da, eta hartzaileak jasotako seinalea dekodetu beharko du jatorrizko mezua irakurri ahal izateko. Horretarako seinalea demodulatzu hasi behar da, (14) eta (15) ekuazioak jarraituz $s(t)$ seinaleetik abiatuta I eta Q seinaleak berrezkuratuko ditugu, haien amplitudeak erdira murritzuta eta goi maiztasuneko osagaietan.

Ondoren, I eta Q seinaleak Hrrc iragazkitik pasatzen ditugu berriz, eta haien banda zabalera murrizten dugu, downsampling bat eginez.

Kontuan izan behar da Hrrc iragazkia aplikatzerakoan atzerapen bat sortu dela, izan ere honek seinalea desplazatzen du pultsua eraldatu gabe, beraz orain seinalea sinkronizatu behar dugu. Gainera modulatzerakoan amplitudea erdira murritztu da, beraz irabazia egokitu behar dugu amplitudea bikoitzuz. Horretaz aparte banda zabalera berriz murrizu behar dugu, izan ere mezua kodifikatzean bi upsampling egin ditugu.



Irudia 14: "Egun on"mezuaren konstelazioa jatorrian eta hartzaileak lortutakoa

14 irudian ikusten denez, hartzaileak berreskuratutako IQ konstelazioa hasieran lortu

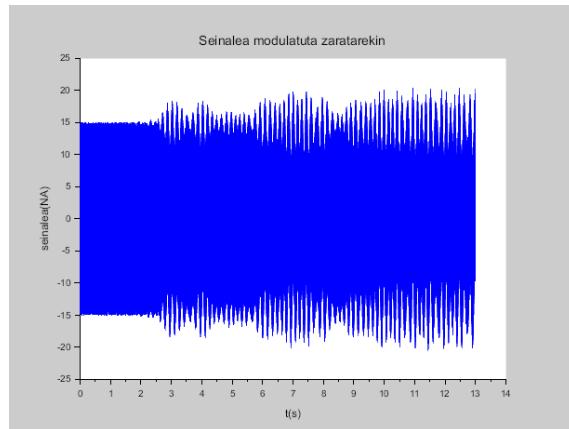
dugun konstelazioarekin guztiz bat dator, beraz argi dago hartzalea mezua berreskuratzeko gai izango dela. Orain geratzen den pausu bakarra seinalea IQ-tik ASCII-ra pasatzea da. IQ2hex(IQ) funtzioaren bidez seinalea lengoai hamaseitarrean adieraziko dugu, ondoren hex2data(x) funtzioa erabiliko dugu hamaseitarretik ascii-ra pasatzeko, eta bukatzeko ascii(x) erabiliz gai izango gara mezua pantailan inprimatzeko.

2.3 Transmisió kanal zaratatsua

Kasu honetan, modulatutako seinalearia zarata zuria gehituko diogu, errealtitatean seinalea bidaltzean gertatuko litzatekeena simulatzeko.

Zarata hori $k_z(\text{rand}(\text{xmod}) - 0.5)$ ekuazioaren bidez adierazi dugu, honek $\pm \frac{k_z}{2}$ arteko balioak sortuko ditu era aleatorioan xmod-en elementu bakoitzerako, non xmod jasotako seinalea den.

16 irudia 13 irudiarekin alderatuz argi ikusi daiteke zaratak bidalitako seinalearen gainean izandako eragina.

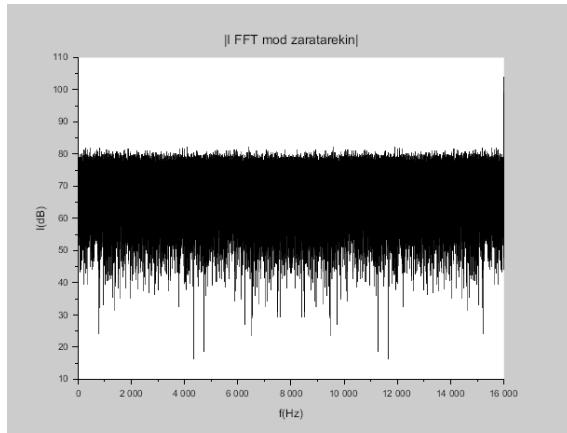


Irudia 15: Seinale modulatua

Irudia 16: Zarata gehitu ondoren jasotako seinalea

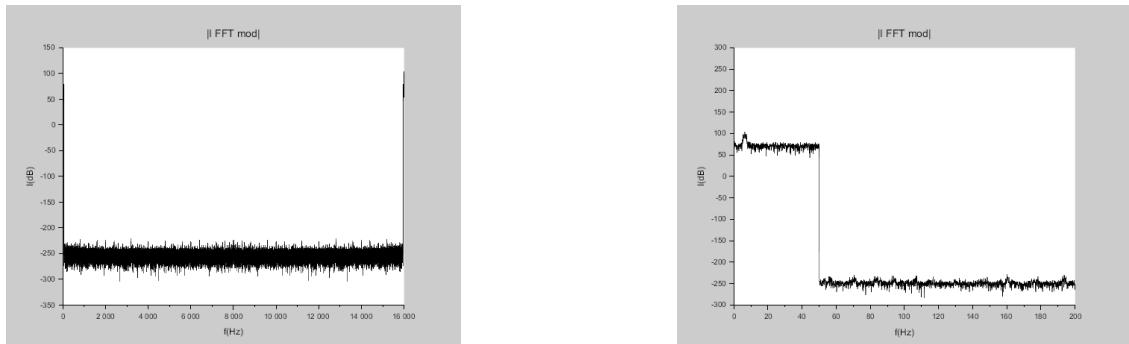
Behin zarata gehitura, hartzaileak jasotako seinalea deskodetu behar da, aurreko atalean aipatu den prozedura jarraituz, baina kasu honetan demodulazioa hasi baino lehen zarata kendu behar da.

Horretarako, iragazki ideal bat erabiliko dugu. Kontuan izan behar da zarata zuriak maiztasun guztiarako gutxi gorabehera magnitude bera duela, aztertu nahi dugun seinalea ordea maiztasun tarte batean dago bilduta. Honen ondorioz, banda zabalera iragazki baten bidez murritzten badugu zarataren potentzia totala gutxitzea lortuko dugu. Hala ere, zarata maiztasun guztiarren agertzen denez ez da posiblea zarata guztiz kentzea.



Irudia 17: Jasotzen den $I(f)$ seinalea zaratarekin

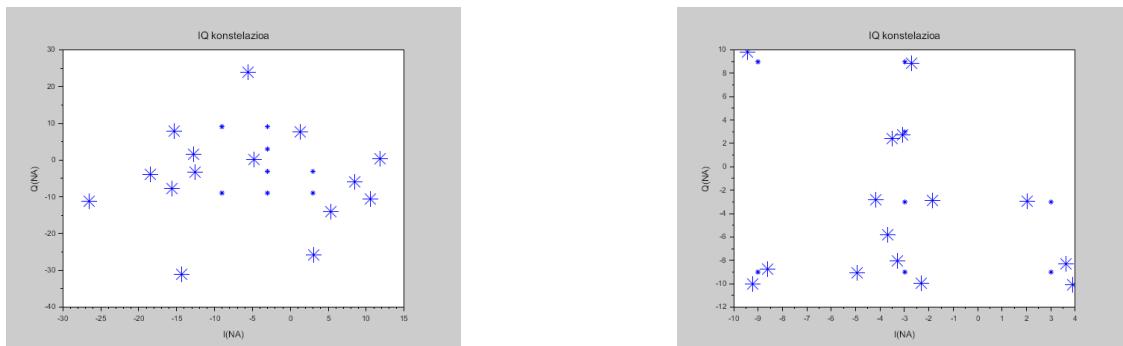
17 irudian jasotako seinalearen magnitudea (dB-tan) ageri da. Esan bezala, w_c ebaki maiztasunetik kanpo geratzen diren balioak iragazkiaren bidez kenduko ditugu, hurrengoa lortuz:



Irudia 18: Jasotzen den $I(f)$ seinalea iragazki ideal bat aplikatu eta gero

Aipagarria da $f \in [0, w_c]$ tartean interesatzen zaigun seinalearen erdia baino ez dagoela, eta beste erdiaren erreplika bat $f \in [w_{max} - w_c, w_{max}]$ tartean aurkituko dugula, non w_{max} hartzailak jasotako mezuaren maiztasun maximoa den. Hau kontuan izan behar da iragazkia aplikatzerakoan.

Bein hau eginda seinalea demodulatu ahal dugu, eta puntu horretatik aurrera jarraitu behar den prozedura zaratarik gabeko transmisio kanalan azaldu dugun berbera da.



(a) *IQ konstelazioa iragazkia aplikatugabe*

(b) *IQ konstelazioa iragazki ideaala aplikatuz*

Irudia 19: *IQ konstelazioa "Egun on" mezuarentzat zarata gehituz. izar txikiak hasierako IQ konstelazioa adierazten dute, eta izar handiak hartzailak lortutakoa*

19 irudian "Egun on" mezuaren IQ konstelazioa eta hartzailak lortutako IQ konstelazioa alderatzen dira, honetan iragazkiaren eragina nabaritzen da. a) irudian zarataren eraginez IQ konstelazioaren puntuak guztiz sakabanaturik agertzen dira, beraz ez da posiblea izango jatorriko mezua berrezkuratzeara. b) irudian ordea konstelazioa nahiko ordenatuta dago, beraz posiblea izango da mezua berrezkuratzeara. Dena den, aurrelik aipatu dugun bezala ez da posiblea zarata guztiz kentzea, eta honen ondorioz nabaritzen da b) irudian ere konstelazioaren puntuak ez daudela guztiz zentratuta.

3 Ondorioak

Praktika honetan zehar, QAM modulazioan oinarritutako transmisio sistema baten implementazioa gauzatu egin da, seinale baten ibilbide osoa aztertuz hasierako kodifikaziotik hartzailaren berreskuratzerarte. Prozesu guztiak aurrera eraman ahal izateko Seinaleak eta Sistemak irakasgaiko funtsezko kontzeptu teoriko-praktikoak integratu dira. Hots; IQ konstelazioak, laginketa eta upsample prozesua, Fourier-en transformatuaren bitartezko errepresentazioak maiztasun eremuan, modulazioa eta iragazkiak, zehazki Root Raised Cosine iragazkia.

Kasu idealean, hau da, seinalea zarata sortzen ez duen transmisio kanal batetik garraiatzen denean, mezua arazorik gabe berreskuratu ahal dugula konprobatu da. Igorlearen eta hartzailaren IQ konstelazioen arteko bateragarritasuna guztiz zuzena baita. Beraz, sistemaren diseinua eta laginketan eta iragazketan erabilitako parametroak zuzenak direla baieztatzen da.

Bigarren atal esperimentallean, transmisio-kanal zaratatsu baten azterpena egiterakoan, zarataren eragina konprobatu ahal izan dugu. Haren efektua nabarmena da berriz igorlearen eta hartzailaren IQ konstelazioak konparatzerako orduan. Hala ere, iragazketa egokiaren bitartez zarataren eragina modu aipagarri batean desagertza lortu dugu, mezuaren berreskurapena lortuz transmisio-kanal ideaala ez izan arren. Analisi honek aplikazioaren limitetaz ohartzea ahalegindu digu, telekomunikazioen zenbait erronka mahai gainean jarri.

Oro har, bi praktika hauek QAM modulazioaren inguruako oinarri teorikoa bermatzeko lagunten digun ariketa interesgarria da. Horretaz gain, gure ezagutza ingurune errealista batean praktikan jartzeko oso baliagarria da, gaur egungo sistema dигaletan garrantzia bai.

4 Lanaren banaketa

- Andoni Vázquez Arza: Teoriaren azalpena, Zarata gabeko transmisioa, Ondorioak, Erreferentziak.
- Beñat Arberas Larrínaga: Scilab-eko kodea idatzi, Trasmisio-kanal zaratatsuaren praktika atala.
- Bien artean: Grafikoen eraikuntza, Informazioa bilatzea, Planteamendua.

Erreferentziak

- [1] J.Jugo, I. Arredondo *Seinale eta Sistemak: 4. Praktika, Seinale baten transmisioa QAM modulazioa erabiliz.*
- [2] I. Hernaez Rioja (2023) *Tema 3: Modulacion QAM. Procesado de senal en comunicaciones*
- [3] File:Circular 16QAM.png. (2024, March 17). Wikimedia Commons. Retrieved December 24, 2025, from https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Circular_16QAM.png&oldid=861213102.
- [4] File:256qam.svg. (2023, May 24). Wikimedia Commons. Retrieved December 24, 2025, from <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:256qam.svg&oldid=766563557>
- [5] File:Upsampling Example.svg. (2020, September 15). Wikimedia Commons. Retrieved December 24, 2025, from https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Upsampling_Example.svg&oldid=460072579
- [6] File:Raised-cosine-filter.png. (2020, September 5). Wikimedia Commons. Retrieved January 3, 2026, from <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Raised-cosine-filter.png&oldid=449100429>.
- [7] File:Raised-cosine-impulse.png. (2020, October 20). Wikimedia Commons. Retrieved January 3, 2026, from <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Raised-cosine-impulse.png&oldid=495344666>.