

Određivanje fazne povezanosti korištenjem analitičkog signala (wPLI)

Kušan, Matija

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:424628>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET
Diplomski studij elektrotehnike

Diplomski rad

**Određivanje fazne povezanosti korištenjem
analitičkog signala (wPLI)**

Rijeka, rujan 2022.

Matija Kušan
0069081752

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET
Diplomski studij elektrotehnike

Diplomski rad

**Određivanje fazne povezanosti korištenjem
analitičkog signala (wPLI)**

Mentor: prof. dr. sc. Saša Vlahinić

Rijeka, rujan 2022.

Matija Kušan
0069081752

Rijeka, 16. ožujka 2022.

Zavod: **Zavod za automatiku i elektroniku**
Predmet: **Automatizirana instrumentacija**
Grana: **2.03.03 elektronika**

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

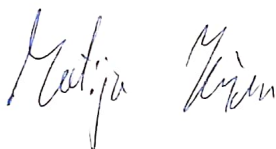
Pristupnik: **Matija Kušan (0069081752)**
Studij: **Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike**
Modul: **Automatika**

Zadatak: **Određivanje fazne povezanosti korištenjem analitičkog signala (wPLI) /
Determination of phase connectivity of EEG signals using analytical signal
(wPLI)**

Opis zadatka:

Opisati karakteristične frekvencijske pojaseve EEG signala. Definirati analitički signal i analizirati svojstva analitičkog signala. Odrediti analitički signal za pojasno propusno filtrirane EEG signale u frekvencijskom području od 8 do 12 Hz (alfa) i od 4 do 8 Hz (delta). Implementirati algoritma za procjenu fazne povezanosti (wPLI) i analizirati povezanost među elektrodama. Odrediti histograme fazne povezanosti za sve parove elektroda te odrediti srednju vrijednost i standardnu devijaciju distribucije. Svrstati parove elektroda u tri kategorije: volume conduction, povezane i nepovezane elektrode. Odrediti granice kategorija bazirane na srednjoj vrijednosti i standardnoj devijaciji. Usporediti mogućnost razvrstavanja elektroda u kategorije na temelju indeksa wPLI.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.



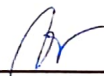
Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:



Prof. dr. sc. Saša Vlahinić

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:



Prof. dr. sc. Viktor Sučić

Izjava o samostalnoj izradi rada

Izjavljujem da sam samostalno izradio ovaj rad koristeći znanja stečena tijekom studiranja na Tehničkom fakultetu uz korištenje navedene literature.

Rijeka, rujan 2022.



Matija Kušan

Zahvala

Zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Saši Vlahiniću na podršci tijekom pisanja ovoga rada i korisnim raspravama i savjetima. Zahvaljujem svojim bližnjima na podršci tijekom studiranja i onima koji su bili tu za mene kroz zadnjih par godina. Na kraju zahvaljujem Bruni na pružanju motivacije i razumijevanju.

Sadržaj

1	Uvod	1
2	Karakteristični frekvencijski pojasevi EEG signala	3
2.1	Delta valovi	4
2.2	Theta valovi	4
2.3	Alpha valovi	5
2.4	Beta valovi	5
2.5	Gamma valovi	5
3	Analitički signal	6
3.1	Primjena Hilbertove transformacije u MATLAB-u	8
4	Weighted phase lag index	9
5	Kružna statistika	10
5.1	Srednja vrijednost	11
5.2	Rezultantna dužina vektora R (PLV)	11
5.3	Standardna devijacija	12
5.4	Kurtosis	13

Sadržaj

6	Rezultati	14
6.1	Analiza pomoću wPLI i PLV indeksa	16
6.1.1	wPLI	16
6.1.2	PLV	20
6.2	Analiza pomoću polarnih histograma	24
6.2.1	Metoda grupacije polarnih histograma	24
6.2.2	Grupa A	27
6.2.3	Grupa B	38
6.2.4	Grupa C	49
6.3	Usporedba svih rezultata	55
7	Zaključak	60
	Bibliografija	61
	Popis slika	62
	Popis tablica	64
	Pojmovnik	64
	Sažetak	65
A	Naslov priloga	66
A.1	Grupa C - Tablice	67

Poglavlje 1

Uvod

EEG, odnosno elektroencefalografija je elektrofiziološka metoda za praćenje električne aktivnosti na lubanji, za koju je dokazano da predstavlja makroskopsku aktivnost na površini mozga. Neinvazivna je, te se izvodi postavljanjem određenog broja elektroda raspoređenih po vrhu glave.

Podaci korišteni u ovom radu dobiveni su mjerenjem u stanju mirovanja. Oscilatorne aktivnosti mjerenih signala u raznim regijama mozga mogu dovest do fazne sinkronizacije što ukazuje na funkcionalnu povezanost između tih regija. Funkcionalna povezanost predstavlja količinu informacija koja teče između određenih regija mozga. Velika količina podataka je dobivena iz mjerenja svake elektrode. Da bi se omogućila analiza faznih odnosa između regija mozga potrebno je primijeniti jednu od brojnih metoda za interpretaciju realnih signala koji su dobiveni mjerenjem. Za svrhe ovog rada koristila se Hilbertova transformacija te su tako dobiveni potrebni analitički signali. Naime, zbog velike količine podataka potrebno je prije Hilbertove transformacije primijeniti uski pojasno propusni filter koji je nam omogućiti analizu dobivenih mjerenja u alfa (8-12 Hz) i delta (0.5-3 Hz) frekvencijskom pojasu.

Analiza faznih razlika između elektroda koje mjere određene regije mozga izvest će se primarno pomoću wPLI (engl. weighted phase lag index) indeksa [1, 2]. On predstavlja iznimno robusnu metodu za određivanje fazne povezanosti EEG podataka. Za usporedbu korištene su razne funkcije iz kružne statistike i PLV (engl. phase lag value) indeks. PLV zapravo predstavlja rezultatnu dužinu vektora iz kružne statistike (R).

Poglavlje 1. Uvod

Fazne razlike parova elektroda, kojih je sveukupno 16, grupirane su za svrhe ovoga rada u tri grupe: razlika faza je usko grupirana oko 0 ili π , razlika faza je uniformno raspoređena i razlika faza je grupirana oko kuta koji nije 0 ili π . Sve navedene metode za analizu bit će primijenjene na te grupe s ciljem pronalaska definiranih granica između grupa.

Rad se može podijeliti na dvije cjeline. Prva je teoretska koja pokriva prva četiri poglavlja. Prvo poglavlje opisuje razne frekvencijske pojaseve koji se nalaze u EEG signalu i zašto ih je potrebno odvojiti. Drugo poglavlje prolazi kroz opis analitičkog signala i razlog korištenja Hilbertove transformacije. Zatim sljedeće poglavlje opisuje wPLI metodu te na kraju teoretskog dijela opisani su razni parametri kružne statistike i razlozi za njihovo korištenje. Druga cjelina rada nudi razne primjere koji potvrđuju već dobro poznate činjenice uz razne pretpostavke vezane za nedostatke wPLI metode. Ova cjelina podijeljena je na tri dijela. Prvi dio nudi analizu usporedbe wPLI i PLV indeksa za sve parove elektroda. Kao što su to na primjer povezanost za svaki slučaj i navodi opće poznate mane PLV indeksa. Drugi dio predstavlja najveći udio rada i fokusira se na analizu proizvoljnih grupa koje predstavljaju ekstremne slučajeve u kojima se očekivala neka greška zbog nedostataka wPLI metode. Za kraj uspoređeni su rezultati prvog i drugog dijela s parametrima kružne statistike u nadi pronalaska poveznice između wPLI indeksa i kružnih statističkih parametara.

Poglavlje 2

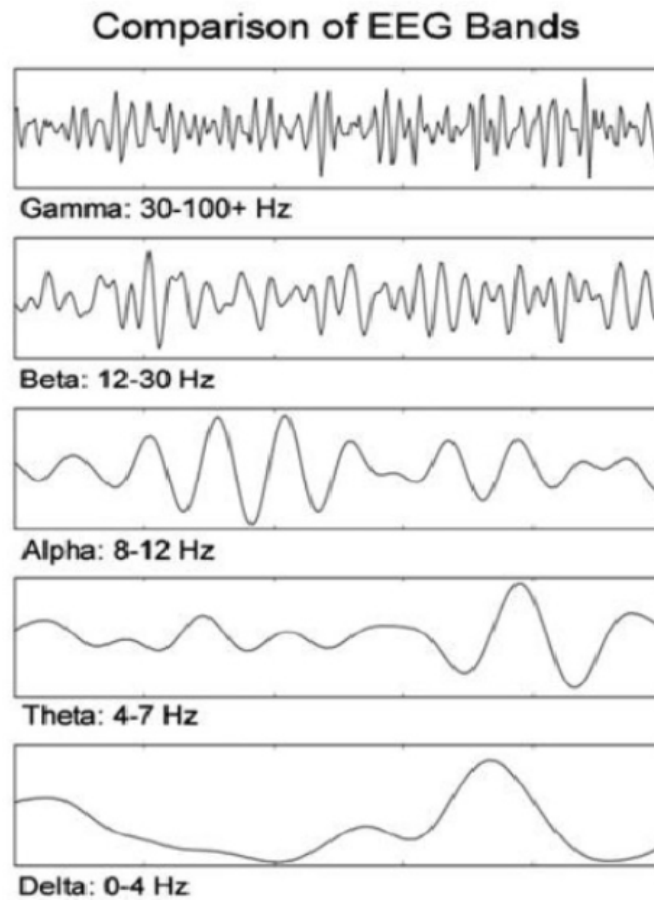
Karakteristični frekvencijski pojasevi EEG signala

EEG je medicinska metoda korištena za snimanje električne aktivnosti ljudske moždane kore kod prisutnosti aktivacijskog potencijala. Vrlo je bitna kod razumijevanja raznih funkcija kao što su na primjer: pozornost, budnost i mentalna oštrina uz mnoge ostale. Koristi se i kod dijagnoze epilepsije te raznih drugih moždanih traumi. Smatra se jednim od najnižih bioloških signala zbog njene amplitude od samo (0.5-100 μV), što otežava snimanje signala. [5]

EEG signal predstavlja agregaciju višestrukih akcijskih potencijala pojedinačnih neurona, akumuliranih u jednom električnom valu i raspoređenih u frekvencijske pojaseve. Razlikujemo pet tipova frekvencijskih pojaseva koji se pojavljuju u EEG podacima. Od najviše frekvencije do najniže to su: gamma (γ), beta (β), alpha (α), theta (θ) i delta (δ). Oni su prikazani na slici 2.1.

Za analizu podataka u ovom radu odabrani su alpha (α) i delta (δ) pojasevi. U MATLAB-u korištena je funkcija iz EEGLab toolbox-a za primjenu pojasno propusnog filtra:

```
EEG = pop_eegfiltnew(EEG, 'locutoff', 8, 'hicutoff', 12);  
EEG = pop_eegfiltnew(EEG, 'locutoff', 0.5, 'hicutoff', 3);
```



Slika 2.1 Frekvencijski pojasevi EEG signala[4]

2.1 Delta valovi

Delta (δ) valovi se nalaze u frekvencijskom pojasu od (0.5 - 4 Hz) što ih čini najsporijim valovima te su najizraženiji kod dubokog i besvjesnog sna.

2.2 Theta valovi

Theta signali imaju frekvenciju od (4 - 8 Hz). Često se uočava kod mlađe djece. Kod starije djece i odraslih može se pak pojaviti povećana aktivnost kod određenih perioda sna i fokusa.

2.3 Alpha valovi

Dok se alpha (α) valovi nalaze u pojasu od (8 - 14 Hz) s amplitudama od (30 - 50 μ V). Pošto je ovaj signal prvi kojeg je u EEG aktivnosti snimio Hans Berger, nazvao ga je "alfa signal". Jakost ovog signala raste zatvaranjem očiju i opuštanjem, a pada otvaranjem očiju i mentalnim naporom.

Alpha (α) pojas je odabran zbog očekivanog dobrog prikaza razlike između podataka mirovanja kod zatvorenih i otvorenih očiju gdje se očekuje veća aktivnost u mozgu kod zatvorenih očiju.

2.4 Beta valovi

Beta signali imaju frekvencijski raspon od (12 - 30 Hz). Uglavnom je vidljivo na obje strane simetrički raspoređeno, te je najevidentnije frontalno. Beta aktivnost ukazuje da osoba ima otvorene oči te je mentalno aktivna, i kada je motorički aktivna, na primjer kada pokreće udove. Kod niske amplitudne beta aktivnosti sa širokim pojasem frekvencija ukazuje na aktivnu koncentraciju i anksiozno razmišljanje.

2.5 Gamma valovi

Gamma (γ) valovi se nalaze u frekvencijskom pojasu iznad 30 Hz, te daju snažan odziv na vizualne podražaje. Mogu biti korisni pri dijagnozi epilepsije i Alzheimerove bolesti.

Poglavlje 3

Analitički signal

Analitički signal dobiven je iz realnog signala primjenom Hilbertove transformacije. Prije moguće primjene Hilbertove transformacije bilo je potrebno kao što je navedeno u prijašnjem dijelu primijeniti pojasno propusni filter [6].

Analitički signal se može zapisati u obliku:

$$\tilde{x}(t) = \frac{1}{\pi} PV \int \frac{x(t')}{t - t'} dt' \quad (3.1)$$

gdje je PV Cauchyjeva glavna vrijednost (engl. $PV = \text{principal value}$). Faza analitičkog signala izražena je kao:

$$\phi(t) = \arctan \frac{\tilde{x}(t')}{t - t'} \quad (3.2)$$

Dakle, pomoću analitičkog signala određena je faza signala, a analitički signal dobiven je s Hilbertovom transformacijom realnog signala. Analitički signal se može izraziti i u kompleksnoj domeni s polarnim koordinatama:

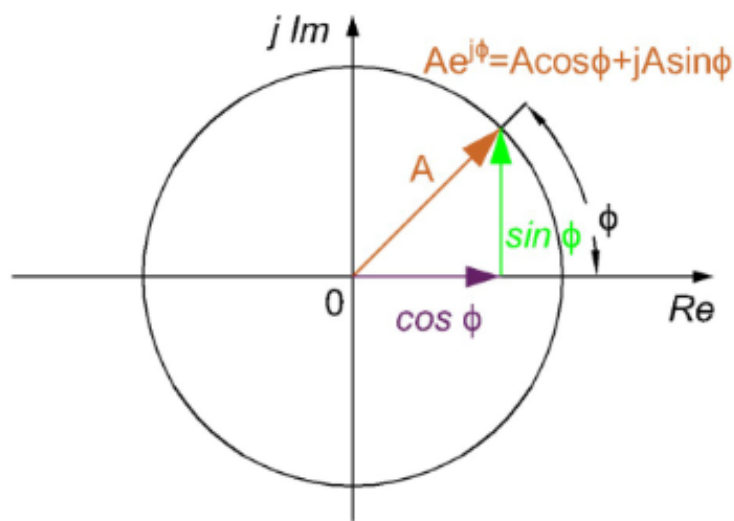
$$H(t) = A(t)e^{i\phi(t)} \quad (3.3)$$

te se realni signal može zapisati kao realna komponenta analitičkog signala:

$$x(t) = R(H(t)) \quad (3.4)$$

Poglavlje 3. Analitički signal

Hilbertova transformacija je omogućila analizu realnih EEG signala dobivenih mjerenjem, tako da je iz realnog signala stvorila imaginarni dio pomoću formule 3.2, tako je dobiven analitički signal sa svojim realnim i imaginarnim dijelom. Primjer analitičkog signala prikazan je na slici 3.1. Taj analitički signal se zatim može izraziti u polarnom sustavu u obliku vektora 3.3 što nam omogućava korištenje indeksa za analizu realnog signala, specifično u ovom radu omogućava korištenje wPLI i PLV indeksa.



Slika 3.1 Primjer analitičkog signala[3]

Hilbertovu transformaciju je moguće koristiti na bilo kojem signalu bez obzira na frekvencijski spektar, ali svaka frekvencijska komponenta signala ima svoju vlastitu fazu, gdje Hilbertova transformacija vraća samo jedan fazni kut. Iz toga se da zaključiti da je Hilbertova transformacija osjetljiva na više frekvencijske komponente u slučaju analize nižih frekvencijskih pojaseva. Iz tog razloga preporučuje se, kao što je i prije navedeno, primijeniti pojasno propusni filter koji ne samo da uklanja više komponente koje imaju veći utjecaj nego i niže frekvencijske komponente koje mogu utjecati na rezultate. U okviru ovoga rada obradit će se samo alpha (α) i delta (δ) frekvencijski pojasevi.

3.1 Primjena Hilbertove transformacije u MATLAB-u

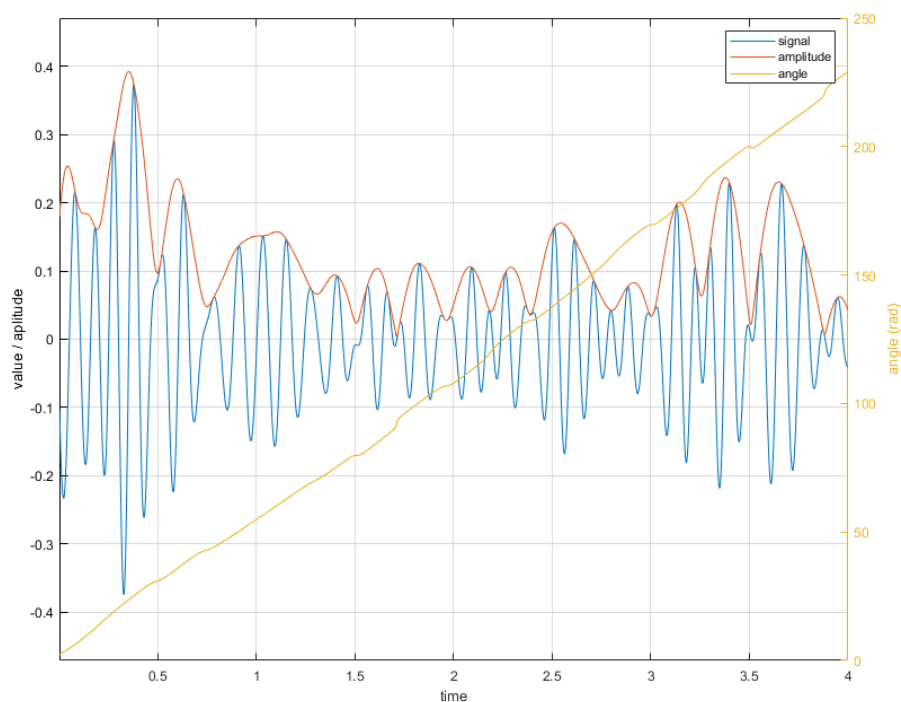
Primjena Hilbertove transformacije u sklopu ovoga rada izvodi se u programskom paketu MATLAB. Analizu podataka u MATLAB-u omogućuje korištenje EEGlab toolbox-a. Prvo je bilo potrebno stvoriti strukturu s podacima mjerenja, što je izvedeno pomoću funkcije:

```
EEG.data=EEG.data(1:16,:);
```

Time je stvorena struktura koja sadrži 16 kanalni EEG i podatke o mjerenju. Sample rate koji se koristio iznosi 512Hz . Podaci su podijeljeni na preko 150000 uzoraka po epohi. Da bi se dobili kompleksni podaci u obliku faznih vektora za analizu, potrebno je iskoristiti funkciju:

```
complex_data=hilbert(EEG.data');
```

Primjer analitičkog signala na kojega je primijenjena Hilbertova transformacije prikazan je na slici 3.2.



Slika 3.2 Primjer analitičkog signala uz dobivenu fazu pomoću Hilbertove transformacije.

Poglavlje 4

Weighted phase lag index

Kompleksni križni spektar koeficijenta grupiranja za dva stvarna signala $x(t)$ i $y(t)$ se dobiva pomoću Fourierove transformacije u $X(f)$ i $Y(f)$. Zatim se X i Y koriste za izračun križnog spektra $C(f) = X(f)Y^*(f)$ gdje je Y^* kompleksno konjugirana vrijednost Y . Ako se fokusiramo na određenu frekvenciju f^* možemo uzet da je kompleksni nedijagonalni C zapravo Z .

PLI je onda definiran kao apsolutna vrijednost od sign za imaginarni dio Z , \mathcal{J} [1]:

$$PLI \equiv |E\{sgn(\mathcal{J}(Z))\}| \quad (4.1)$$

U usporedbi s PLI, wPLI ponderira križni spektar prema magnitudi imaginarne komponente. Time se osiguralo limitiranje utjecaj križnog spektra elementa oko realne osi čiji utjecaj može promijeniti "ispravni" predznak pri malim šumovima. Prema Vinck-u taj izraz glasi [2]:

$$wPLI \equiv \frac{|E\{\mathcal{J}(Z)\}|}{E\{\mathcal{J}(Z)\}} = \frac{|E\{|\mathcal{J}(Z)|sgn(\mathcal{J}(Z))\}|}{E\{|\mathcal{J}(Z)|\}} \quad (4.2)$$

Indeks je baziran isključivo na imaginarnoj komponenti križnog spektra i time osigurava robusnost od šumova jer će nekorelirani izvori šuma povećavati snagu signala. Pokazano je da wPLI ima bolje rezultate od PLI, koherencije te imaginarne koherencije (IC) s realnim lokalnim poljem potencijala (LPF) data [1].

Poglavlje 5

Kružna statistika

Kružna statistika je grana statistike koja je posvećena razvoju statističkih tehnika kod podataka na kutnoj skali. Nema točno određene nule, a visoke i niske vrijednosti su proizvoljne. Što ga čini fundamentalno različitim od linearne skale. [7]

Korištena je u raznim područja znanosti (npr. fizika, geologija, neurologija, zoologija, itd.) Primjer kružne statistike se može primijeniti na smjer puhanja vjetra, mjeren stupnjevima. Vjetar koji puše pod kutem od 359° puše u istom smjeru kao i vjetar koji ima smjer puhanja od 0° . Naime, kružnu statistiku moguće je primijeniti i na skup podatke koji inače nisu mjereni u stupnjevima poput vremena u danu, mjesečeve mijene ili dani u godini.

Podaci koji su obrađeni u ovome radu su bazirani na faznim razlika što ih čini inherentno prikladnim za primjenu kružne statistike, pošto bi linearne statističke vrijednosti krivo interpretirale skup podataka ili navele na krive zaključke. Pošto MATLAB ne dolazi s potrebnim funkcija za kružnu statistiku bilo je nužno koristiti CircStat toolbox [7] za MATLAB. U sljedećem dijelu bit će izvedeni osnovni statistički parametri za kružnu statistiku koji su korišteni u ovom radu, pošto se znatno razlikuju od linearnih statističkih parametara. Te dodaju mogućnost ispitivanja raširenosti, simetrije i usmjerenosti.

5.1 Srednja vrijednost

Linearna srednja vrijednost (engl. mean) ne vrijedi u kružnom okruženju s kutnim podacima, uzme li se na primjer srednja vrijednost kuteva 10° , 30° i 350° , njihova linearna srednja vrijednost iznositi će 130° dok zapravo svi pokazuju prema 0° [7].

Zbog toga uvodi se kružna srednja vrijednost koja se računa tako da se prvo svi smjerovi pretvore u jedinične vektore na dvodimenzionalnoj ravnini:

$$r_i = \begin{pmatrix} \cos\alpha_i \\ \sin\alpha_i \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

gdje α predstavlja kutne vrijednosti iz seta uzoraka, koji će u slučaju ovog rada biti isključivo fazne razlike između elektroda. Naknadno, nakon vektorizacije kutnih vrijednosti, srednja vrijednost vektora r_i izračuna se po izrazu:

$$\bar{r} = \frac{1}{N} \sum_i r_i \quad (5.2)$$

Time je dobiven rezultantni vektor srednje vrijednosti \bar{r} , gdje njegov kut $\bar{\alpha}$ predstavlja iznos kružne srednje vrijednosti kutova α . Pošto će se u ovome radu nadalje koristiti samo kružna srednja vrijednost bit će oslovljena samo kao srednja vrijednost.

5.2 Rezultantna dužina vektora R (PLV)

Rezultantna dužina vektora r_i iz prijašnjeg dijela je veoma značajan parametar u kružnoj statistici. Koristi se kod izračuna raširenosti podataka te se može koristiti i kod testiranja hipoteza usmjerenosti podataka. Iznos rezultantnog vektora se može dobiti iz:

$$R = \|\bar{r}\| \quad (5.3)$$

Varijable R može poprimiti bilo koju vrijednost u intervalu od $[0, 1]$, gdje veći iznos ukazuje na veću usmjerenost skupa podataka. Moguće je izračunati i varijancu iz rezultantne dužine vektora R, ali se taj parametar nije koristio u ovome radu.

Rezultantna dužina vektora R je istovremeno i PLV(engl. phase locking value) indeks. Jedna je od prvih efikasnih metoda koje su korištene u neurologiji za istu svrhu kao i wPLI, za mjerenje fazne sinkronizacije ili povezanosti [8]. U suštini isto se računa kao i rezultanta dužina vektora R po formulama 5.2 i 5.3. Zapisuje se kao:

$$PLV = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=1}^N e^{(j\theta_n)} \right| \quad (5.4)$$

gdje θ predstavlja faznu razliku. Isto kao i rezultantna dužina vektora R , PLV može poprimiti vrijednosti iz intervala $[0, 1]$, gdje veća vrijednost indicira na veću povezanost sinkronizaciju. U kasnijim dijelovima rada obrazložit će se mane ovoga indeksa nasprema wPLI indeksu.

5.3 Standardna devijacija

Moguće je koristiti dvije mjere za kružnu standardnu devijaciju kao alternative za linearnu standardnu devijaciju. Prva se definira kao:

$$s = \sqrt{2(1 - R)} \quad (5.5)$$

Ova mjera može poprimiti iznose u intervalu od $[0, 2\pi]$. Osim ovog načina moguće je koristiti i izraz:

$$s_0 = \sqrt{-2\ln R} \quad (5.6)$$

gdje vrijednosti mogu poprimiti vrijednosti od $[0, \infty]$. U ovom radu koristila je prva definicija kružne standardne devijacije.

5.4 Kurtosis

Kao zadnji kružni statistički parametar korišten u ovom radu služi kao mjera vršnosti podataka, te se računa po sljedećem izrazu:

$$k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \cos 2(\alpha_i - \bar{\alpha}) \quad (5.7)$$

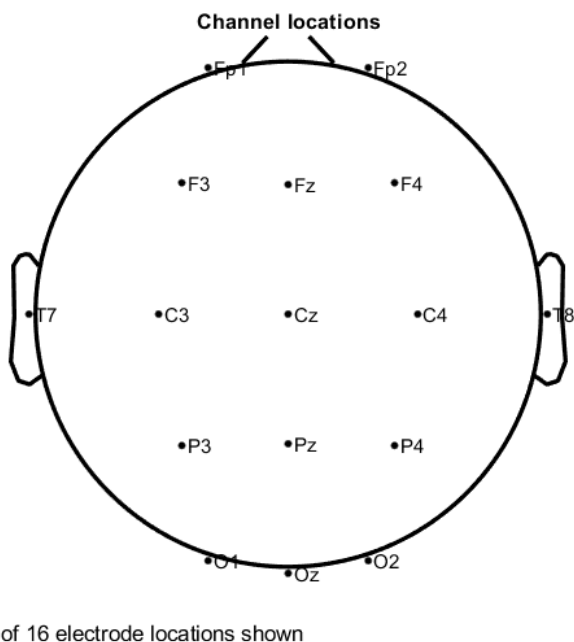
Poglavlje 6

Rezultati

Detaljno su se obradile snimke otvorenih i zatvorenih oči tijekom mirovanja [3] izmjerene pomoću 16 elektroda. Njihovi nazivi su prikazana u tablici 6.1 te njihove lokacije su prikazane na slici 6.1. Predstavljani su rezultati implementacije algoritama za procjenu fazne povezanosti wPLI (4.2) i PLV (5.4) u frekvencijskim područjima od 8 do 12Hz za alfa α područje te 0.5 do 4Hz za delta δ područje.

Tablica 6.1 Lista elektrodi korištenih za mjerenje EEG signala.

Ime elektrode	Broj elektrode
Fp1	1
Fp2	2
F3	3
Fz	4
F4	5
T7	6
C3	7
Cz	8
C4	9
T8	10
P3	11
Pz	12
P4	13
O1	14
Oz	15
O2	16



Slika 6.1 Lokacije elektrodi korištenih za mjerenje EEG signala.

Za svrhe analize faznih razlika između parova elektroda, izvršila se grupacija parova u tri grupe. Prva grupa će se zvati grupa A, sadržavat će faze razlike parova elektroda koje su usko grupirane oko 0 ili π . Poznato je da na temelju konvencionalne pretpostavke da za tipične EEG i MEG frekvencije od interesa vrijedi kvazistacionarni opis Maxwellovih jednadžbi, što implicira da električna aktivnost jednog izvora utječe na prostorno odvojene senzore sa zanemarivim vremenskim kašnjenjem od 0 ili π [2]. Grupa A će time omogućiti analizu parova koji mogu biti ili rezultat volume conduction-a ili prikaz prave fazne sinkronizacije.

Grupa B će prikazivati parove koji na prvi pogled prikazuju uniformnu distribuciju te će se uz dodatne analize uspostaviti da li su zaista uniformne. Te na posljetku grupa C bit će ispunjena ostalim parovima koji ne spadaju u prve dvije grupe.

6.1 Analiza pomoću wPLI i PLV indeksa

Snimke EEG signala izvedene su u stanju mirovanja. Pokazano je da povezanost kod odraslih individua u stanju mirovanja najviša u alfa (α) frekvencijskom području kada se primjenjuje wPLI metoda za analizu faznih razlika i pronalaska pravih faznih sinkronizacija između pojedinih regija mozga [1]. Također u istraživanjima povezanih s tranzicijom između stanja besvijesti i svijesti uočene su topološke promjene i promjene u povezanosti kod EEG signala u delta (δ) i alfa (α) frekvencijskim područjima [9].

Poznato je kako je aktivnost u delta (δ) frekvencijskom području tipična za stanje besvijesti. Te kako aktivnost migrira iz parijetalnog u frontalnu regiju mozga tijekom besvijesti. Isti događaj se pojavljuje i kod alfa (α) frekvencijskog područja, ali postoji mogućnost da njihova veza ipak nije kauzalno povezana sa stanjem besvijesti [9].

U sljedećim dijelovima bit će uspoređeni rezultati metoda, wPLI i PLV, korištenih za analizu EEG signala.

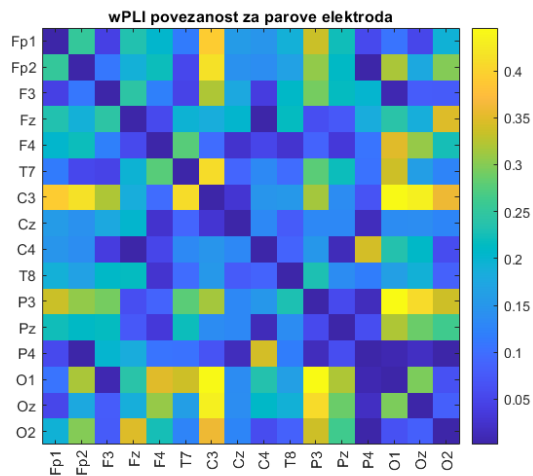
6.1.1 wPLI

wPLI indeks je izračunat posebno za sva četiri slučaja pomoću izraza 4.2. Funkcija za njen izračun se primijenila u programskom paketu MATLAB u obliku:

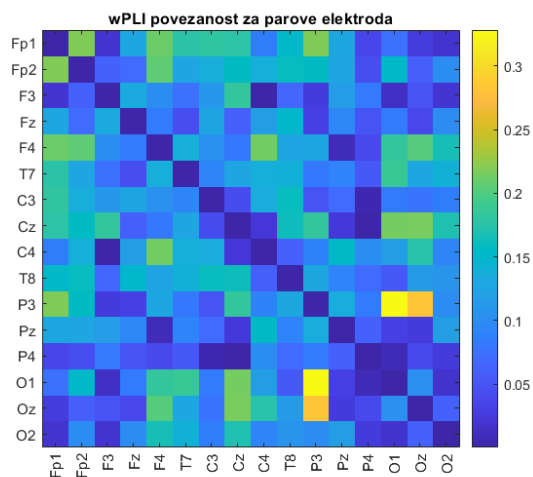
```
Sab = hilbert_el_a.*conj(hilbert_el_b);  
ImSab = imag(Sab);  
wPLI = abs(mean(abs(ImSab).*sign(ImSab))/mean(abs(ImSab))));
```

gdje varijable *hilbert_el_a* i *hilbert_el_b* predstavljaju podatke mjerenja dviju elektroda nakon primjene odgovarajućeg pojasno propusnog filtra za određeni frekvencijski pojas, nad kojima je zatim izvršena Hilbertova transformacija. Četiri područja od interesa se dijele na skup podataka mjerenja kod zatvorenih oči filtriranih za alfa (α) i delta (δ) frekvencijsko područje. Isto tako i kod podataka za slučaj kod otvorenih oči.

Poglavlje 6. Rezultati



(a) Alfa (α) područje



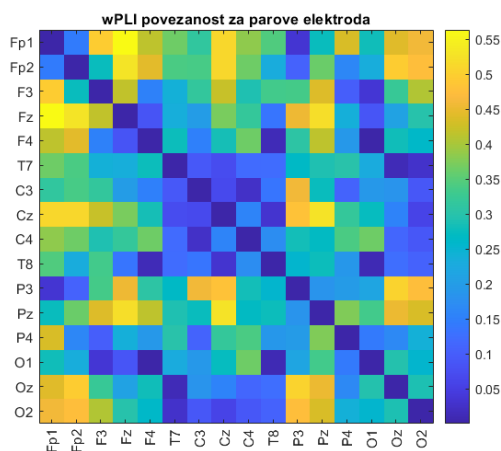
(b) Delta (δ) područje

Slika 6.2 Iznos wPLI indeksa kod otvorenih očii.

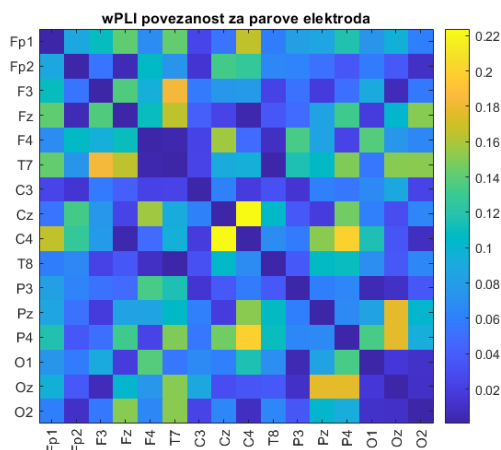
Sa slike 6.2 mogu se jasno vidjeti razlike između aktivnosti pojedinih dijelova mozga u alfa (α) i delta (δ) frekvencijskom području. Što potvrđuje već prije navedenu pretpostavku o tome da je veća aktivnost kod stanju mirovanja u alfa (α) frekvencijskom području nego u delta (δ) frekvencijskom području.

Poglavlje 6. Rezultati

Iz slike 6.2a, da se uočiti da postoji visoka povezanost elektroda na područjima partijalne i zatiljne regije. Dok sa slike 6.2b se opaža niska povezanost svih regija mozga osim dva para elektroda s visokim indeksom wPLI, a to su parovi Oz-P3 i O1-P3. Iz kojih se da pretpostaviti moguća povezanost između zatiljne i partijalne regije mozga u stanju mirovanja kod otvorenih oči. Kasnije kod analize polarnih histograma se može dodatno provjeriti ova poveznica i vidjeti da li ovo pravi slučaj snažne fazne sinkronizacije ili samo produkt volume conduction-a ili je njihova povezanost lažno uvećana zbog pristranosti wPLI indeksa.



(a) Alfa (α) područje



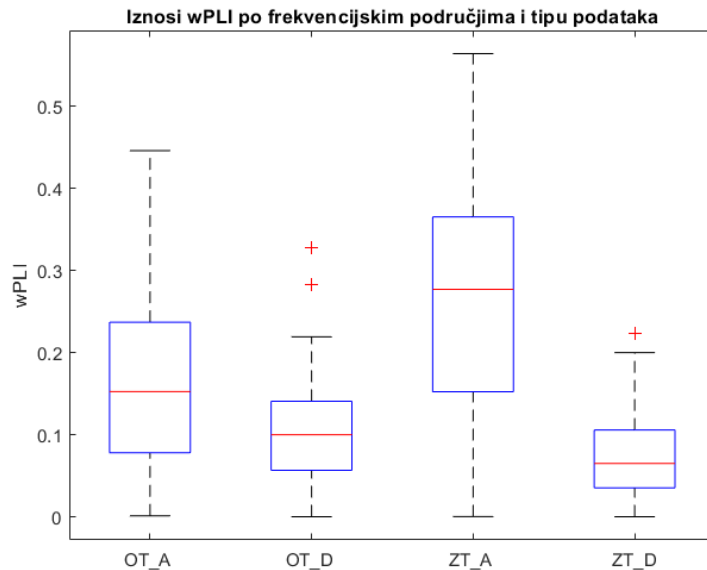
(b) Delta (δ) područje

Slika 6.3 Iznos wPLI indeksa kod zatvorenih oči.

Poglavlje 6. Rezultati

Sljedećih par slika 6.3 predstavlja iznos wPLI indeksa kod zatvorenih oči. Ovdje se očito da vidjeti kako su wPLI indeksi puno veći u alfa (α) području kao što se i očekivalo. Naime, zapaža se iz slike 6.3a i znatno povećanje aktivnosti u frontalnoj regiji mozga. Kao parovi koji se ističu po vrlo visokom iznosu wPLI indeksa, za alfa (α) pojas u ovom primjeru su Fz-Fp1 i Fz-Fp2. Oni se nalaze u frontalnoj regiji mozga i iznose 0.5638 te 0.53.

Za slučaj zatvorenih oči u delta (δ) pojasu se iz usporedbe slika 6.2b i 6.3b baš i ne može uočiti ništa značajnije osim da se više ne ističu parovi Oz-P3 i O1-P3 kao u slučaju kod otvorenih oči. Osim što bi se dalo reći da su u ovom slučaju aktivnije centralna i frontalna regija mozga, ali ne značajno.



Slika 6.4 Iznos wPLI po frekvencijskim područjima i tipu podataka.

Možda bolji prikaz odnosa wPLI indeksa između ovih grupa je iznesen na slici 6.4 gdje se jasno vidi razlika. Najveća razlika se pojavljuje između alfa (α) područja kod zatvorenih oči i delta (δ) područja kod zatvorenih oči. Uz to može se i vidjeti iz prikaza kako je delta (δ) područja kod zatvorenih oči manje aktivno nego kod otvorenih oči, suprotno od primjera alfa (α) područja. Dodatno, može se iščitati jasnije stršeća vrijednost u grupi delta (δ) područja kod zatvorenih oči, a to je par C4-Cz koji se nalazi u centralnoj regiji mozga i iznosi 0.2238.

6.1.2 PLV

Zbog dugogodišnje uporabe u praksi i drugim istraživanjima, već su dobro poznate brojne mane PLV indeksa. Jedna od glavnih mana dolazi u obliku volume conduction-a koji znatno narušava rezultate pravih faznih sinkronizacija. Prije je već navedeno kako iz pretpostavke kvazistacionarnosti slijedi da križni spektar, aktivnost koja proizlazi iz volume conduction-a na dva odvojena senzora mjeri kao 0° (u fazi, realna komponenta je maksimalno pozitivna) ili 180° (ortogonalna faza, realna komponenta je maksimalno negativna), što znači da imaju samo realnu komponentu. Simetrična samointerakcija te realne komponente može stvoriti PLV koji je različit od nule i time lažno predstaviti faznu sinkronizaciju između dvije mjerne elektrode. [2]

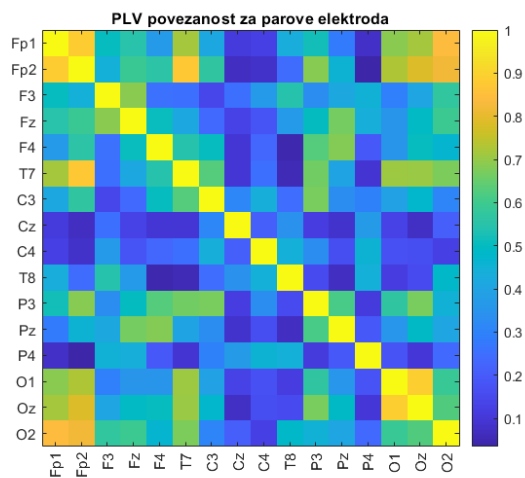
wPLI metoda pak na drugu ruku koristi svojstvo imaginarne komponente da pokušao zaobići problem volume conduction-a. Naime, kada fazna razlika između dvije elektrode iznosi 0° ili 180° , imaginarna komponenta fazne razlike poprimit će vrijednost od 0. Što efikasno uklanja problem realne komponente. Potrebno je istaknuti kako je wPLI kao što je prikazan formulom 4.2 nadogradnja na PLI indeks. PLI indeks isto koristi svojstvo imaginarne osi da pokuša zaobići negativna svojstva koja dolaze s realnom komponentom samo što wPLI indeks predstavlja direktnu nadogradnju na njega dodavanjem težine imaginarne osi. Imaginarna komponenta fazne razlike dvije mjerene elektrode zauzima vrijednost od jedan (maksimalna vrijednost) kod fazne razlike od $\pi/2$. Iz toga proizlazi zaključak da će vrijednosti bliže $\pi/2$ vrijediti više nego fazne razlike u blizini 0 ili π . Jedan od glavnih razloga za dodavanje težine imaginarnoj osi proizlaze iz diskontinuiteta metode zbog pojave malih poremećaja koji izazivaju izmjene faza koje vode i faza koje kasne [2]. Također problem malih poremećaja koji proizlaze iz šuma su više izraženi kod signala manjih magnituda, kao što će se vidjeti u analizi delta (δ) frekvencijskog pojasa.

PLV indeks je izračunat posebno za sva četiri slučaja pomoću izraza 5.4. Funkcija za njen izračun se primijenila u programskom paketu MATLAB u obliku:

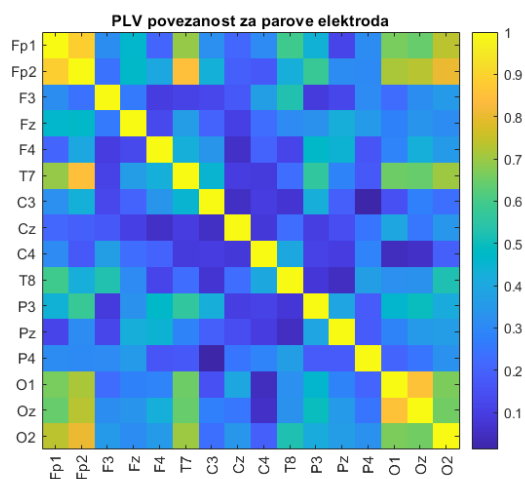
```
delta_pd=phase_angle_el_a-phase_angle_el_b;  
PLV=abs(mean(exp(1i*(delta_pd))));
```

Isto tako rezultatna dužina vektora fazne razlike između elektora iz kružne statistike je istoznačan parametar pa je moguće i koristiti i funkcije iz CircStat toolbox-a za njegov izračun.

Poglavlje 6. Rezultati



(a) Alfa (α) područje



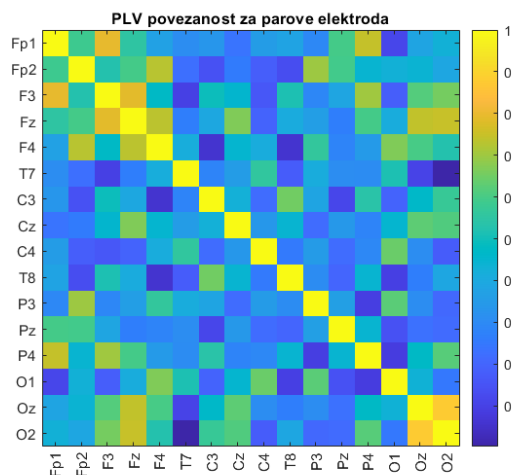
(b) Delta (δ) područje

Slika 6.5 Iznos PLV indeksa kod otvorenih očii.

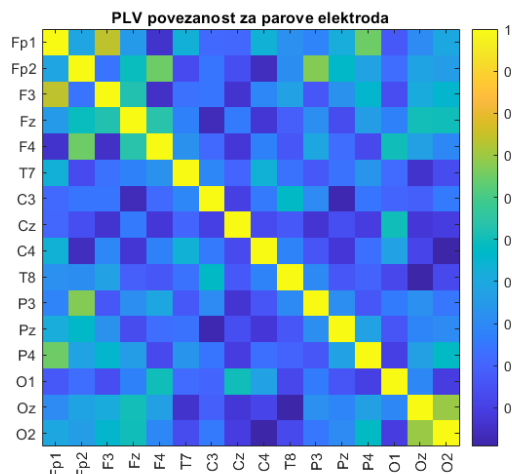
Odmah je moguće uočiti veći interval dobivenih vrijednosti za PLV nego kod wPLI metode, iako obje metode mogu poprimiti vrijednosti u intervalu od $[0, 1]$. Na slici 6.5 odmah se zapaža mana metode kod elektroda koje same sebe mjere, uspješno predstavljaju analogiju zajedničkog izvora izazvanim volume conduction-om koji u dvije elektrode stvara faznu razliku od 0° ili 180° te tako pridodaje maksimalnu vrijednost PLV indeksu.

Poglavlje 6. Rezultati

Usporedbom slika 6.2a i 6.5a uočljiva je manja razlika između povezanih i nepovezanih elektroda. Mogući razlog takvih rezultata proizlazi iz velikog broja faznih razlika elektroda u okolini 0° ili 180° . Zatim na slici 6.5 postoji puno manja razlika između alfa (α) i delta (δ) frekvencijskog područja. Iako se zamjećuje opće manja povezanost u delta (δ) nego u alfa (α) frekvencijskom području.



(a) Alfa (α) područje



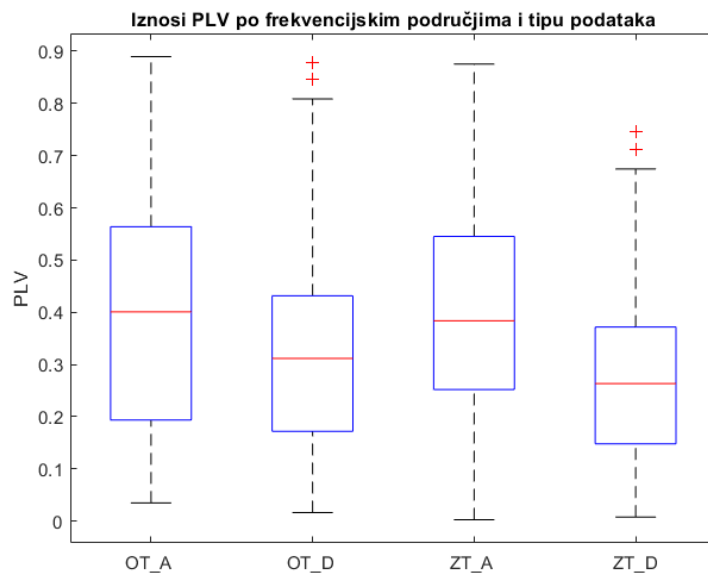
(b) Delta (δ) područje

Slika 6.6 Iznos PLV indeksa kod zatvorenih očii.

Poglavlje 6. Rezultati

U oba frekventijska područja kod otvorenih oči ističe se par elektrodi Oz-O1, dok se kod delta područja najznačajnije ističe par Fp1-Fp2. U kasnijoj analizi polarnih histograma provjerit će se da li ti parovi zaista predstavljaju pravu sinkronizaciju ili ne.

Slika 6.6 opet upućuje na prije donesene pretpostavke. Postoji veća fazna sinkronizacija u alfa (α) frekventijskom području kod zatvorenih oči nego kod otvorenih oči, a u delta (δ) frekventijskom području se ovaj puta da iz slike iščitati veća povezanost kod zatvorenih oči nego kod otvorenih oči. Parovi elektroda od značaja koje se daju uočiti sa slike 6.6b su Fp1-F3 i Oz-O2.



Slika 6.7 Iznos PLV po frekventijskim područjima i tipu podataka.

Iznenadjući rezultati su prikazani na slici 6.7 u odnosu na sliku 6.4. Rezultati primjene wPLI metode u slučaju zatvorenih oči u alfa (α) frekventijskom području ukazuju na puno veću povezanost nego u istom slučaju kod otvorenih oči. Dok kod primjene PLV metode možemo vidjeti kako su iznosi između te dvije grupe sličniji ako ne i veći u slučaju kod otvorenih oči. Jedan od mogućih razloga može proizlaziti iz povećanog broja elektroda s lažnom sinkronizacijom. Isto tako primjećuje se puno manja razlika između alfa (α) i delta (δ) frekventijskom području u odnosu na sliku 6.4 kada se koristila wPLI metoda za analizu podataka.

6.2 Analiza pomoću polarnih histograma

Prijašnje poglavlje pokušalo je interpretirati rezultate korištenja wPLI i PLV indeksa za analizu izmjerenih EEG signala. Te predstaviti već poznate prednosti i nedostatke kod korištenja wPLI metode umjesto PLV metode. Cilj analize pomoću polarnih histograma uz wPLI i PLV indeks u ovom poglavlju bit će propitati zaključke dovedene u prijašnjim dijelovima ovoga rada te ispitati da li postoje konkretne granice između grupa koje će naknadno biti definirane.

Analiza pomoću polarnih histograma se bazira na podjeli svih parova elektroda u tri grupe. Prva grupa sastojat će se od parova elektroda čije se fazne razlike usko grupiraju oko 0 ili π . Nazvat će se grupa A i predstavlja parove elektroda koje su vjerojatno izazvane pojavom volume conduction-a ili parove koji predstavljaju pravi sinkronizam usko grupiran oko realne osi.

Druga grupa nazvat će se grupa B i u njoj će biti uvršteni parovi elektroda čije fazne razlike liče na uniformnu razdiobu. Predstavljaju parove elektroda s najmanjom korelacijom. Bit će ispitana njihova uniformnost te razine wPLI i PLV indeksa uz dodatne parametre iz kružne statistike. Na poslijetku ostatak parova bit će grupirani u grupu C. Grupa C predstavljat će parove elektroda iz kojih se da zaključiti neka razina fazne sinkronizacije između parova elektroda. Zatim će se izvršiti i dodatna analiza te grupe za procjenu robusnosti wPLI indeksa.

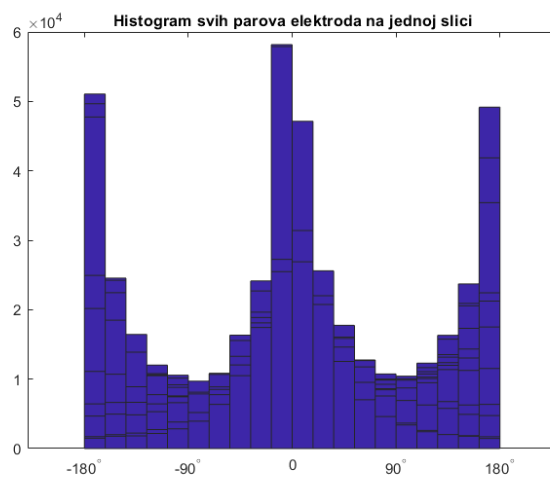
6.2.1 Metoda grupacije polarnih histograma

Predložena analiza zahtjeva prvobitnu podjelu svih parova elektroda u odgovarajuće grupe. Za svrhe ovoga rada odabrani su proizvoljni kriteriji za grupaciju pojedinih parova elektroda. Način na koji su se odredili je pomoću linearnog histograma koji je prikazao iznose svih faznih razlika svakog para elektroda u dvadeset stupaca. Pošto su različiti iznosi u alfa (α) i delta (δ) frekvencijskom pojasu uzeti su različiti kriteriji za oba slučaja.

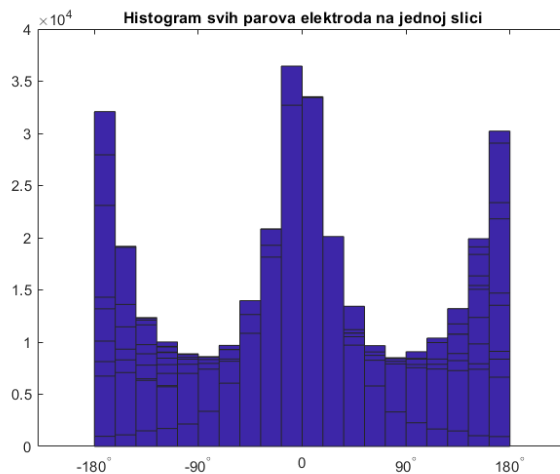
Kod grupacije parova elektroda u slučaju alfa (α) frekvencijskog područja pri zatvorenim i otvorenim očima za određivanje proizvoljnih kriterija koristila se slika 6.8a. Za grupu A uzeto je da ako su prvi, deseti, jedanaesti ili dvadeseti stupac viši od 26000 za određeni par elektroda onda je vrlo vjerojatno da će biti usko grupirani oko 0 ili π .

Poglavlje 6. Rezultati

Slično tako zadan je i proizvoljni kriterij za grupu B. Naime, provjerava da li ijedan stupac prelazi iznad 11500 što bi moglo ukazivati da postoji uska grupacija oko srednje vrijednosti fazne razlike. Bitno je dodatno naglasiti kako sveukupno postoji 240 kombinacija parova elektroda, ali iz rezultata wPLI i PLV metoda može se pretpostaviti da su simetrični te su se iz razloga lakše analize koristili samo 120 parova elektroda.



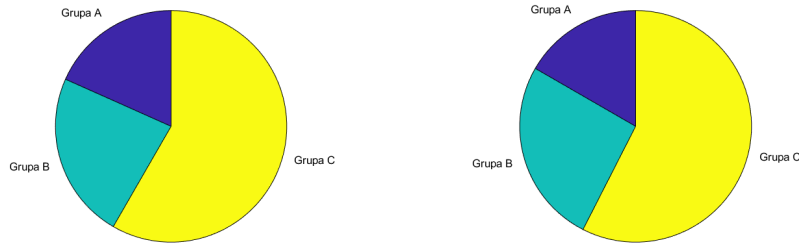
(a) Alfa (α) područje kod otvorenih oči



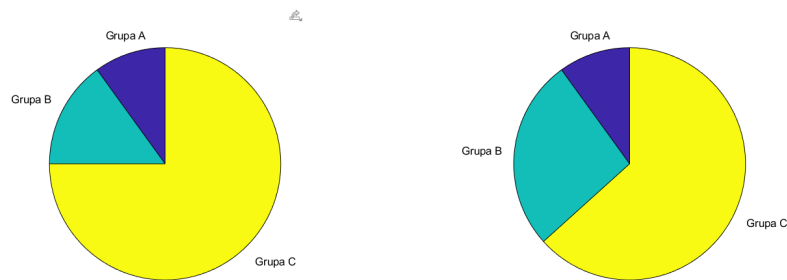
(b) Delta (δ) područje kod zatvorenih oči

Slika 6.8 Histogram svih faznih razlika sviju parova elektroda.

Poglavlje 6. Rezultati



(a) Alfa (α) područje, otvorene oči (b) Delta (δ) područje, otvorene oči



(c) Alfa (α) područje, zatvorene oči (d) Delta (δ) područje, zatvorene oči

Slika 6.9 Dijagram podjele parova elektroda po grupama.

Parovi koji su ostali neregupirani spadaju u treću skupinu koja predstavlja fazne razlike elektroda koje nisu niti slične uniformnoj raspodjeli niti su usko grupirane oko 0 ili π to jest parove čije faze razlike se grupiraju oko nekog kuta koji nije 0 ili π . Postoji mogućnost da u grupi C slučajno dođe do pojave parova elektroda koje bi se mogli interpretirati kao usko grupirane oko 0 ili π ili da izgledaju kao nepovezane elektrode. Dodatne provjere će biti izvršene nad grupom C za pronalaskom udjela takvih grešaka.

U slučaju delta (δ) frekvencijskog područja koristio se identični pristup samo s drugim granicama. Granice proizvoljnog kriterija iščitane su sa slike 6.8b. Za grupu A uzeto je 21000 umjesto 26000, a 15000 ostaje isto. Također isto kao i kod alfa (α) frekvencijskog područja postoji mogućnost grešaka istog tipa pošto je teško odrediti egzaktne granice između tih grupa zbog prirode tipa podataka koji se obrađuju. Slika 6.9 prikazuje grupaciju parova elektroda za svaki slučaj analize.

6.2.2 Grupa A

Grupa A se sastoji od parova elektroda čija fazna razlika se usko grupira oko 0 ili π . Analiza grupe izvest će se pomoću kombinacije wPLI i PLV metoda uz korištenje parametara iz kružne statistike. Što se tiče PLV metode očekivat će se visoke vrijednosti ako su dobro grupirani parovi elektroda. Znamo iz formule 5.4 da što je gušća grupacije faznih razlika oko srednje vrijednosti to će rezultatna dužina vektora biti veća, a time što je rezultanta dužina veća tako je i PLV viši pošto su istoznačna veličina kao što je i prije bilo navedeno.

Za wPLI metodu očekivat će se jako male vrijednosti. Imaginarni komponenta je manja što je srednja vrijednost fazne razlike bliža nuli ili π , pa se može s visokom sigurnošću pretpostaviti da usko grupirane fazne razlike oko 0 ili π garantiraju nisku imaginarnu komponentu. Uz to zbog težinskog faktora oko imaginarne osi to jest oko kuteva $\pi/2$ i $-\pi/2$, dodatno će još više smanjiti iznos wPLI indeksa.

Srednja vrijednost iz kružne statistike očekuje se da bude što bliža 0° ili 180° . Bilo kakva veća odstupanja mogu ukazati na grešku metode grupacije parova elektroda. Standardna devijacija zbog uske grupacije faznih razlika se očekuje da bude približna ili niža od jedan. Ako se pojavi veća standardna devijacija od jedan moguće je da je došlo do greške metode grupacije ili da su fazne razlike malo više raširene oko srednje vrijednosti. Takva raširenost će se prikazati dodatni faktorom iz kružne statistike koji se računa izrazom 5.7 i naziva se Kurtosis. Poprima vrijednosti u intervalu od $[0, 1]$ gdje veći iznos upućuje na manju raširenost.

Grupa A kao što se vidi iz slike 6.9 je prevalentnija u kod otvorenih očiju. Dolazi se do pretpostavke da postoji veći broj faznih sinkronizacija izazvanih utjecajem volume conduction-a u tom slučaju. Rezultati grupacije za grupu A se nalaze u tablicama 6.2, 6.3, 6.4 i 6.5. Grupa A u slučaju otvorenih očiju u alfa (α) frekvencijskom pojasu sadrži 22 parova elektroda. Od kojih su 10 usko grupirani oko nule, a 12 oko π . Nema uočljive razlike između parova koji su grupirani oko nule i onih grupiranih oko π .

Tablica 6.2 Grupa A, Otvorene oči, Alfa (α) frekvencijskom području

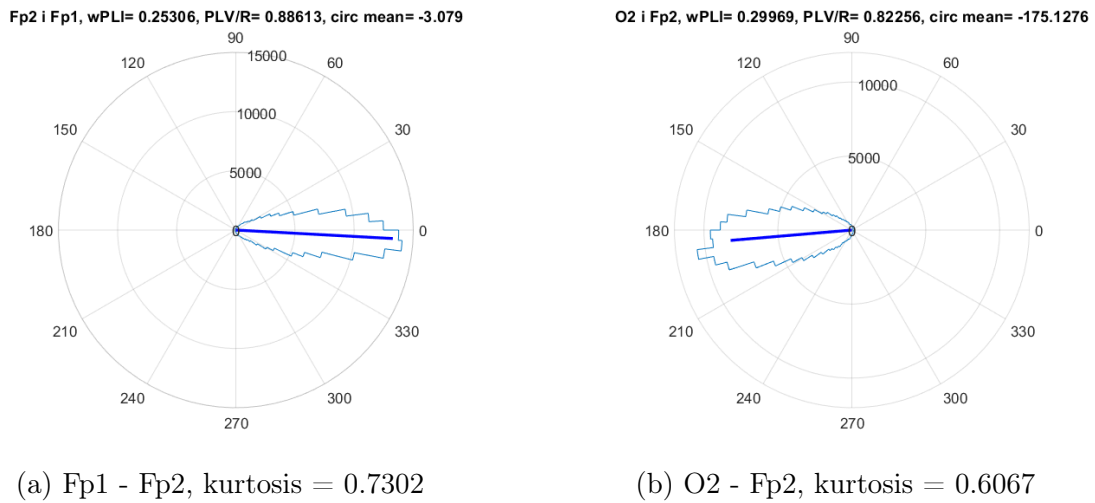
El 1	El 2	wPLI	PLV/R	circ std	circ mean (°)	Kurtosis	Smjer (°)
15	14	0.29598	0.88961	0.46987	-3.26	0.7401	0
2	1	0.25306	0.88613	0.47723	-3.08	0.73019	0
6	2	0.05264	0.87215	0.50567	-179.12	0.70529	180
16	1	0.1927	0.84414	0.55833	-177.58	0.6504	180
16	2	0.29969	0.82256	0.59572	-175.13	0.60666	180
15	2	0.17754	0.78883	0.64988	-177.72	0.56472	180
14	2	0.31884	0.72541	0.74106	-173.27	0.4637	180
6	1	0.11452	0.71593	0.75376	177.73	0.46641	180
15	1	0.05044	0.71456	0.75556	178.05	0.45577	180
14	6	0.33726	0.70636	0.76635	7.28	0.44105	0
15	6	0.16137	0.70515	0.76792	2.97	0.44639	0
4	3	0.24327	0.6887	0.78906	-6.44	0.40729	0
14	1	0.10656	0.68821	0.78967	-178.28	0.41484	180
11	2	0.30579	0.68568	0.79287	171.29	0.40196	180
12	5	0.03417	0.68301	0.79623	179.31	0.38507	180
16	6	0.12618	0.67426	0.80714	3.02	0.40465	0
15	11	0.4079	0.67051	0.81178	11.17	0.38548	0
11	7	0.31488	0.66877	0.81392	8.47	0.38914	0
12	4	0.07336	0.66589	0.81744	178.6	0.37644	180
11	6	0.27855	0.66399	0.81977	-8.24	0.38015	0
11	5	0.08736	0.63034	0.85984	-177.65	0.33001	180
16	15	0.08154	0.62658	0.86419	3.1	0.34236	0
N=22		median=0.1851	median=0.6969			median=0.4279	

Odmah se može uočiti kako wPLI pridodaje paru elektroda sa slike 6.11a vrlo visok iznos iako se nalaze u neposrednoj blizini realne osi. Zbog iznimno uske razdiobe ispada da se većina faznih razlika nalazi u donjoj polovici kružnice što direktno utječe na iznos wPLI indeksa. Ne može se zasigurno reći da li je ovaj par izazvan volume conduction-om, koji je pomaknut zbog šuma ili je zapravo prava veza. Postoji mogućnost da drugi parovi elektroda sa sličnom razdiobom mogu izazvati isto visoki wPLI. Što može znatno povećati mogućnost wPLI indeksa da ne isfiltrira efikasno parove elektroda izazvane volume conduction-om.

Parametar iz kružne statistike pod imenom kurtosis može služiti kao dobar indikator na moguće greške wPLI indeksa u bližoj okolini realne osi. Čime je kurtosis bliži iznosu od jedan, može se doći do pretpostavke da visoki kurtosis uz visoki wPLI može ukazati na volume conduction u blizini realne osi. Osim para elektroda Oz-O1 na slici 6.10 se vide još dva para koji mogu biti izazvani volume conduction-om.

Na drugu ruku na slici 6.11b se može vidjeti kako je i par s najnižim PLV-om u grupi A još uvijek viši od većine ostalih PLV-ova koji su dobiveni za ovaj slučaj. Što je i bilo očekivano iz razloga da PLV indeks nije osjetljiv na fazne razlike u blizini realne osi.

Poglavlje 6. Rezultati



Slika 6.10 Primjer uske grupacije u blizini realne osi s visokim wPLI-om, PLV-om i kurtosis-om za slučaj otvorenih očiju u alfa (α) frekvencijskom području.

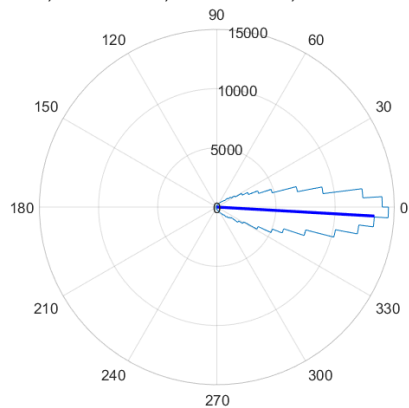
Slika 6.11c efikasno prikazuje željeni odnos wPLI i PLV indeksa u blizini realne osi. Sa simetričnom razdiobom uz malo prošireniji skup faznih razlika u bližoj okolici realne osi, wPLI metoda može uspješno i pouzdano ukloniti parove elektroda čije visoke sinkronizacije mogu proizlaziti iz volume conduction-a. Time se ukloni greška lažnih sinkronizacija, ali također se dolazi do gubljenja podataka u tom području pravih faznih sinkronizacija pošto se ne mogu razlikovati od sinkronizacija izazvanih volume conduction-om.

Simetrija razdiobe podataka faznih razlika u ovoj grupi znatno utječe na iznos kojega će wPLI poprimiti. Tako se na primjeru sa slike 6.10b, koja prikazuje par elektroda čija se razdioba nalazi u blizini realne osi sa srednjim kutem od -175.13° . Može se vidjeti kako je dobiven iznimno visoki wPLI nasprema ostatku parova što je izazvano visokom nesimetrijom, u kontekstu ove grupe, oko kružne srednje vrijednosti.

Usporedbom podataka prikazanih u tablici 6.2 s dijagramima 6.4 i 6.7 može se iščitati kako je po očekivanju wPLI indeksa u grupi A kod frekvencijskog područja alfa (α) niži nego kada su promatrani svi parovi, te kako PLV indeks ima puno viši iznos u usporedbi sa sveukupnim podacima za ovaj slučaj. Uz to kurtosis upućuje na užu raširenost faznih razlika u ovoj grupi čime je postignut cilj grupacije.

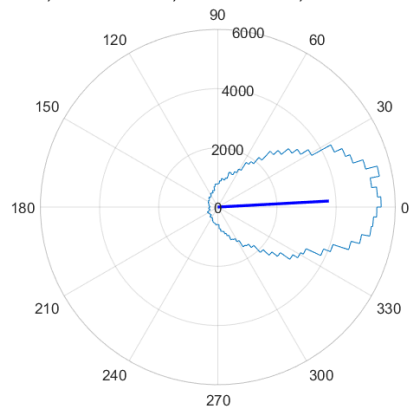
Poglavlje 6. Rezultati

Oz i O1, wPLI= 0.29598, PLV/R= 0.88961, circ mean= -3.2596



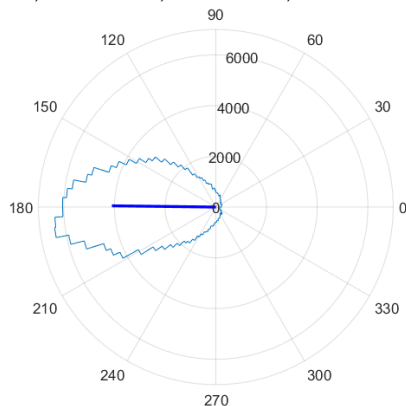
(a) Maksimalni PLV

O2 i Oz, wPLI= 0.081545, PLV/R= 0.62658, circ mean= 3.1036



(b) Minimalni PLV

Pz i F4, wPLI= 0.034168, PLV/R= 0.68301, circ mean= 179.3107



(c) Najbliži par realnoj osi

Slika 6.11 Grupa A, otvorene oči, alfa (α)

Delta (δ) frekvenciji pojas kod otvorenih oči predstavljen je sa 20 parova elektroda od kojih su 9 usko grupirani oko nule, a 11 oko π . Ista greška se uviđa i u delta (δ) pojasu gdje vrlo uska grupacija u blizini realne osi dovodi do visokog iznosa wPLI indeksa. Primjer je prikazan na slici 6.12a. Dolazi se do pretpostavke da se ovaj tip greške wPLI indeksa može pojaviti vrlo vjerojatno u svim ostalim frekvencijskim pojasevima koji sadrže parove s visokim PLV-om i vrlo uskom grupacijom u bližjoj okolini realne osi. Time se znatno narušava efikasnost wPLI indeksa kod uklanjanja visokih faznih sinkronizacija u blizini realne osi.

Poglavlje 6. Rezultati

Tri para elektroda (Fp2-Fp1, T7-Fp2 i Oz-O1) iz ove grupe predstavljaju stršće vrijednosti s dijagrama 6.7. Oni ne samo da imaju iznimno visoke iznose PLV indeksa nego i prosječne iznose wPLI indeksa za grupu A. Osim para Oz-O1 za kojega smo pretpostavili da visoki iznos wPLI indeksa proizlazi iz vrlo uske grupacije u blizini realne osi. Može se uočiti da wPLI ima tendenciju procijeniti parove elektroda s visokim PLV-om kao moguće kandidate za pravu faznu sinkronizaciju između dvije regije u mozgu

Isto tako opet se može uočiti iz slike 6.12b da i par s najnižim PLV-om iz ove grupe još uvijek ima vrlo visoki PLV u odnosu na sve ostale parove elektroda. Iz slika 6.12c i 6.12d može se pretpostaviti kako opet simetrija razdiobe oko kružne srednje vrijednosti utječe na konačni rezultat wPLI indeksa.

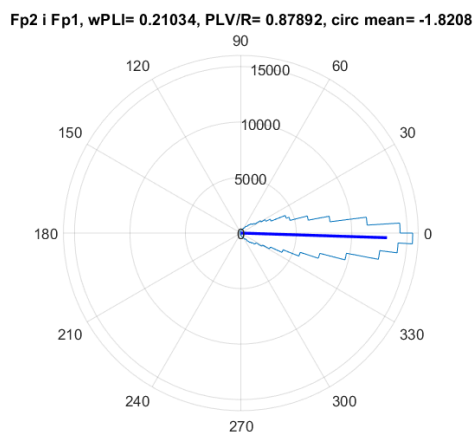
Usporedbom tablica 6.2 i 6.3 može se vidjeti da većina parova elektroda u alfa (α) i delta (δ) pojasu se ponavljaju. Jedina uočljiva razlika se pojavljuje kod iznosa wPLI i PLV indeksa. U obliku manjih vrijednosti u delta (δ) frekvencijskom području. Lista parova koji su jedinstveni za delta (δ) frekvencijsko područje: O2-O1, T8-Fp1, T8-F3 i O2-T8. Gdje se može pretpostaviti kako u odnosu na wPLI vrijednosti postoji povezanost desnog sljepoočnog režnja s frontalnom i zatiljnom regijom mozga, ali postoji mogućnost da ta povezanost proizlazi iz lažne sinkronizacije ili greške zbog referente točke.

Tablica 6.3 Grupa A, Otvorene oči, Delta (δ) frekvencijskom području

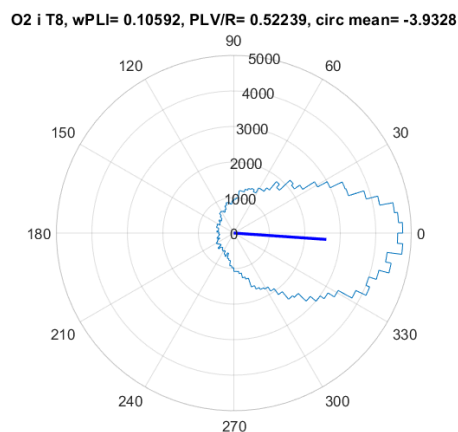
El 1	El 2	wPLI	PLV/R	circ std	circ mean (°)	Kurtosis	Smjer (°)
2	1	0.2103	0.8789	0.4921	-1.82	0.7189	0
6	2	0.1275	0.8454	0.556	178.06	0.6589	180
15	14	0.1007	0.8451	0.5566	-2.24	0.6648	0
16	2	0.1002	0.8085	0.6189	-177.09	0.5777	180
16	1	0.0183	0.7413	0.7193	-178.75	0.4844	180
15	2	0.0606	0.7192	0.7495	-179.65	0.4547	180
14	2	0.1548	0.7102	0.7614	-176.49	0.4466	180
16	6	0.1412	0.6965	0.779	4.29	0.4124	0
6	1	0.174	0.6858	0.7928	175.75	0.4267	180
14	1	0.0757	0.6609	0.8236	-177.11	0.3784	180
16	14	0.0242	0.6605	0.8241	0.76	0.3857	0
14	6	0.193	0.6434	0.8446	4.59	0.3533	0
16	15	0.0558	0.637	0.8521	3.18	0.3534	0
15	1	0.024	0.6327	0.8571	179.08	0.3577	180
15	6	0.1296	0.6296	0.8608	2.67	0.3432	0
10	1	0.1485	0.5913	0.9041	-175.29	0.2966	180
11	2	0.1481	0.5777	0.919	172.24	0.2806	180
11	6	0.0731	0.5634	0.9345	-6.11	0.2653	0
10	3	0.0691	0.5288	0.9708	-176.41	0.2341	180
16	10	0.1059	0.5224	0.9773	-3.93	0.246	0
N=20	median=0.1003	median=0.6607				median=0.3821	

Poglavlje 6. Rezultati

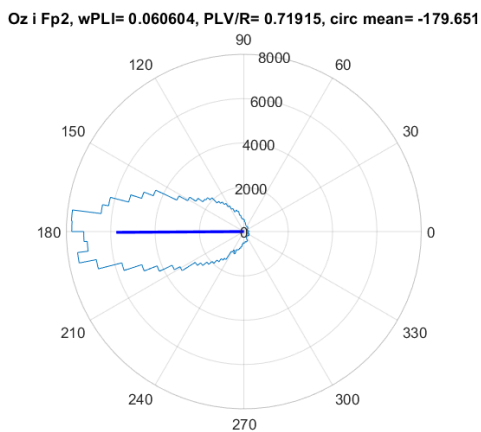
Te za alfa (α) frekvencijskom području: Fz-F3, Pz-F4, Oz-P3, P3-C3, Pz-Fz, P3-F4. Što ukazuje na povezanost između partijalne i frontalne regije mozga. Naime, iako je iznos PLV-a visok za parove koji povezuje te dvije regija mozga postoji velika mogućnost da je njihova sinkronizacija izazvana volume conduction-om zbog iznimno niskih wPLI iznosa za te parove.



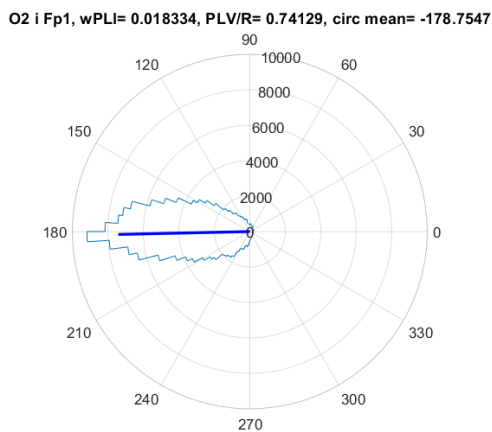
(a) Maksimalni PLV



(b) Minimalni PLV



(c) Najbliži par realnoj osi



(d) Minimalni wPLI

Slika 6.12 Grupa A, otvorene oči, delta (δ)

Poglavlje 6. Rezultati

Ostali parovi koji i u alfa (α) i u delta (δ) pojasu imaju visoke iznose PLV-a uz usku grupaciju oko realne osi. Ukazuju na visoku aktivnost u zatiljnoj regiji mozga kod mirovanja uz zatvorene oči, ali postoji značajna mogućnost da aktivnosti između tih parova elektroda proizlaze iz fazne sinkronizacije izazvane volume conduction-om.

Kod zatvorenih oči u alfa (α) frekvencijskom području se javlja skoro pa duplo manje parova nego u slučaju kod otvorenih oči. Od tih 12 parova iz tablice 6.4, 6 ih se nalazi u okolini nule i ostalih 6 u okolini π . Pretpostavka je da će se povezanost u svim parovima povećati u odnosu na otvorene oči, iz već poznatog razloga da je alfa (α) frekvencijskom području najaktivnije u stanju kompletnog mirovanja bez stimulatora. Činom zatvaranja oči postiže se niža razina vanjskih podražaja što direktno pojačava aktivnost u mozgu.

Opet se pojavljuje greška vrlo uske grupacije u neposrednoj blizini oko realne osi gdje se to može vidjeti u slučaju kod najvišeg PLV-a na slici 6.13a. Isto kao i u oba slučaja kod otvorenih oči. Čime se pretpostavka o ovakvome tipu greške kod wPLI metode sve više čini univerzalna.

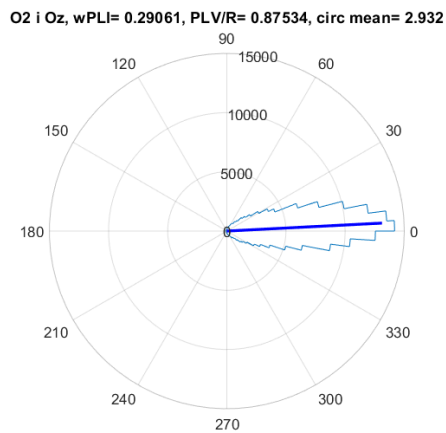
Kružna srednja vrijednost u ovom slučaju odstupa više od realne osi nego u prijašnjim primjerima kao što se može vidjeti iz slika 6.13b i 6.13c gdje grupacija izvedena pomoću proizvoljnih granica grupira veći udio parova elektroda koji su vjerojatno zapravo povezani. Ali to ne znači da u slučaju kod zatvorenih oči u alfa (α) frekvencijskom području ne postoje parovi elektroda koji su u lažnom sinkronizmu zbog greške izazvane volume conduction-om. Kao na primjer na slici 6.13d gdje je wPLI prepoznao usku grupaciju uz realnu os te ju ocijenio vrlo niskim iznosom wPLI indeksa.

Tablica 6.4 Grupa A, Zatvorene oči, Alfa (α) frekvencijskom području

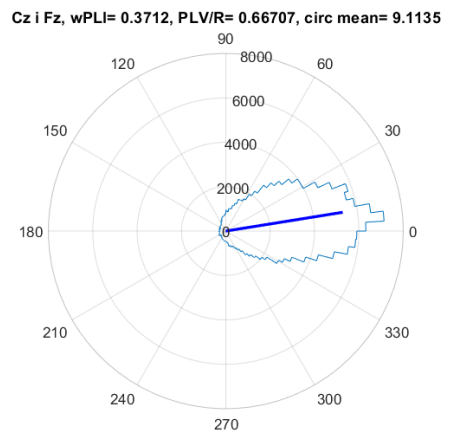
El 1	El 2	wPLI	PLV/R	circ std	circ mean (°)	Kurtosis	Smjer (°)
16	15	0.29061	0.87534	0.49932	2.93	0.70849	0
3	1	0.49774	0.7946	0.64093	7.68	0.56133	0
4	3	0.4182	0.78869	0.65009	6.56	0.55609	0
16	4	0.29924	0.7478	0.71022	-175.09	0.50037	180
13	1	0.43482	0.74305	0.71686	-170.29	0.48257	180
15	4	0.20963	0.74033	0.72065	-176.56	0.48783	180
5	4	0.08545	0.73208	0.73201	-2.15	0.47931	0
5	2	0.44408	0.72758	0.73813	8.14	0.46484	0
13	3	0.09959	0.70379	0.76969	-176.27	0.42754	180
11	2	0.10762	0.69843	0.77663	176.8	0.41263	180
14	5	0.00057	0.66857	0.81416	179.38	0.39113	180
8	4	0.3712	0.66707	0.816	9.11	0.40237	0
N=12		median=0.2949	median=0.7417			median=0.4852	

Poglavlje 6. Rezultati

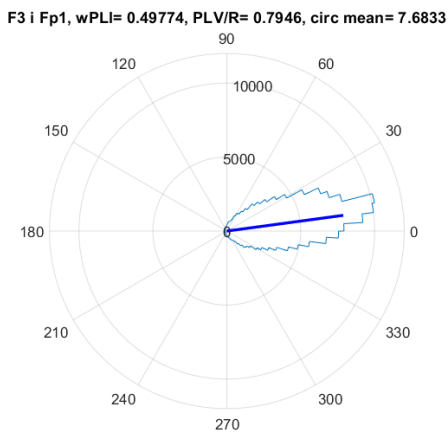
Veći udio parova elektroda koji više odstupaju od realne osi u ovoj grupi rezultira većim iznosima wPLI indeksa od prosječnoga uz veći raspon wPLI indeksa. PLV pak po očekivanju ima isto viši iznos od prosjeka svih parova. Zato što veća odstupanja od realne osi zapravo ne utječu na njegov iznos nego ga samo reprezentira rezultatna dužina zbroja svih vektora faznih razlika koja je po očekivanju u grupi A kod zatvorenih oči u alfa (α) frekvencijskom području najviša. Što se pak tiče kružnog statističkog parametra kurtosis on je viši u ovoj grupi nego u slučajevima kod otvorenih oči.



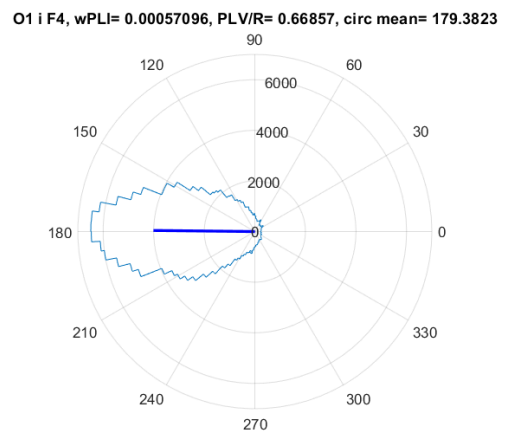
(a) Maksimalni PLV



(b) Minimalni PLV



(c) Visoki wPLI uz visoki PLV



(d) Najbliži par realnoj osi i najmanji wPLI

Slika 6.13 Grupa A, zatvorene oči, alfa (α)

Poglavlje 6. Rezultati

U kontrastu s povećanom povezanošću u alfa (α) frekvencijskom području prilikom analize podataka zatvorenih oči, primjećuje se smanjenje povezanošću za delta (δ) frekvencijskom područje. Isto kao i kod alfa (α) pojasa grupirano je 12 parova elektroda, od kojih su 6 usko grupirani oko nule, a ostalih 6 oko π . Ovoga puta kod maksimalnog PLV pojavljuje se problem nesimetričnosti oko kružne srednje vrijednosti koja je u neposrednoj blizini realne osi. Većina faznih razlika u grupi A kroz sva četiri slučaja su uglavnom simetrični, ali kada su usko grupirani oko svoje kružne srednje vrijednosti kao što je to slučaj u grupi A u okolici realne osi mogu znatno narušiti rezultate wPLI metode svojom nesimetrijom ili raširenosti faznih razlika.

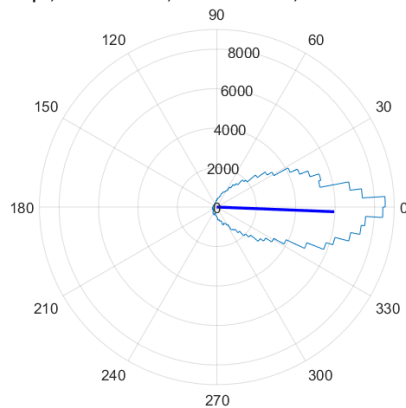
Primjećuje se kako su u ovome slučaju puno manja odstupanja kružne srednje vrijednosti od realne osi nego u prošlom slučaju di su se povećala zbog povećane povezanosti. Također svi parovi elektroda kao što se može vidjeti na slici 6.13 i iz iznosa kurtosisa iz tablice 6.5 su više rašireni u delta (δ) frekvencijskom području. Isti slučaj kao i kod otvorenih oči, većina parova su isti u oba frekvencijska područja. Kod alfa (α) frekvencijskog područja jedinstveni parovi su Fz-Fp2 i O1-Cz. Dok kog delta (δ) frekvencijskog područja su to pak P4-F3 i Cz-Fz. Parovi F3-Fp1 i O2-Oz su parovi elektroda čije vrijednosti PLV indeksa odskaču od svih ostalih faznih razlika zbog svoje većine. Par O2-Oz ima vrlo niski PLV i vrlo vjerojatno predstavlja lažu sinkronizaciju izazvanu volume conduction-om dok par F3-Fp1 ima nešto viši wPLI, ali njegov prikaz na slici 6.14a ukazuje na mogućnost inflacije wPLI indeksa zbog nesimetrije.

Tablica 6.5 Grupa A, Zatvorene oči, Delta (δ) frekvencijskom području

El 1	El 2	wPLI	PLV/R	circ std	circ mean (°)	Kurtosis	Smjer (°)
3	1	0.10775	0.74478	0.71445	-2.27	0.4985	0
16	15	0.00963	0.71168	0.75937	-0.03	0.44259	0
11	2	0.05392	0.67428	0.80712	-179.39	0.42553	180
5	2	0.10963	0.66245	0.82164	-3.31	0.38965	0
13	1	0.10144	0.63451	0.85497	178.5	0.37487	180
5	4	0.10883	0.53154	0.96794	-6.22	0.23738	0
4	3	0.1274	0.53055	0.96896	-2.34	0.27868	0
14	5	0.10963	0.52197	0.97779	-176.63	0.24868	180
15	4	0.09117	0.51725	0.9826	-179.19	0.26507	180
16	4	0.13959	0.51234	0.98758	-176.68	0.26113	180
4	2	0.00139	0.50416	0.99583	2.63	0.22015	0
14	8	0.05499	0.49257	1.0074	172.2	0.20971	180
N=12		median=0.1046	median=0.531			median=0.2719	

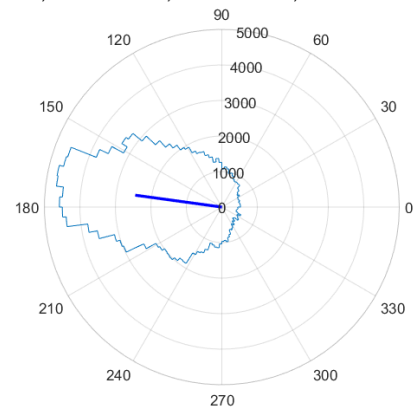
Poglavlje 6. Rezultati

F3 i Fp1, wPLI= 0.10775, PLV/R= 0.74478, circ mean= -2.2665



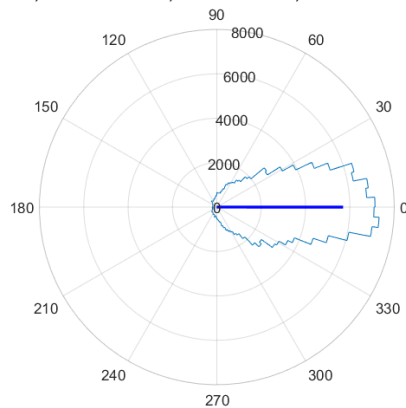
(a) Maksimalni PLV

O1 i Cz, wPLI= 0.054991, PLV/R= 0.49257, circ mean= 172.1949



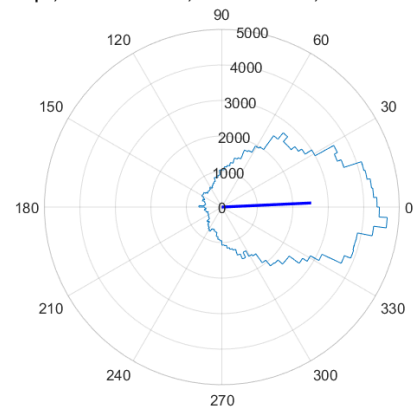
(b) Minimalni PLV

O2 i Oz, wPLI= 0.0096286, PLV/R= 0.71168, circ mean= -0.03316



(c) Visoki wPLI uz visoki PLV

Fz i Fp2, wPLI= 0.0013914, PLV/R= 0.50416, circ mean= 2.631



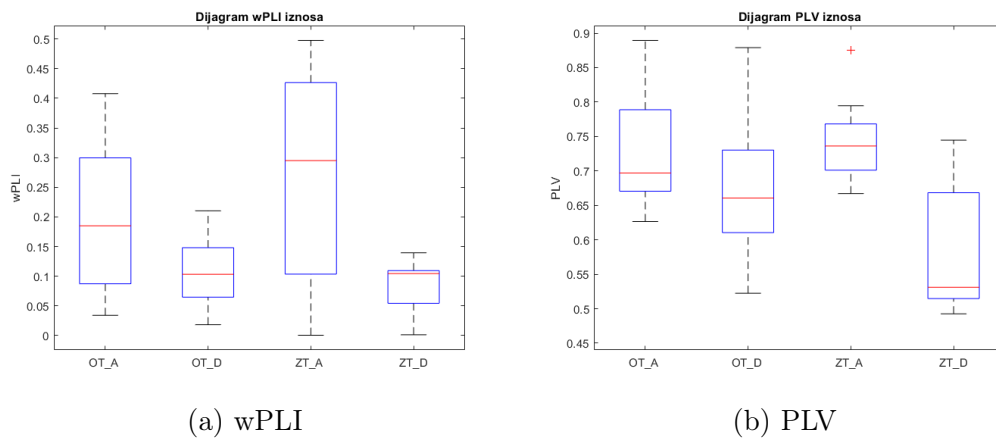
(d) Najbliži par realnoj osi i najmanji wPLI

Slika 6.14 Grupa A, zatvorene oči, delta (δ)

Iznosi wPLI indeksa u slučaju alfa (α) frekvencijskog područja za grupu A, nalaze se u puno većem intervalu nego je to slučaj kod delta (δ) frekvencijskog područja. Prikaz iznosa wPLI indeksa po slučajevima se nalazi na slici 6.15a. Naime, alfa (α) frekvencijsko područje je poznato po visokoj aktivnosti kod mirovanja čime možemo pretpostaviti da su greške izazvane vrlo uskom razdiobom faznih razlika ili/i nesimetrija kod uskih razdioba u okolici realne osi.

Poglavlje 6. Rezultati

Potrebno je uzeti u obzir pri razmatranju ove pretpostavke, u slučaju kod zatvorenih oči pojavljuju se značajna greška kod grupacije zbog visokog odstupanja kružne srednje vrijednosti od realne osi. Što ne znači da ne postoje greške izazvane nesimetrijom i uskom grupacijom u neposrednoj blizini realne osi u tom slučaju. Parovi elektroda koji se pojavljuju u alfa (α) frekvencijskom području kod otvorenih i zatvorenih oči su: Fz-F3, P3-Fp2 i O2-Oz. Uočava se veća razlika između parova elektroda s uskom razdiobom u okolici realne osi između slučaja otvorenih i zatvorenih oči nego između alfa (α) i delta (δ) frekvencijskog područja.



Slika 6.15 Dijagram wPLI i PLV iznosa u grupi A.

Što se tiče delta (δ) frekvencijskog područja za slučajeve zatvorenih i otvorenih oči isto se uočava veliki interval wPLI indeksa. Iste greške se javljaju izazvane simetrijom i vrlo uskom razdiobom u neposrednoj blizini realne osi kao i u prošlom slučaju.

Očekivano je bilo da grupacija u ovu grupu proizvede rezultate koji posjeduju vrijednosti wPLI indeksa u manjim intervalima oko niskih iznosa zbog filtracije uskih razdioba u okolici realne osi, ali zbog mogućih grešaka povezanih sa simetrijom i vrlo uskom grupacijom u neposrednoj blizini realne osi uz moguće greške kod grupacije dobiveni su u većini slučajeva čak i viši prosječni iznosi wPLI indeksa. Jedino se maksimalne i stršeće vrijednosti ne nalaze u ovoj grupi.

Poglavlje 6. Rezultati

PLV indeks za razliku od wPLI indeksa u grupi A je poprimio oblik puno manjih intervale, kao što se vidi usporedbom slika 6.15b i 6.7. Što se i očekivalo pošto su se parovi elektroda grupirali za usko grupirane razdiobe, a čime su usko grupirane tako su i njihove rezultante dužine puno više.

Rezultati grupe A svi ukazuju na iste mane wPLI indeksa. Uska razdioba i nesimetrija u neposrednoj okolini realne osi mogu negativno utjecati na iznos wPLI indeksa što rezultira velikim rasponom vrijednosti koje wPLI indeks može poprimiti. Dok je PLV indeks puno robusniji što se tiče konzistentnosti u ovoj grupi, ali još uvijek posjeduje manu nerazlikovanja mogućih lažnih sinkronizacija izazvanih volume conduction-om i prave fazne korelacije između para elektroda.

6.2.3 Grupa B

Uniformna razdioba je karakteristična između elektroda koji su daleko od sinkronizma. Za razliku od prijašnje grupe gdje se nije moglo zaključiti sa sigurnošću da li parovi koji iskazuju visoki stupanj sinkronizma su zapravo u korelaciji ili su samo rezultat utjecaja volume conduction-a. U ovoj grupi možemo biti sigurni da prikazani parovi elektroda su zapravo kompletno nepovezani ako im njihova razdioba poprimi oblik uniformne razdiobe.

Udio parova elektroda iz ove grupe nasprema ukupnom broju parova može služiti kao dobar indikator aktivnosti mozga u pojedinim slučajevima koji su prikazani u ovome radu. Očekivanja za iznose dobivene wPLI i PLV metodom kod ove grupu, jesu da će biti vrlo niski iznosi u oba slučaja. Pošto postojanje volume conduction-a samo lažno predstavlja faze koje su povezane. Što znači da ova grupa zapravo ne predstavlja sve nepovezane parove nego samo nepovezane parove koji nisu pod utjecajem volume conduction-a.

Za analizu ove grupe bili su korišteni razni testovi za uniformnost razdiobe u kružnoj statistici. Najznačajniji test u kružnoj statistici za testiranje uniformnosti kod unimodalne devijacije je Rayleigh-ov test. Zatim bili su uz njega korišteni i Omnibus test za unimodalne, bimodalne i multimodalne distribucije. Te Rao's spacing test koji predstavlja snažnu alternativu Rayleigh-ovom testu kod razdioba koje nisu unimodalne niti aksijalno bimodelni[7]. Rezultati testova bit će razmotreni za svaki slučaj u grupi B zasebno.

Tablica 6.6 Grupa B, Otvorene oči, Alfa (α) frekvencijskom području

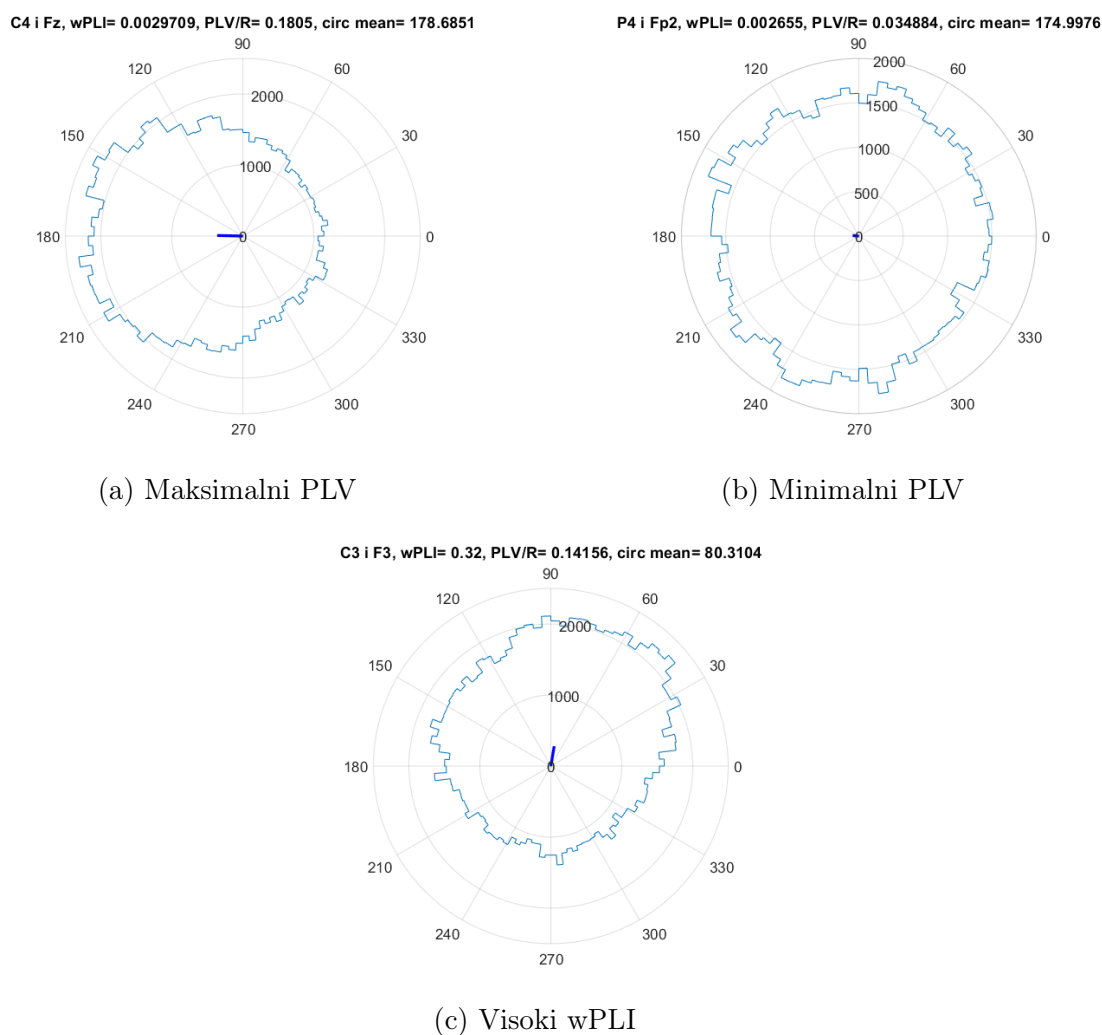
El 1	El 2	wPLI	PLV/R	circ std	circ mean (°)
9	4	0.003	0.1805	1.2802	178.68
14	13	0.008	0.1774	1.2827	178.65
14	9	0.2344	0.1739	1.2854	-144.89
15	9	0.2095	0.1664	1.2912	-147.62
15	10	0.1914	0.1545	1.3004	-38.12
11	10	0.2306	0.1519	1.3024	-130.5
7	3	0.32	0.1416	1.3103	80.31
8	4	0.2028	0.1322	1.3174	40.04
14	8	0.1355	0.1313	1.3181	149.98
9	1	0.1484	0.1243	1.3234	-149.77
16	9	0.0583	0.1224	1.3248	-7.06
11	8	0.1307	0.1178	1.3283	32.2
14	10	0.164	0.1149	1.3305	-43.49
8	1	0.1565	0.11	1.3341	38.2
13	11	0.0152	0.1085	1.3353	176.55
15	13	0.0175	0.0999	1.3417	-179.9
8	6	0.0895	0.0982	1.343	-27.08
8	5	0.025	0.0972	1.3437	168.04
13	6	0.1051	0.0946	1.3457	-154.34
12	8	0.1306	0.0863	1.3518	141.71
9	2	0.1372	0.0826	1.3545	-42.31
13	1	0.0539	0.0767	1.3589	-168.74
15	8	0.1386	0.0755	1.3598	114.84
8	2	0.1422	0.0699	1.3639	83.88
12	10	0.1353	0.0696	1.3641	-99.87
10	6	0.0971	0.0541	1.3754	69.69
10	5	0.0273	0.0437	1.383	-55.65
13	2	0.0027	0.0349	1.3893	175
N=28	median=0.133	median=0.1093			

Prvi slučaj isto kao i u prošloj grupi bit će za skup podataka otvorenih oči u alfa (α) frekvencijskom pojasu. Pronađeno je 28 parova elektroda koji odgovaraju kriterijima proizvoljno zadanih granica. Oko četvrtina ukupnih parova elektroda time ne ukazuje na nikakvu povezanost ili na iznimno nisku povezanost međusobno. Po očekivanome medijani wPLI i PLV indeksa ispadaju niski. Pogotovo za PLV indeks. Dok iznos wPLI indeksa je niži od prosjeka, nije puno manji kao što je to slučaj kod PLV-a. Time možemo već sada pretpostaviti da je PLV moguće bolji indikator za uniformnost od wPLI indeksa

Iz slike 6.16a može se uočiti da par s najvećim PLV-om u ovoj grupi ima blagu usmjerenost prema π , što ga ne čini idealnim primjerom uniformnosti, ali zbog visoke raširenosti u svim smjerovima može se zaključiti da je poveznica vrlo niska. Također moguće je da tip razdiobe nije prikladan za odgovarajući test.

Poglavlje 6. Rezultati

Dok bi se za par elektroda prikazan na slici 6.16b moglo pretpostaviti da predstavlja uniformnu razdiobu s nekim šumom. Naime, uporabom svih testova za uniformnost uvidjelo se da postoji problem kod njihove primjene na ovaj skup podataka. Svi testovi vraćaju iznose od nula osim za parove: Pz-T8, T8-T7, T8-F4 i P4-Fp2. Kod kojih Omnibus test vraća vrijednosti koje su značajno niže od $p = 0.05$. Mogući razlozi takvih rezultat su vjerojatno povezani s iznimno velikim setom podataka od preko 150000 kompleksnih vektora za svaki par elektroda. Također postoji mogućnost da je test ispravan i da parovi iz ove grupe zapravo nisu ni uniformni nego samo predstavljaju parove elektroda s vrlo niskom povezanošću.



Slika 6.16 Grupa B, otvorene oči, alfa (α)

Poglavlje 6. Rezultati

Mana wPLI indeksa u ovoj grupi je uočljiva na primjeru sa slike 6.16c gdje par elektroda s niskim PLV-om vraća vrlo visoki wPLI. Uočljiva je neka slabija povezanost između elektroda u tom slučaju, ali ga wPLI indeks neproporcionalno ocijeni kao par s visokim sinkronizmom. wPLI indeks kao što je već više puta navedeno pridodaje veću težinu parovima čija kružna srednja vrijednost ima iznos približan $\pi/2$ ili $-\pi/2$ (imaginarnoj osi). Što ovaj par sa 80.3° ispunjava i time lažno poveća svoju sinkronizaciju u slučaju korištenja wPLI metode. Ponovnim promatranjem slika 6.16a i 6.16b moguće je uočiti kako se wPLI indeks kod para elektrodi s najvišim PLV-om i najnižim PLV-om skoro ne razlikuje. Oba para ocijeni s niskim wPLI-om iako po osobnoj procjeni razdiobe može se vidjeti kako drugi par ima puno sličniji izgled uniformnoj razdiobi nego prvi par. Postavlja se pretpostavka, da wPLI indeks ima lošija svojstva pri prepoznavanju nepovezanih parova elektroda nego PLV u ovom slučaju.

Tablica 6.7 Grupa B, Otvorene oči, Delta (δ) frekvencijskom području

El 1	El 2	wPLI	PLV/R	circ std	circ mean ($^\circ$)
9	2	0.1374	0.1746	1.2848	-162.74
13	12	0.059	0.1723	1.2867	15.81
8	3	0.1776	0.1717	1.2871	19.01
13	11	0.07	0.1673	1.2905	8.71
13	6	0.0468	0.1628	1.294	-3.95
13	5	0.0287	0.156	1.2992	-164.29
5	4	0.0872	0.134	1.316	-22.55
12	8	0.029	0.1324	1.3172	-168.35
12	3	0.1243	0.1275	1.321	154.45
10	5	0.1195	0.1268	1.3215	-31.54
7	3	0.1107	0.1225	1.3248	20.62
6	3	0.0761	0.1132	1.3318	161.48
12	1	0.1183	0.1106	1.3337	163.74
11	9	0.0951	0.1084	1.3354	-147.7
9	7	0.1343	0.1045	1.3383	157.83
8	4	0.0666	0.1029	1.3395	164.43
11	3	0.0307	0.0958	1.3448	153.8
5	3	0.1037	0.0948	1.3455	-141.55
11	8	0.1811	0.0932	1.3467	146.82
9	6	0.137	0.0915	1.348	133.21
9	8	0.0208	0.0908	1.3485	178.62
12	9	0.1561	0.0893	1.3496	-142.72
8	6	0.1303	0.0876	1.3509	-139.45
10	7	0.1537	0.0757	1.3596	133.86
11	10	0.1262	0.073	1.3616	-69.59
8	7	0.0344	0.0682	1.3652	6.41
8	5	0.0833	0.0666	1.3663	159.75
15	9	0.171	0.056	1.3741	-49.47
12	10	0.0877	0.0515	1.3773	-133.96
14	9	0.1182	0.0419	1.3843	-32.02
13	7	0.011	0.0165	1.4025	64.09
N=31	median=0.1037	median=0.1029			

Poglavlje 6. Rezultati

Drugi slučaj kod otvorenih oči prikazuje analizu podataka u delta (δ) frekvencijskom pojasu. Iz prijašnjih pretpostavki može se očekivati niža povezanost naprema alfa (α) pojasu. Što je vidljivo iz većeg broja parova u ovoj grupi ($N = 31$). Dodatna činjenica koja potvrđuje ovu tvrdnju prikazuje se preko iznosa medijana za wPLI i PLV indeks. PLV indeks ima puno niži medijan u odnosu na skup svih ostalih parova elektroda, dok wPLI ima čak i nešto viši iznos nego prosječni skup parova. Zbog puno manjeg raspona wPLI vrijednosti za ovaj slučaj teško je za procijeniti da li je wPLI bolja metoda za procjenu uniformnosti od PLV-a. Gdje je u prošlom slučaju bilo puno jasnije napraviti usporedbe između metoda.

Opet će se iz para elektroda s najvišim PLV-om moć uočiti neka razina usmjerenosti kao što se vidi na slici 6.17a. Dok sa slike 6.17b koja prikazuje par s najmanjim PLV-om možemo uočiti izgled veoma sličan uniformnoj razdiobi. Usporedbom sa slikom 6.16b možemo vidjeti kako ovaj par ima skoro pa duplo manji PLV. Opet su se bili primijenili testovi za uniformnost faznih razlika parova elektroda. Te se opet ispostavilo da je došlo do sličnih prepreka kao i u prošlom slučaju. Jedini rezultati različiti od nule dobiveni su Omnibus testom u pet parova: Cz-F4, Oz-C4, Pz-T8, O1-C4 i P4-C3. Ovoga puta dobiven je i rezultat različit od nule kod primjene Rayleigh-ovog testa za par P4-C3. Svi oni su opet značajno niži od $p = 0.05$. Može se vidjeti da parovi elektroda iz slike 6.17 ne izgledaju kao da proizlaze iz von Mises razdiobe što je jedan od mogućih problema koji se javljaju kod prepoznavanja uniformne razdiobe.

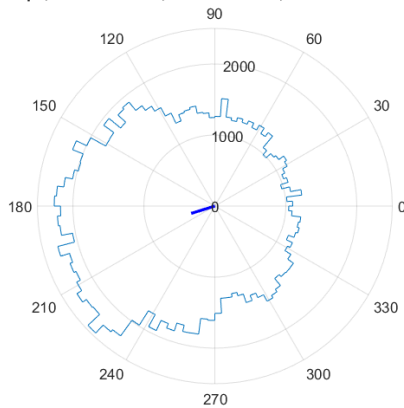
Ponovno se provjerilo za prisutnost greške kod wPLI metode izazvane pristranosti imaginarnoj osi. Slike 6.17c prikazuje par elektroda koja posjeduje najviši wPLI uz vrlo maleni PLV indeks. Ne može se s velikom sigurnošću reći da je povišeni wPLI izazvan pristranosti imaginarnoj osi ili je inherentno svojstvo wPLI metode pošto se većina faznih razlika nalazi u gornjoj polovici kruga.

Usporedbom u grupi A između parova kod otvorenih oči bilo je jasno vidljivo kako se većina parova koja se pojavila u alfa (α) području također pojavila i u delta (δ) frekvencijskom području. Pa se tako pretpostavilo da će se isto desiti i u grupi B. Naime, usporedbom tablica 6.6 i 6.7 može se uvidjeti kako se samo 14 parova ponavlja u oba slučaja. Čime se pretpostavka uspostavila netočnom. Parovi koji se pojavljuju u oba slučaja su: Cz-T7, C4-Fp2, T8-F4, P3-Cz, P3-T8, Pz-Cz, Pz-T8, P4-T7, P4-P3, O1-C4 i Oz-C4. Što ukazuje na vrlo nisku povezanost u oba frekvencijska pojasa kod otvorenih oči između centralne i partijalne regije mozga te slabe aktivnosti u temporalnoj regiji mozga.

Poglavlje 6. Rezultati

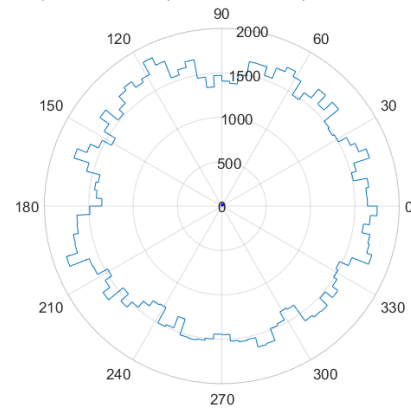
Što se pak tiče jedinstvenih parova elektroda u alfa (α) frekvencijskom području to su: C4-Fz, O1-P4, Oz-T8, O1-Cz, C4-Fp1, O2-C4, O1-T8, Cz-Fp1, Oz-P4, P4-Fp1, Oz-Cz, Cz-Fp2, T8-T7 i P4-Fp2. Moguće je pretpostaviti niske korelacije u ovom slučaju između frontalne i zatiljne regije mozga s centralnom regijom mozga. Jedinstveni parovi u delta (δ) frekvencijskom području su: P4-Pz, Cz-F3, P4-F4, F4-Fz, Pz-F3, T7-F3, Pz-Fp1, P3-C4, C4-C3, P3-F3, F4-F3, C4-T7, C4-Cz, Pz-C4, T8-C3, Cz-C3 i P4-C3. Uočava se vrlo niska aktivnost u centralnoj i partijalnoj regiji mozga pa tako je i njihova međusobna korelacija isto vrlo niska.

C4 i Fp2, wPLI= 0.13737, PLV/R= 0.1746, circ mean= -162.7417



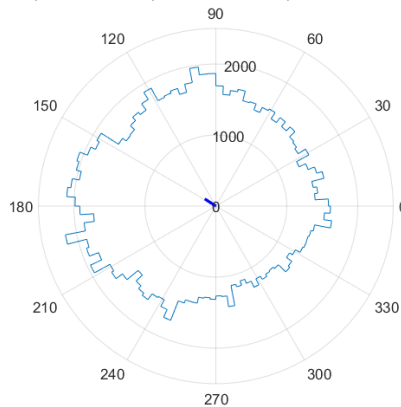
(a) Maksimalni PLV

P4 i C3, wPLI= 0.010983, PLV/R= 0.016531, circ mean= 64.0906



(b) Minimalni PLV

P3 i Cz, wPLI= 0.18109, PLV/R= 0.093226, circ mean= 146.8231



(c) Visoki wPLI

Slika 6.17 Grupa B, otvorene oči, delta (δ)

Tablica 6.8 Grupa B, Zatvorene oči, Alfa (α) frekvencijskom području

El 1	El 2	wPLI	PLV/R	circ std	circ mean (°)
14	3	0.0362	0.1806	1.2802	179.8
9	2	0.3636	0.1799	1.2807	51.23
16	9	0.0891	0.1766	1.2833	171.85
10	6	0.1226	0.1756	1.2841	-166.37
9	3	0.2918	0.1605	1.2958	140.54
7	2	0.3389	0.1463	1.3066	116.06
14	12	0.3328	0.1432	1.309	73.6
10	2	0.2311	0.1347	1.3155	-41.7
14	1	0.2805	0.1137	1.3314	-117.1
12	7	0.2762	0.1132	1.3317	79.48
15	6	0.0131	0.1048	1.3381	2.9
6	3	0.2393	0.099	1.3424	-56.18
14	10	0.0103	0.0928	1.347	-175.24
13	11	0.1975	0.0914	1.348	88.61
14	13	0.1427	0.0871	1.3512	142.27
7	5	0.1522	0.0586	1.3721	64.1
10	5	0.0137	0.0581	1.3725	-170.21
16	6	0.0278	0.0027	1.4123	-105
N=18	median=0.175	median=0.1135			

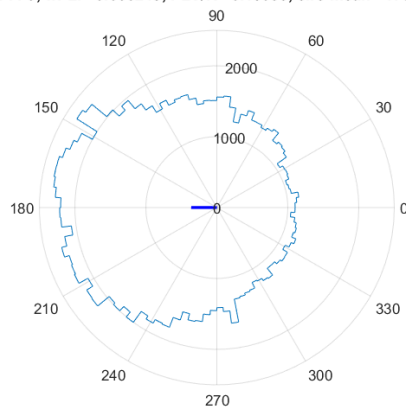
Skup podataka zatvorenih oči u alfa (α) frekvencijskom području je slučaj pri kojemu su regije mozga najviše povezane, pošto je najbliže stanje onomu kompletnog mirovanja bez stimulusa dok je osoba budna. Grupa B u ovom slučaju sadrži daleko najmanje parova elektroda ($N = 18$) čime bi se dala potvrditi pretpostavka da je ovaj slučaj odgovara onomu gdje su najveće sinkronizacije u mozgu. Iako su medijani wPLI i PLV indeksa niži kod otvorenih oči, u usporedbi s iznosima sa slika 6.4 i 6.7 kod zatvorenih oči u alfa (α) frekvencijskom području uočava se da su dosta niže vrijednosti od prosječnih.

Isto kao i kod prijašnjih slučajeva iz slike 6.18a koja prikazuje par s najvećim PLV-om uočava se blaga usmjerenost što indicira slabu povezanost. Dok slika 6.18b prikazuje par elektroda s najnižim PLV-om gdje se može opet vidjeti da wPLI ne razlikuje dobro nisko povezane parove elektroda. Iz tablice 6.8 može se vidjeti kako wPLI iznimno jako varira. Očito se može opet jasno vidjeti ista greška pristranosti imaginarnoj osi kao i u slučaju kod otvorenih oči za isti frekvencijski pojas. Skoro pa više od polovice parova pokazuje utjecaj te pristranosti na sebi. Primjer jednog takvoga para elektrodi na kojemu se jasno vidi utjecaj pristranosti prikazan je na slici 6.18c.

Poglavlje 6. Rezultati

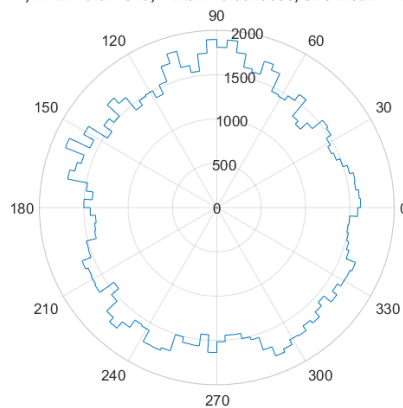
Rezultati testove uniformnosti za ovaj slučaj opet su pristrani zbog iznimno visokog broja podataka. Omnibus test ovoga puta vraća samo tri para koja su različiti od nule, a to su: C3-F4, T8-F4 i O2-T7. Njihove vrijednosti su puno niže od $p = 0.05$ pa nisu toliko značajne pri prihvaćanju hipotezuze uniformnosti. Rayleight test prvi puta daje iznos različit od nule koji iznosi $p = 0.3247$ gdje možemo sa sigurnošću reći da je par elektroda O2-T7 predstavljen uniformnom razdiobom.

O1 i F3, wPLI= 0.036248, PLV/R= 0.18059, circ mean= 179.7983



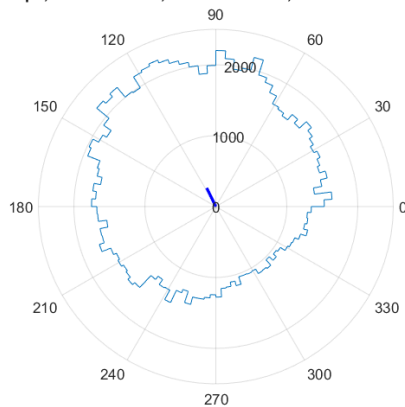
(a) Maksimalni PLV

O2 i T7, wPLI= 0.027846, PLV/R= 0.0026596, circ mean= -104.9978



(b) Minimalni PLV

C3 i Fp2, wPLI= 0.33889, PLV/R= 0.14633, circ mean= 116.0664



(c) Visoki wPLI

Slika 6.18 Grupa B, zatvorene oči, alfa (α)

Tablica 6.9 Grupa B, Zatvorene oči, Delta (δ) frekvencijskom području

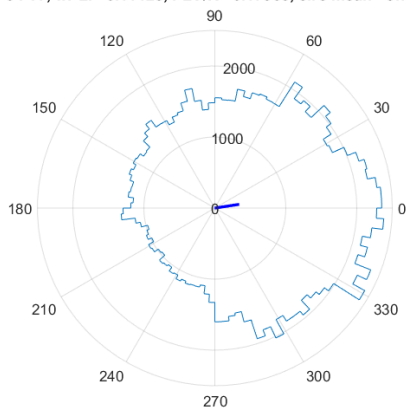
El 1	El 2	wPLI	PLV/R	circ std	circ mean (°)
11	6	0.1143	0.1736	1.2856	8.71
14	12	0.0861	0.1555	1.2996	-10.59
12	8	0.0203	0.1512	1.303	-0.16
12	4	0.0629	0.1452	1.3075	-176.78
13	11	0.062	0.1399	1.3115	7.82
14	10	0.0566	0.1365	1.3141	-177.13
8	2	0.111	0.1353	1.3151	168.47
6	2	0.0704	0.1342	1.3159	172.41
16	6	0.1358	0.1291	1.3198	161.94
13	5	0.0245	0.1247	1.3231	-169.73
16	10	0.0574	0.1226	1.3247	-0.88
9	8	0.203	0.1211	1.3258	5.95
14	3	0.0953	0.1188	1.3276	21.25
8	7	0.0546	0.1131	1.3319	-11.18
16	14	0.0262	0.102	1.3402	13
16	8	0.0669	0.0984	1.3428	-166.61
14	13	0.1321	0.0877	1.3508	-148.68
15	8	0.0337	0.0871	1.3512	179.39
8	5	0.1372	0.0765	1.3591	45.32
13	8	0.1376	0.0736	1.3612	-25.63
12	9	0.1489	0.0713	1.3629	-31.71
9	4	0.0201	0.0699	1.3639	-18.78
11	8	0.0212	0.0654	1.3672	7.35
15	6	0.1354	0.0572	1.3731	152.78
5	1	0.0642	0.0541	1.3754	-11.9
9	2	0.1284	0.0535	1.3759	-60.01
5	3	0.0904	0.0505	1.378	-43.05
8	3	0.0756	0.0476	1.3801	-139.65
7	4	0.0368	0.0396	1.3859	24.04
12	7	0.071	0.0327	1.3909	95.49
15	10	0.0277	0.0133	1.4048	179.12
16	9	0.0082	0.0078	1.4087	-80.04
N=32		median=0.0687	median=0.093		

Zadnji slučaj predstavlja analizu podataka otvorenih oči u delta (δ) frekvencijskom području za grupu B. Kao i što je bilo očekivano u ovom slučaju nalazi se najveći broj parova elektroda ($N = 32$). Iznosi medijana za wPLI i PLV indeks su najniži od svih ostalih slučajeva. wPLI indeks ne dolazi do tako izražene inflacije zbog težinske pristranosti imaginarnoj osi u ovome slučaju zbog iznimno niskih vrijednosti PLV indeksa za parove elektroda čija kružna srednja vrijednost znatno odstupa od realne osi. Primjer s najvišim wPLI-om prikazan je na slici 6.19c.

Poglavlje 6. Rezultati

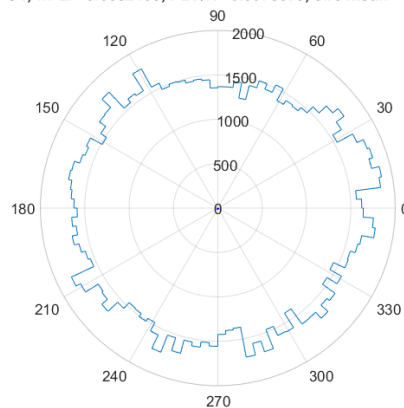
Par elektroda s najvišim PLV-om prikazan je na slici 6.19a i može se zamijetiti blaga usmjerenost faznih razlika. Te na slici 6.19b može se vidjeti par s najnižim PLV indeksom kao primjer razdiobe koja sliči uniformnoj razdiobi. Što se tiče testova uniformnosti opet su dobiveni dosta loši rezultati koji zbog visokog broja podataka konvergiraju u nulu. Parovi elektroda koji su različiti od nule u Omnibus testu su: P4-Cz, C4-Fz, P3-Cz, Oz-T7, F4-Fp1, C4-Fp2, F4-F3, Cz-F3, C3-Fz, Pz-C3, Oz-T8 i O2-C4. Također, Rayleigh-ov test vraća dva para elektroda koji su različiti od nule, Oz-T8 i O2-C4.

P3 i T7, wPLI= 0.11425, PLV/R= 0.17363, circ mean= 8.7157



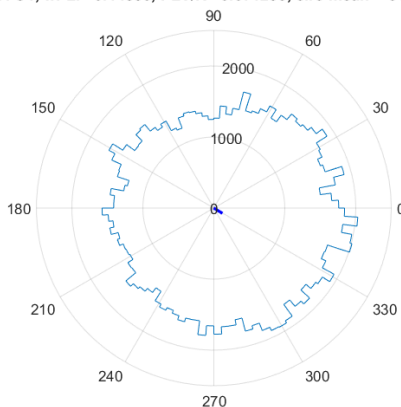
(a) Maksimalni PLV

O2 i C4, wPLI= 0.0082169, PLV/R= 0.0078379, circ mean= -80.0402



(b) Minimalni PLV

Pz i C4, wPLI= 0.14886, PLV/R= 0.071289, circ mean= -31.7061



(c) Visoki wPLI

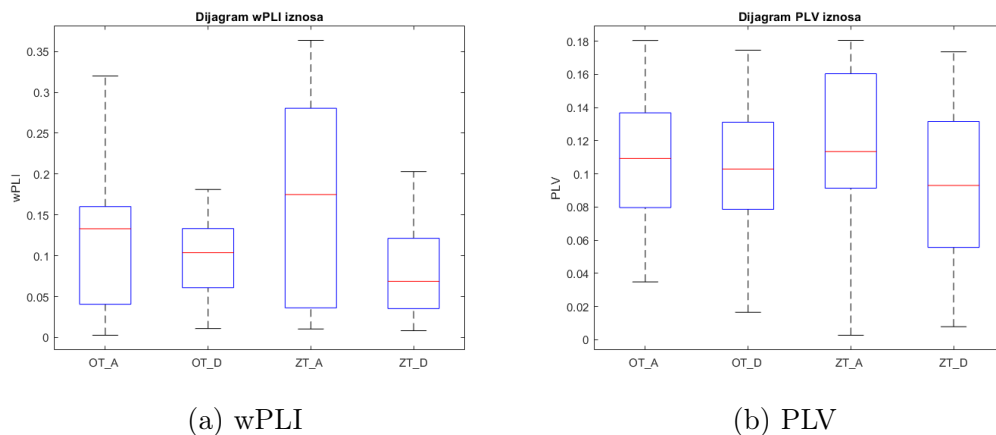
Slika 6.19 Grupa B, zatvorene oči, delta (δ)

Poglavlje 6. Rezultati

Usporedbom elektroda koji se pojavljuju kod otvorenih i zatvorenih oči u ovom slučaju opet ispada veća razlika nego kod otvorenih oči. Parovi koji se pojavljuju u oba frekventijska područja su: C4-Fp2, Pz-C3, P4-P3, O1-F3, O1-T8, O1-Fp2, O1-P4, Oz-T7, O2-T7 i O2-C4. Uglavnom se uočava manja aktivnost između zatiljnih, partijalnih i centralnih regija mozga u oba slučaja.

Naprema grupi A wPLI indeks bolje ocijeni parove elektroda u grupi B kao što se može uočiti iz slike 6.20a. Proizlazi iz vjerojatno manjih grešaka prisutnih zbog usko grupiranih faznih razlika i nesimetrije oko realne osi. Uz to pošto su PLV vrijednosti niže time su i lažne sinkronizacije izazvane pristranosti u blizini imaginarne osi manje. Moguće je potvrditi kako je PLV metoda puno učinkovitija za prepoznavanje niskih povezanosti zbog njene konzistentnosti koja se može vidjeti na slici 6.20b. Dok wPLI metoda u slučaju kod zatvorenih oči u alfa (α) frekventijskom području znatno odstupa od ostalih slučajeva zbog visokog broja parova elektroda čije kružne srednje vrijednosti su bliže imaginarnoj osi uz opće veće PLV vrijednosti.

Također usporedbom wPLI indeksa između grupa A i B kod otvorenih oči za delta (δ) frekventijsko područje možemo vidjeti kako su im dijagrami skoro pa identični. Pretpostavka je bila da će dijagrami za wPLI biti slični u obje grupe zbog očekivanih niskih vrijednosti. Naime, zbog većeg broja mogućih grešaka prisutnih u grupi A nego u grupi B samo je u jednoj slučaju sličan dijagram.



Slika 6.20 Dijagram wPLI i PLV iznosa u grupi B.

Rezultati grupe B prikazuju ovoga puta samo jednu očitu manu wPLI indeksa kod grupacije, a to jest pristranost imaginarnoj osi. Što sa sobom dovodi inflaciju wPLI indeksa kod parova elektroda s blagom usmjerenošću u blizini imaginarne osi. Opet se dolazi do povećanja intervala u kojima se nalaze wPLI indeksi za svaki slučaj. Bitno je istaknuti da kod manje povezanih slučajeva prisutnost takve greške je znatno manje. Iz razloga manjih PLV iznosa.

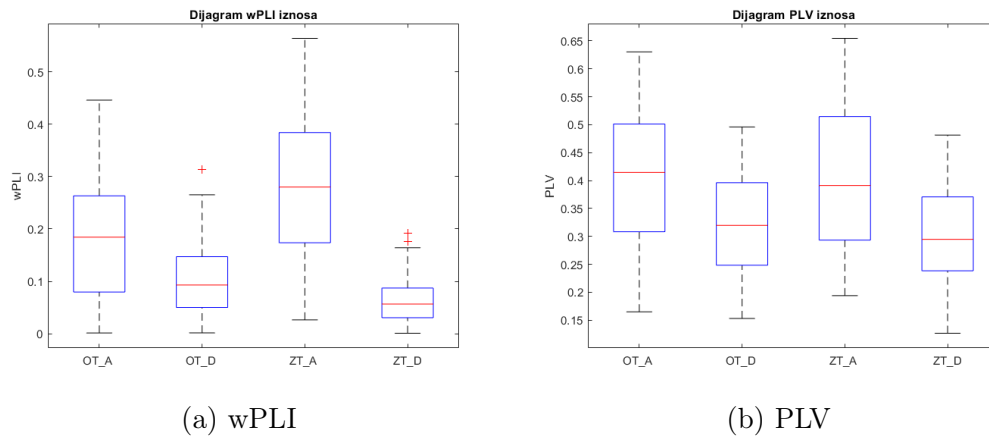
6.2.4 Grupa C

Grupa C sastoji se od parova elektroda koje ne pripadaju u grupu s vrlo uskom razdiobom u blizini realne osi niti u grupu s razdiobama sličnim uniformnoj razdiobi. Tablice parova elektroda koje spadaju u ovu grupu nalaze se u dodatku (A.1, A.2, A.3, A.4, A.5, A.6, A.7 i A.8). Njihove wPLI i PLV vrijednosti za svaki slučaj se nalaze na slici 6.21. Parovi koji se nalaze u ovoj grupi su oni parovi koji su vrlo vjerojatno u nekoj razini fazne sinkronizacije i možemo tvrditi da imaju korelaciju. Uz to u grupi se nalaze parovi u okolini realne osi sa srednjom do niske razine sinkronizacije. Te parove će se prije analize svakog slučaja ukloniti zbog nesigurnosti da li su zapravo stvarne sinkronizacije ili samo greške izazvane volume conduction-om. Kao što se može vidjeti iz širokog intervala wPLI indeksa za svaku grupu sa slike 6.21a. Takva raspodjela bi trebala smanjiti intervale u kojima se nalaze i wPLI i PLV indeksi.

Način na koji su se ti parovi isfiltrirali je pomoću obične if-else funkcije koja ima zadane proizvoljne granice. Te granice osiguravaju da parovi čija se kružna srednja vrijednost nalazi u okolini od 10° oko realne osi budu odvojeni. Ova proizvoljna granica uzeta je iz prijašnjih grupacija gdje se vidjelo da u grupi A parovi elektroda koji su usko grupirani oko realne osi poprimaju vrijednosti u tim granicama.

Nakon odvajanja tih parova ostatak bi trebao predstavljati parove koji su sigurno povezani u tom slučaju. Postavlja se pretpostavka da će wPLI i PLV metode podjednako ocijeniti te parove elektroda. Uz to izvršit će se analiza utjecaja pristranosti wPLI indeksa imaginarnoj osi, te ako postoje izdvojit će se parovi čija se kružna srednja vrijednost nalazi u bližoj okolini imaginarne osi.

Poglavlje 6. Rezultati



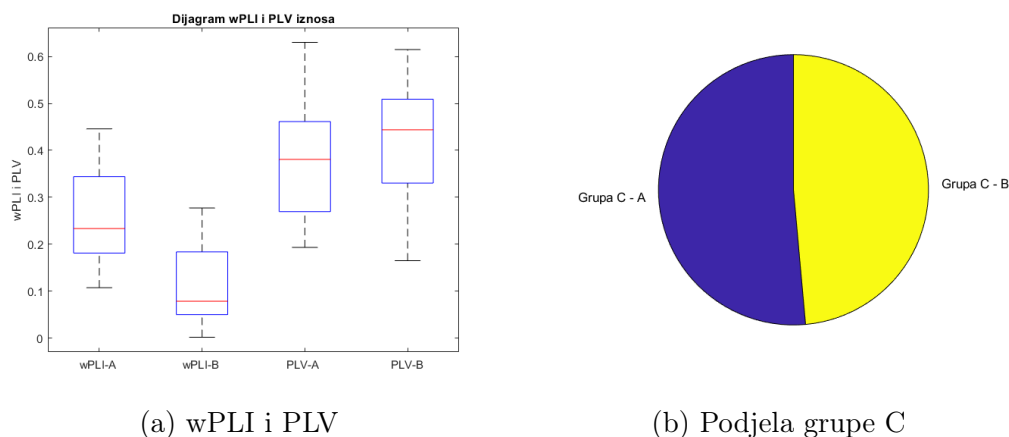
Slika 6.21 Dijagram wPLI i PLV iznosa u grupi C.

Prvi slučaj kod otvorenih oči u alfa (α) frekvencijskom području sadrži 70 parova elektroda. Od kojih 34 odgovara grupaciji oko realne osi pa su izbačeni iz razloga mogućeg ishoda iz greške izazvane volume conduction-om. Pregledom rezultata za grupu oko realne osi mogu se donijeti slični zaključci kao i u grupi A pa njihova analiza nije toliko detaljno obrađena.

Fokus grupe C bit će na parovima elektroda koje su s vrlo visokom vjerojatnošću parovi koji su zapravo fazno povezani. Njih je u ovom slučaju 36 i može se uočiti po intervalima sa slike 6.22a kako imaju visoke iznose wPLI i PLV indeksa, kao što je i bila pretpostavka. Naime, može se zamijetiti kako wPLI indeks donekle dobro procijeni većinu parova elektroda oko realne osi. Moguće je pretpostaviti da wPLI indeks efikasno procijeni parove elektroda koji iskazuju sinkronizaciju nakon uklanjanja parova s vrlo uskom grupacijom oko realne osi i parova koji imaju razdiobu sličnoj uniformnoj razdiobi.

Nakon izvedene podjele grupe C može se uočiti kako su se parovi elektroda u ovom slučaju podjednako raspodijelili u četiri grupe gdje samo za četvrtinu možemo sa sigurnošću reći da su zapravo povezani parovi. Veliki udio parova, skoro polovica, se ne mogu koristiti u analizi povezanih parova elektroda zbog velike mogućnosti da su rezultat greške izazvane volume conduction-om.

Poglavlje 6. Rezultati

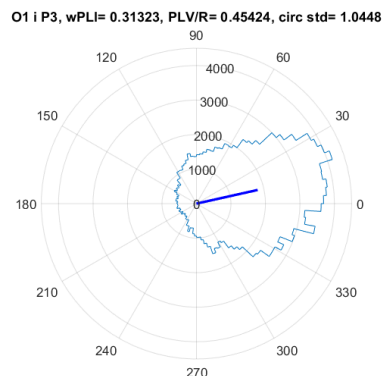


Slika 6.22 Dijagram wPLI i PLV iznosa u podgrupama grupe C gdje A označava prave sinkronizacija, a B predstavlja parove u okolici realne osi. Za slučaj otvorenih oči u alfa (α) frekvencijskom području.

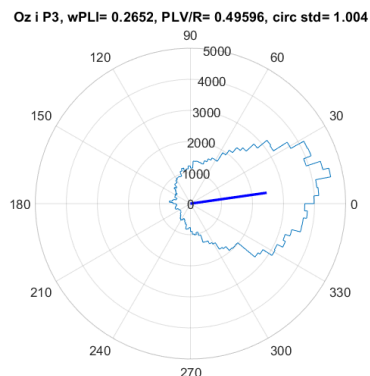
Drugi slučaj, kod otvorenih oči u delta (δ) frekvencijskom području posjeduje znatno više parova elektroda u okolici realne osi. Usporedbom dijagrama sa slika 6.9a i 6.9b zaključilo bi se po podjelama grupa da su podjednako povezani, ali novom podjelom grupe C uspostavilo se da zapravo slučaj u delta (δ) pojasu ima manju povezanost zbog velikog udjela elektroda čije su fazne razlike u okolici realne osi. Broj parova za koje se može zapravo tvrditi sa sigurnošću da su povezane iznosi 21 od 69.

Pojavljaju se dva para elektroda koji strše sa svojim iznosom wPLI indeksa od ostalih. To su parovi O1-P3 i Oz-P3, prikazani su na slici 6.23. Uočava se veoma slična raspodjela, jedina činjenica koja ih dijeli je kružna srednja vrijednost. Naime, oba para posjeduju vrlo niski iznos kurtosisa (< 0.2). Što stvara snažnu inflaciju wPLI indeksa. Opet je uočljiva bolja klasifikacija parova elektroda pomoću wPLI indeksa, ali pojavila se značajna greška izazvane visokom raširenosti faznih razlika. Ni nakon toliko grupacija nisu se uspjele ukloniti sve nesavršenosti wPLI metode.

Poglavlje 6. Rezultati

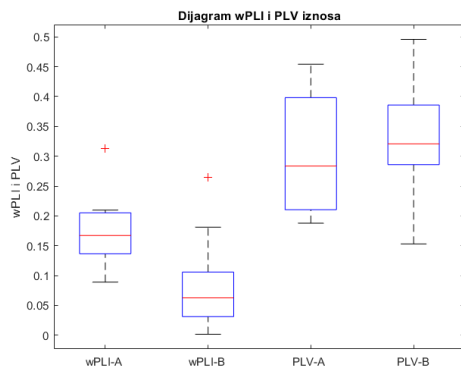


(a) Grupa C - A

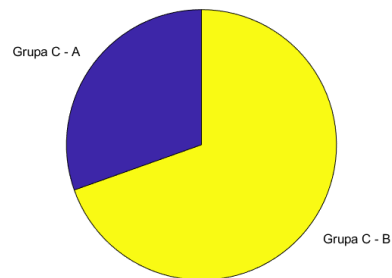


(b) Grupa C - B

Slika 6.23 Prikaz paraova elektroda s vrijednostima koje strše od ostalih.



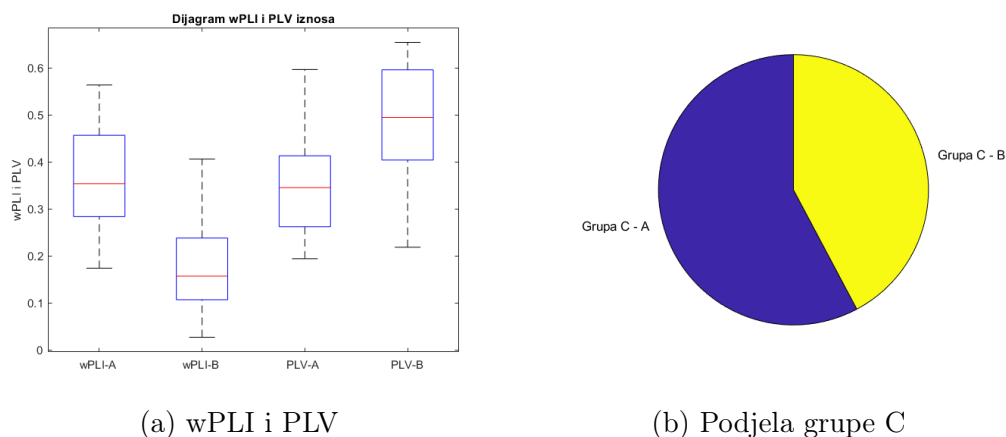
(a) wPLI i PLV



(b) Podjela grupe C

Slika 6.24 Dijagram wPLI i PLV iznosa u podgrupama grupe C gdje A označava prave sinkronizacija, a B predstavlja parove u okolici realne osi. Za slučaj otvorenih oči u delta (δ) frekvencijskom području.

Poglavlje 6. Rezultati

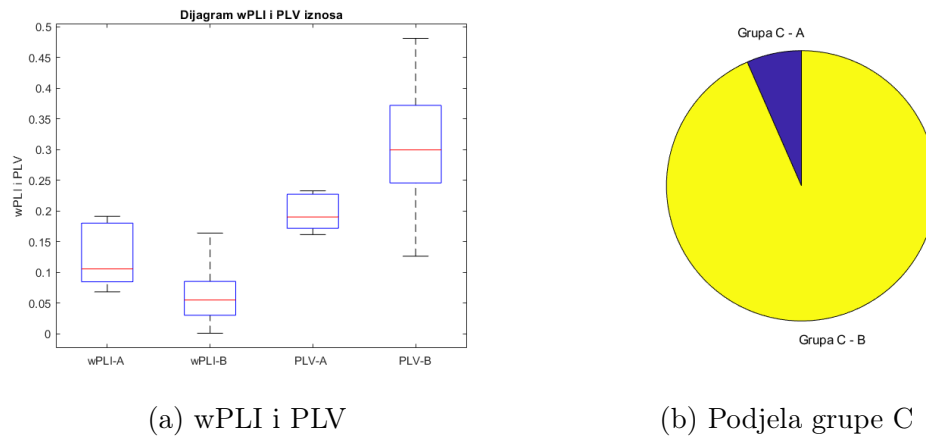


Slika 6.25 Dijagram wPLI i PLV iznosa u podgrupama grupe C gdje A označava prave sinkronizacija, a B predstavlja parove u okolici realne osi. Za slučaj zatvorenih oči u alfa (α) frekvencijskom području.

Treći slučaj, kod zatvorenih oči kod alfa (α) frekvencijskog pojasa prikazuje najveći udio elektroda za koje možemo pretpostaviti s visokom sigurnošću da su ispravni prikaz fazne sinkronizacije. Takvih parova postoji 52 od ukupno 90 parova. Što je značajno više od prijašnja dva slučaja gdje su se u ovoj podgrupi nalazile samo 21 i 36 parova elektroda.

Slika 6.25a prikazuje skoro pa identični interval kao i PLV nakon ovoliko grupacija i filtracija, ali wPLI metoda posjeduje primjetnu prednost gledajući između obje podgrupe. Gdje je efikasno prepoznala okruženje u neposrednoj blizini realne osi i prikladno ocijenila njihove šanse da budu pravi slučaj sinkronizacije između para elektrodi. Gledajući isti primjer za PLV može se zaključiti suprotno, ne samo da nije izbacila primjere s visokom mogućnosti stvaranja iz volume conduction-a nego ih je i ocijenila većim iznosom. Ovaj primjer prikazuje intrinzičnu manu PLV indeksa gdje wPLI metoda predstavlja drugi pristup koji uzima kao cilj izbjegavanje takvih grešaka.

Poglavlje 6. Rezultati



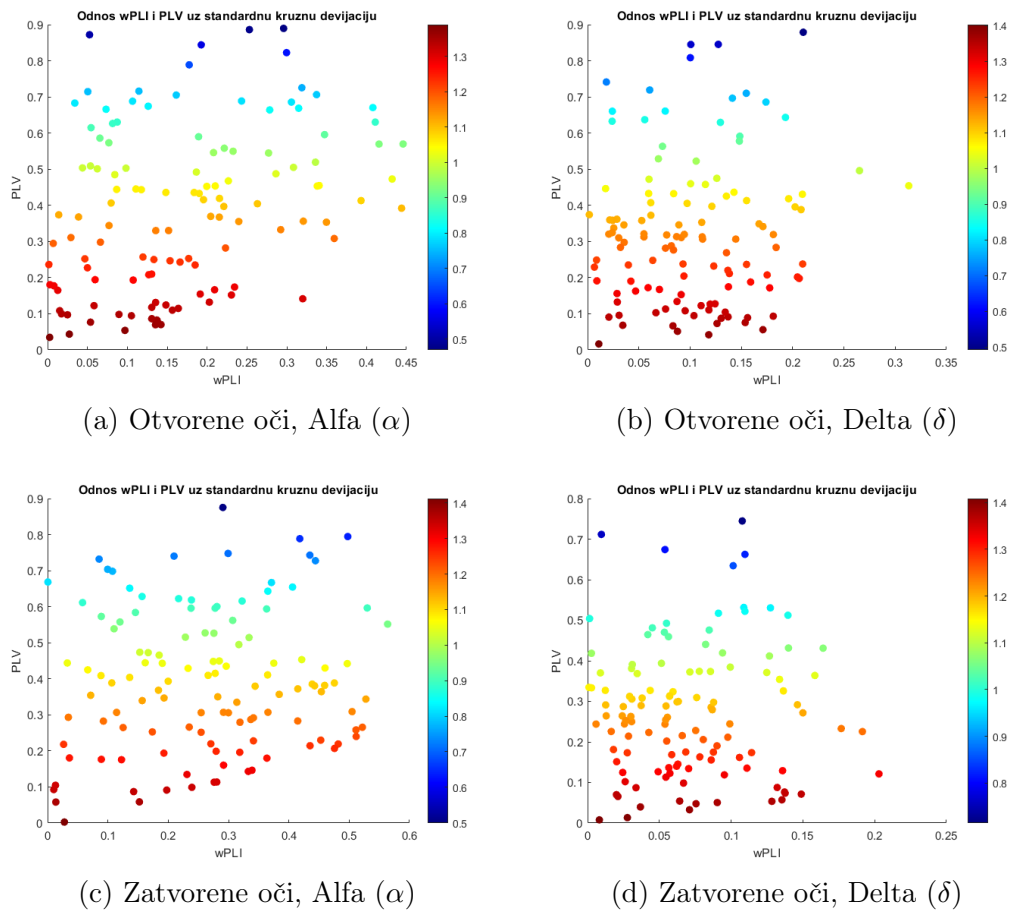
Slika 6.26 Dijagram wPLI i PLV iznosa u podgrupama grupe C gdje A označava prave sinkronizacija, a B predstavlja parove u okolici realne osi. Za slučaj zatvorenih oči u delta (δ) frekvencijskom području.

Četvrti i time zadnji slučaj za ovu grupu predstavlja fazne razlike parova elektroda kod zatvorenih oči u slučaju delta (δ) frekvencijskog pojasa. Pretpostavilo se da će ova grupa biti najmanje povezana, što se može potvrditi činjenicom da postoje samo pet parova za koje možemo tvrditi da su povezani od njih 76. Gdje ostatak predstavlja parove čije su fazne razlike u okolici realne osi i time podložne greški izazvanoj volume conduction-om. To su parovi: T7-F3, P3-C4, Pz-T8, P4-C4 i Oz-C3. Iz inicijalne podjele grupa, moglo se pretpostaviti da u slučaju delta (δ) frekvencijskog pojasa postoji podjednaka povezanost između otvorenih i zatvorenih oči. Ali kao što se zna iz mnogih drugih istraživanja na ovome području zatvaranjem oči povećava se povezanost u alfa (α) pojasu dok u ostalima opada. Kao što se može i vidjeti iz predloženog, gdje ova grupa posjeduje najmanji broj parova za koje možemo tvrditi da su povezani. Iako posjeduje više parova u grupi C, velika većina njih se mogu odbaciti zbog nesigurnosti.

Slika 6.26a prikazuje kod primjene wPLI metode opet vidljivo bolja svojstva od PLV indeksa u ovom slučaju. Moguće je pretpostaviti da nakon pregleda svih četiri slučajeva, wPLI metoda radi ispravno pri procjeni povezanosti s obzirom na greške volume conduction-a. Jedina značajna greška desila se u slučaju alfa (α) frekvencijskog pojasa kod zatvorenih oči gdje je došlo do velike inflacije wPLI indeksa za dva para od njih 90.

6.3 Usporedba svih rezultata

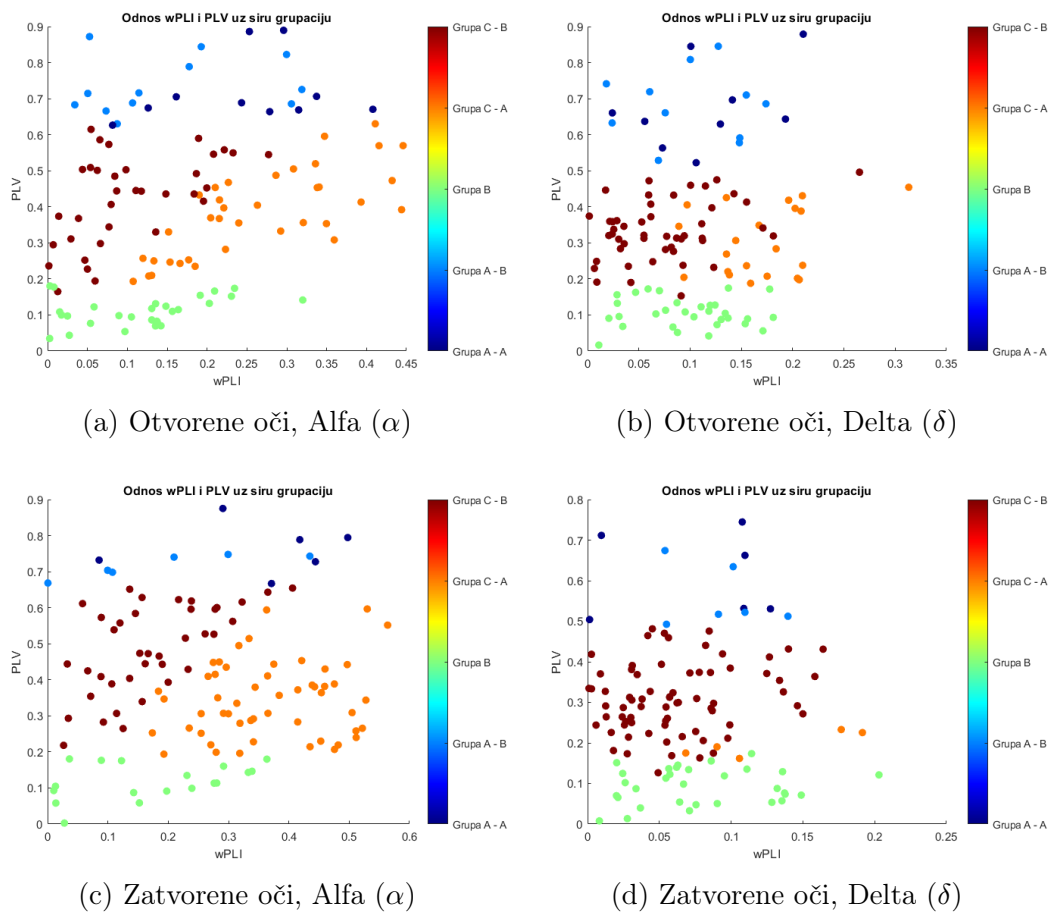
Usporedba svih rezultat u ovom dijelu služit će za dodatnu analizu podataka nakon grupacije svih slučajeva. Kao što su to na primjer, usporedbe wPLI, PLV i kružnih statističkih parametara. S ciljem pronalaska granica koje bi bile u mogućnosti opisati ponašanje wPLI indeksa. Na slici 6.27 se mogu vidjeti odnosi wPLI-a, PLV-a i standardne devijacije. Uočava se korelacija standardne devijacije i PLV člana. Što je i za očekivati gledajući da PLV predstavlja statistički parametar rezultantne dužine vektora (R) koji se nalazi u formuli 5.5 za kružnu standardnu devijaciju.



Slika 6.27 Odnos wPLI i PLV indeksa uz razinu kružne standardne devijacije.

Poglavlje 6. Rezultati

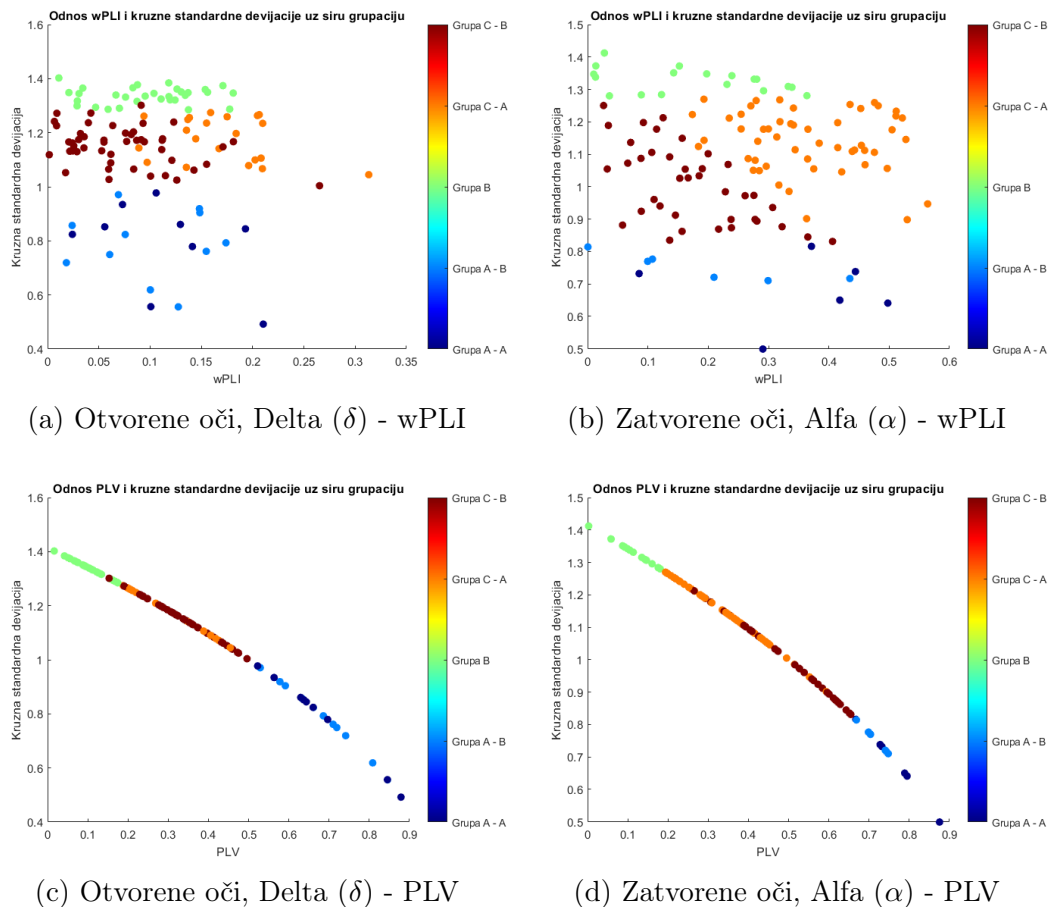
Sljedeća slika 6.28 isto predstavlja odnos wPLI i PLV indeksa samo ovoga puta uz podjelu na grupe i podgrupe. Grupa A podijeljena je na dvije podgrupe (parovi oko nule i parovi oko π) te je i grupa C podijeljena na isto dvije grupe (parovi oko realne osi i parovi koji prikazuju pravu sinkronizaciju). Može se vidjeti iz prikazane slike kako su niske i visoke razine PLV-a dobri indikatori za uniformnost para elektrode ili za slučaj pojave volume conduction-a. wPLI opet ne prikazuje nikakvu jasnu granicu, ali kvalitetnije procijeni parove elektroda koji se nalaze između niskih i visokih vrijednosti PLV-a.



Slika 6.28 Odnos wPLI i PLV indeksa uz podjelu po grupama i podgrupama.

Poglavlje 6. Rezultati

Usporedba PLV i wPLI indeksa direktno s kružnom standardnom devijacijom uz dodatnu podjelu na grupe i podgrupe (6.29), ukazuje opet na iste činjenice kao i slika 6.27. PLV je direktno preko 5.5 vezan za kružnu standardnu devijaciju dok wPLI ne pokazuje nikakve vidljive korelacije. Prikaz je izvršen samo za dva slučaja pošto su druga dva vrlo slična. Moguće je jedino pretpostaviti da veća povezanost upućuje na veće intervale wPLI indeksa.

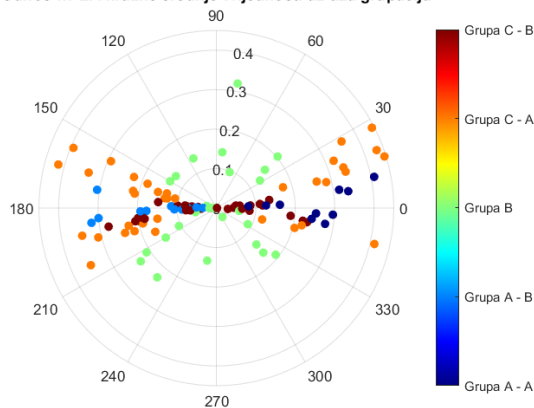


Slika 6.29 Odnos wPLI i PLV indeksa s kružnom standardnom devijacijom uz podjelu po grupama i podgrupama.

Poglavlje 6. Rezultati

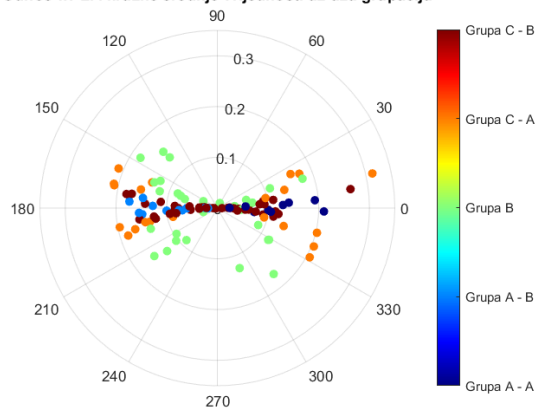
Možda nešto zanimljiviji prikaz se može vidjeti prikazom wPLI i PLV indeksa u polar-
nom obliku uz kut koji predstavlja kružnu srednju vrijednost (6.30). Ponašanja grupe A
i podgrupe C koja se nalazi u blizini realne osi su za očekivati, ali se također može uočiti
visoka raširenost grupe B. Da se grupa B nije prije izbacila kao grupa s parovima čija raz-
dioba liči na uniformnu razdiobu wPLI indeks bi ih ocijenio s visokim iznosom zbog njihove
kružne srednje vrijednosti koja se nalazi u blizini imaginarne osi i time bi došlo do inflacije
povezanosti. Također se može vidjeti kako parove koji se nalaze na realnom osi vrlo efikasno
smanji.

Odnos wPLI i kružne srednje vrijednosti uz uzu grupaciju



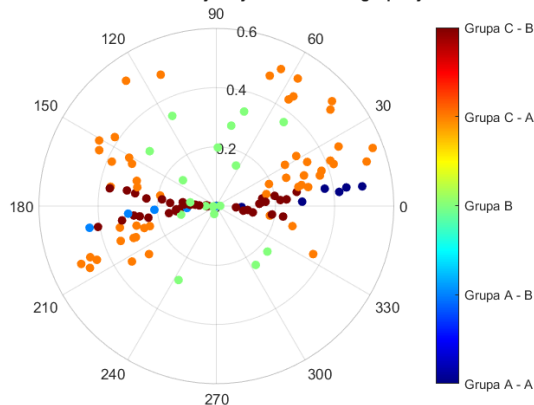
(a) Otvorene oči, Alfa (α)

Odnos wPLI i kružne srednje vrijednosti uz uzu grupaciju



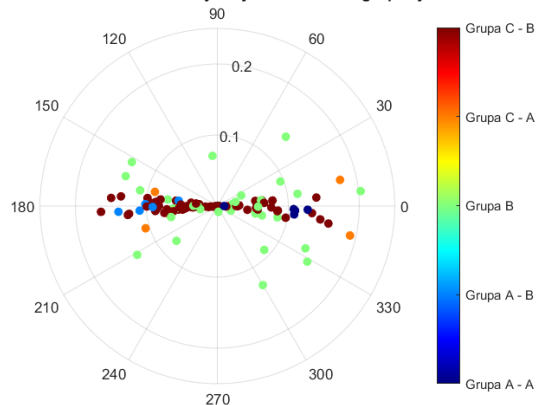
(b) Otvorene oči, Delta (δ)

Odnos wPLI i kružne srednje vrijednosti uz uzu grupaciju



(c) Zatvorene oči, Alfa (α)

Odnos wPLI i kružne srednje vrijednosti uz uzu grupaciju



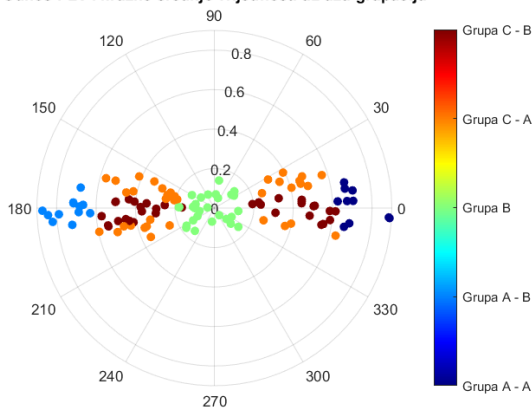
(d) Zatvorene oči, Delta (δ)

Slika 6.30 Odnos wPLI-a i kružne srednje vrijednosti uz podjelu po grupama i podgrupama.

Poglavlje 6. Rezultati

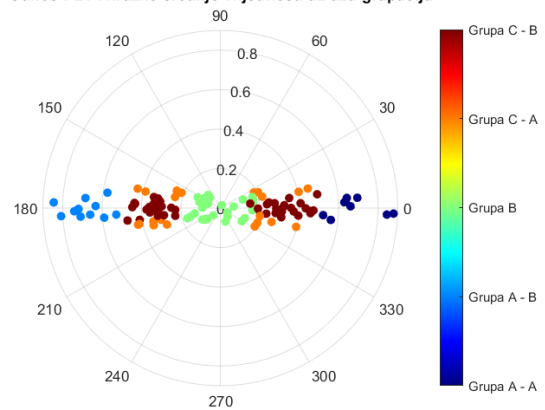
Na kraju također je prikazan isti prikaz samo s PLV indeksom (6.31). Gdje se može uočiti oblik latica oko realne osi kod srednje povezanih slučajeva. Dok kod ekstrema poprma šire ili uže podjele ovisno o razini povezanosti. Usporedbom tih dviju slika može se uočiti svaka pronađena mana s wPLI indeksom. Naime, članovi grupe A i C bi po pretpostavki trebali poprimiti niske ili vrlo niske vrijednosti, ali zbog postojanja raznih nesimetrija, vrlo uske grupacije i kružne srednje vrijednosti približne imaginarnoj osi pojavljuju se greške. Tako se samo parovi iz grupe C vidljivo dobro procijene.

Odnos PLV i kružne srednje vrijednosti uzuzu grupaciju



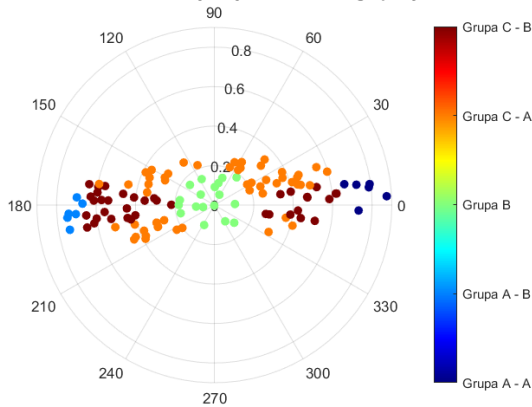
(a) Otvorene oči, Alfa (α)

Odnos PLV i kružne srednje vrijednosti uzuzu grupaciju



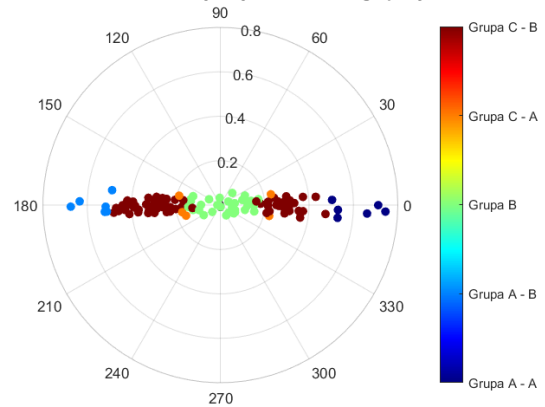
(b) Otvorene oči, Delta (δ)

Odnos PLV i kružne srednje vrijednosti uzuzu grupaciju



(c) Zatvorene oči, Alfa (α)

Odnos PLV i kružne srednje vrijednosti uzuzu grupaciju



(d) Zatvorene oči, Delta (δ)

Slika 6.31 Odnos PLV-a i kružne srednje vrijednosti uz podjelu po grupama i podgrupama.

Poglavlje 7

Zaključak

Ovim radom detaljno se izvršila analiza wPLI metode pomoću tri postupka. Prvi, podrazumijeva usporedbu s PLV metodom koja je jedna od prvih efikasnih metoda za procjenu povezanosti između određenih regija mozga pomoću EEG signala. Usporedbom tih indeksa se potvrdilo da je wPLI metoda efikasnija i robusnija pri procjeni sinkronizacije između dvije elektrode.

Drugi postupak se pak sastojao od grupacije parova elektroda u područjima od interesa. Cilj je bio vidjeti gdje i zašto wPLI metoda krivo procijeni povezanost nekog para. U prvoj grupi, grupa A, pojavile su se dvije karakteristične greške u sva četiri slučaja. Naime, kada bi razdioba bila iznimno uska u neposrednoj blizini realne osi wPLI bi krivo procijenio njenu povezanost pošto se velika većina faznih razlika nalazila ili u gornjoj polovici kružnice ili u donjoj. Slično tako pojavila se i greška zbog nesimetrije. Uzme li se par elektroda čija je fazna razlika grupirana usko oko realne osi, pojava nesimetrije oko kružne srednje vrijednosti koja je bila približno nula. wPLI metoda bi takav par ocijenila s višom povezanošću iako postoji velika mogućnost da je ta povezanost izazvana volume conduction-om. Druga grupa se sastojala od faznih razlika slične uniformnoj te se izrazila greška izazvana pristranošću prema imaginarnoj osi i time dovela do inflacije wPLI indeksa od parova elektroda za koje možemo tvrditi da zapravo nisu povezane.

Na kraju usporedili su se svi parametri korišteni u analizi te se pokušalo pronaći korelacija između njih i wPLI indeksa. Uspostavilo se da nema visoke korelacije ni s jednim od tih parametara kao što na primjer PLV posjeduje.

Bibliografija

- [1] E. Ortiz, K. Stingl, J. Munßinger, C. Braun, H. Preissl, and P. Belardinelli, "Weighted Phase Lag Index and Graph Analysis: Preliminary Investigation of Functional Connectivity during Resting State in Children"
- [2] M. Vinck, R. Oostenveld, M. Van Wingerden, F. Battaglia, and C. M. A. Pennartz, "An improved index of phase- synchronization for electrophysiological data in the presence of volume-conduction, noise and sample-size bias," *NeuroImage*, vol. 55, no. 4, pp. 1548–1565, 2011.
- [3] "Podaci mjerenja", s Interneta, <https://moodle.srce.hr/2020-2021/mod/resource/view.php?id=1954076>, 18.rujan.2022.
- [4] P. L. Nunez., *Neocortical Dynamics and Human EEG Rhythms*, *Neurology* September 1995, vol. 45 no. 9, 1793-1793-a.
- [5] Nancy, Somer Kbah, Sadeem Jafer, Hind Al-Shaalan, Ibraheem. (2016). Controlling a Servo Motor Using EEG Signals from the Primary Motor Cortex. *American Journal of Biomedical Engineering*. 2016. 139-146. 10.5923/j.ajbe.20160605.02.
- [6] Freeman, W. J, Burke, B. C, Holmes, M. D. (2003). Application of Hilbert transform to scalp EEG containing EMG. *Human Brain Mapping*, 19, 248-272. Retrieved from <https://escholarship.org/uc/item/4r77p2j4>
- [7] Berens, P. (2009). *CircStat: A MATLAB Toolbox for Circular Statistics*. *Journal of Statistical Software*, 31(10), 1–21. <https://doi.org/10.18637/jss.v031.i10>
- [8] Lachaux JP, Rodriguez E, Martinerie J, Varela FJ. Measuring phase synchrony in brain signals. *Hum Brain Mapp*. 1999;8(4):194-208. doi: 10.1002/(sici)1097-0193(1999)8:4<194::aid-hbm4>3.0.co;2-c. PMID: 10619414; PMCID: PMC6873296.
- [9] Lee, M., Sanders, R.D., Yeom, SK. et al. Network Properties in Transitions of Consciousness during Propofol-induced Sedation. *Sci Rep* 7, 16791 (2017). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15082-5>

Popis slika

2.1	Frekvencijski pojasevi EEG signala[4]	4
3.1	Primjer analitičkog signala[3]	7
3.2	Primjer analitičkog signala uz dobivenu fazu pomoću Hilbertove transformacije.	8
6.1	Lokacije elektrodi korištenih za mjerenje EEG signala.	15
6.2	Iznos wPLI indeksa kod otvorenih oči.	17
6.3	Iznos wPLI indeksa kod zatvorenih oči.	18
6.4	Iznos wPLI po frekvencijskim područjima i tipu podataka.	19
6.5	Iznos PLV indeksa kod otvorenih oči.	21
6.6	Iznos PLV indeksa kod zatvorenih oči.	22
6.7	Iznos PLV po frekvencijskim područjima i tipu podataka.	23
6.8	Histogram svih faznih razlika sviju parova elektroda.	25
6.9	Dijagram podjele parova elektroda po grupama.	26
6.10	Primjer uske grupacije u blizini realne osi s visokim wPLI-om, PLV-om i kurtosis-om za slučaj otvorenih oči u alfa (α) frekvencijskom području.	29
6.11	Grupa A, otvorene oči, alfa (α)	30
6.12	Grupa A, otvorene oči, delta (δ)	32
6.13	Grupa A, zatvorene oči, alfa (α)	34
6.14	Grupa A, zatvorene oči, delta (δ)	36
6.15	Dijagram wPLI i PLV iznosa u grupi A.	37

Popis slika

6.16	Grupa B, otvorene oči, alfa (α)	40
6.17	Grupa B, otvorene oči, delta (δ)	43
6.18	Grupa B, zatvorene oči, alfa (α)	45
6.19	Grupa B, zatvorene oči, delta (δ)	47
6.20	Dijagram wPLI i PLV iznosa u grupi B.	48
6.21	Dijagram wPLI i PLV iznosa u grupi C.	50
6.22	Dijagram wPLI i PLV iznosa u podgrupama grupe C gdje A označava prave sinkronizacija, a B predstavlja parove u okolini realne osi. Za slučaj otvorenih oči u alfa (α) frekvencijskom području.	51
6.23	Prikaz parova elektroda s vrijednostima koje strše od ostalih.	52
6.24	Dijagram wPLI i PLV iznosa u podgrupama grupe C gdje A označava prave sinkronizacija, a B predstavlja parove u okolini realne osi. Za slučaj otvorenih oči u delta (δ) frekvencijskom području.	52
6.25	Dijagram wPLI i PLV iznosa u podgrupama grupe C gdje A označava prave sinkronizacija, a B predstavlja parove u okolini realne osi. Za slučaj zatvorenih oči u alfa (α) frekvencijskom području.	53
6.26	Dijagram wPLI i PLV iznosa u podgrupama grupe C gdje A označava prave sinkronizacija, a B predstavlja parove u okolini realne osi. Za slučaj zatvorenih oči u delta (δ) frekvencijskom području.	54
6.27	Odnos wPLI i PLV indeksa uz razinu kružne standardne devijacije.	55
6.28	Odnos wPLI i PLV indeksa uz podjelu po grupama i podgrupama.	56
6.29	Odnos wPLI i PLV indeksa s kružnom standardnom devijacijom uz podjelu po grupama i podgrupama.	57
6.30	Odnos wPLI-a i kružne srednje vrijednosti uz podjelu po grupama i podgrupama.	58
6.31	Odnos PLV-a i kružne srednje vrijednosti uz podjelu po grupama i podgrupama.	59

Popis tablica

6.1	Lista elektrodi korištenih za mjerenje EEG signala.	14
6.2	Grupa A, Otvorene oči, Alfa (α) frekvencijskom području	28
6.3	Grupa A, Otvorene oči, Delta (δ) frekvencijskom području	31
6.4	Grupa A, Zatvorene oči, Alfa (α) frekvencijskom području	33
6.5	Grupa A, Zatvorene oči, Delta (δ) frekvencijskom području	35
6.6	Grupa B, Otvorene oči, Alfa (α) frekvencijskom području	39
6.7	Grupa B, Otvorene oči, Delta (δ) frekvencijskom području	41
6.8	Grupa B, Zatvorene oči, Alfa (α) frekvencijskom području	44
6.9	Grupa B, Zatvorene oči, Delta (δ) frekvencijskom području	46
A.1	Grupa C, Otvorene oči, Alfa (α) frekvencijsko područje, Prvi dio	67
A.2	Grupa C, Otvorene oči, Alfa (α) frekvencijsko područje, Drugi dio	68
A.3	Grupa C, Otvorene oči, Delta (δ) frekvencijsko područje, Prvi dio	69
A.4	Grupa C, Otvorene oči, delta (δ) frekvencijsko područje, Drugi dio	70
A.5	Grupa C, Zatvorene oči, Alfa (α) frekvencijsko područje, Prvi dio	71
A.6	Grupa C, Zatvorene oči, Alfa (α) frekvencijsko područje, Drugi dio	72
A.7	Grupa C, Zatvorene oči, Delta (δ) frekvencijsko područje, Prvi dio	73
A.8	Grupa C, Zatvorene oči, Delta (δ) frekvencijsko područje, Drugi dio	74

Sažetak

Abstract

Ovaj rad vrši analizu wPLI indeksa putem usporedbe s PLV metodom. Pokriva osnovnu teoretsku podloga za potrebe razumijevanja EEG signala i potrebnih postupaka prije izvršavanja analize. Osim wPLI i PLV indeksa korištena je grupacije prema polarnim histogramima za detaljniju obradu uz parametre kružne statistike.

Ključne riječi — EEG, wPLI, PLV, kružna statistika

Abstract

This paper presents an analysis of the wPLI index by comparing it with the PLV method. It covers the basic theoretical background for the needs of understanding the EEG signal and the necessary procedures before performing the analysis. In addition to the wPLI and PLV indices, groupings according to polar histograms were used for more detailed processing with circular statistics parameters.

Keywords — EEG, wPLI, PLV, circular statistics

Dodatak A

Naslov priloga

A.1 Grupa C - Tablice

Tablica A.1 Grupa C, Otvorene oči, Alfa (α) frekvencijsko područje, Prvi dio

El 1	El 2	wPLI	PLV/R	circ std	circ mean (°)	Kurtosis
7	6	0.4109	0.6302	0.86	-12.79	0.35
12	11	0.0545	0.6148	0.8777	-1.53	0.3186
16	4	0.3473	0.5956	0.8993	-168.36	0.3053
4	2	0.1894	0.5899	0.9057	-5.92	0.2821
16	14	0.0656	0.5859	0.91	-1.44	0.2883
16	3	0.0768	0.5731	0.924	-175.88	0.2708
14	11	0.4458	0.5697	0.9277	17.05	0.2742
7	2	0.4156	0.5696	0.9278	164.62	0.2729
5	2	0.2216	0.5581	0.9401	-8.34	0.2712
4	1	0.2326	0.5497	0.949	-8.85	0.2427
10	3	0.2081	0.546	0.9529	-170.74	0.2487
6	5	0.2771	0.5448	0.9541	-170.22	0.2651
11	1	0.3359	0.5194	0.9804	164.5	0.2171
5	4	0.0538	0.509	0.991	1.32	0.2148
15	5	0.3083	0.505	0.995	-166.05	0.2181
3	1	0.0438	0.5036	0.9964	1.07	0.2023
7	5	0.0983	0.5028	0.9972	176.48	0.229
11	4	0.0623	0.5011	0.9989	176.29	0.203
15	4	0.1866	0.4921	1.0079	-172.31	0.1803
15	12	0.2863	0.4874	1.0125	13.27	0.1868
16	10	0.0843	0.485	1.0149	-4.56	0.1958
15	7	0.4321	0.4728	1.0268	19.85	0.1767
16	5	0.2267	0.4677	1.0318	-168.59	0.196
13	9	0.3405	0.4548	1.0442	15.72	0.2092
12	2	0.2102	0.4537	1.0453	169.98	0.1564
16	11	0.3382	0.4533	1.0456	17.72	0.1592
13	3	0.1997	0.4524	1.0465	-172.88	0.172
3	2	0.1108	0.4452	1.0533	5.4	0.1469
10	9	0.0867	0.4441	1.0544	4.34	0.1804
13	10	0.1176	0.4434	1.0551	3.18	0.1731
9	7	0.1483	0.4357	1.0624	174.15	0.1586
13	4	0.1837	0.4355	1.0625	-171.47	0.1394
10	1	0.1901	0.4329	1.065	-168.16	0.1548
12	3	0.2156	0.4192	1.0778	168.34	0.1367
6	4	0.1955	0.4156	1.0811	-170.06	0.1294
7	1	0.3931	0.4132	1.0834	157.17	0.1375
15	3	0.0797	0.4064	1.0896	175.39	0.1275
16	12	0.2631	0.4045	1.0914	14.78	0.1417
12	6	0.221	0.397	1.0982	-11.43	0.1296
14	7	0.4439	0.392	1.1027	27.28	0.1169
13	8	0.014	0.3739	1.1191	179.21	0.1285
5	1	0.2046	0.3695	1.1229	-14.2	0.1318
9	3	0.0388	0.3679	1.1244	-177.41	0.1207
10	4	0.2153	0.3674	1.1248	-164.23	0.0914
14	12	0.3207	0.3562	1.1347	21.94	0.0847
14	4	0.2398	0.3552	1.1356	-164.8	0.0742

Tablica A.2 Grupa C, Otvorene oči, Alfa (α) frekvencijsko područje, Drugi dio

El 1	El 2	wPLI	PLV/R	circ std	circ mean (°)	Kurtosis
14	5	0.3496	0.3534	1.1372	-155.56	0.1062
10	8	0.077	0.3443	1.1452	175.98	0.1003
11	3	0.2923	0.3326	1.1553	156.05	0.0768
11	9	0.1518	0.3303	1.1573	-169.75	0.0682
12	7	0.1357	0.3302	1.1574	8.67	0.0949
8	7	0.0293	0.3109	1.174	-4.41	0.1131
16	7	0.3594	0.3083	1.1762	27.99	0.0762
13	7	0.0663	0.2981	1.1848	-174.96	0.0605
14	3	0.0071	0.2947	1.1877	-179.35	0.0609
12	1	0.2231	0.282	1.1983	159.33	0.0619
5	3	0.1196	0.257	1.219	-13.96	0.0365
8	3	0.177	0.2528	1.2224	17.33	0.0535
6	3	0.0468	0.252	1.2231	176.62	0.0351
9	6	0.1333	0.2502	1.2246	169.16	0.0525
10	7	0.1535	0.2467	1.2274	164.58	0.0707
10	2	0.1661	0.243	1.2305	-158.79	0.0386
16	13	0.0016	0.2362	1.2359	4.22	0.0395
7	4	0.185	0.235	1.237	160.54	0.0408
9	5	0.05	0.2272	1.2432	7.3	0.0377
9	8	0.1306	0.2098	1.2571	163.45	0.0355
16	8	0.1269	0.2081	1.2585	168.93	0.031
13	12	0.0596	0.1943	1.2694	5.98	0.0183
13	5	0.1073	0.1932	1.2703	166.97	0.024
12	9	0.0128	0.1649	1.2924	178.92	0.0345
N=70	median=0.1844	median=0.4144			median=0.4279	

Tablica A.3 Grupa C, Otvorene oči, Delta (δ) frekvencijsko područje, Prvi dio

El 1	El 2	wPLI	PLV/R	circ std	circ mean (°)	Kurtosis
15	11	0.2652	0.496	1.004	8.1	0.2085
11	5	0.126	0.4748	1.0249	-172.36	0.2145
4	2	0.0599	0.4722	1.0274	-1.46	0.2223
7	6	0.1005	0.4599	1.0393	-1.89	0.2086
4	1	0.1149	0.4578	1.0413	-3.27	0.2218
14	11	0.3132	0.4542	1.0448	12.58	0.1609
12	5	0.0176	0.4463	1.0524	179.4	0.1567
7	2	0.1428	0.4363	1.0618	176.56	0.1924
11	7	0.0596	0.4329	1.065	-0.16	0.1797
12	4	0.084	0.4325	1.0654	177.12	0.1709
11	1	0.2095	0.4308	1.067	166.79	0.1622
6	5	0.1354	0.4254	1.072	-168.58	0.1537
15	5	0.1961	0.4184	1.0786	-168.91	0.1463
10	2	0.1551	0.4132	1.0834	-171.7	0.1629
10	9	0.0616	0.4074	1.0887	3.46	0.1667
16	11	0.0971	0.4055	1.0904	11.71	0.1517
12	11	0.1212	0.3973	1.0979	-5.55	0.1507
5	2	0.2024	0.3957	1.0993	-13.94	0.1414
14	8	0.2083	0.3882	1.1062	167.55	0.1468
9	3	0.0017	0.3743	1.1187	-178.87	0.1505
13	10	0.0618	0.3725	1.1202	-2.66	0.1382
6	4	0.0286	0.3616	1.13	179.98	0.1114
16	3	0.0217	0.3597	1.1316	179.08	0.1393
15	12	0.0245	0.3587	1.1325	0.14	0.1135
13	4	0.0528	0.358	1.1332	-176.43	0.1024
16	12	0.1113	0.353	1.1376	8.27	0.1079
16	5	0.1672	0.3489	1.1411	-165.54	0.1076
7	5	0.089	0.346	1.1437	-168.76	0.1451
15	4	0.0354	0.3458	1.1438	-177.98	0.1141
16	8	0.171	0.3413	1.1477	170.58	0.1246
11	4	0.0255	0.3374	1.1512	176.18	0.0945
16	13	0.0241	0.3246	1.1622	2.56	0.091
15	3	0.055	0.3212	1.1652	176.6	0.101
3	1	0.0207	0.3204	1.1659	1.25	0.0899
16	4	0.0944	0.3196	1.1665	-173.07	0.1222
7	1	0.1812	0.3192	1.1669	171.24	0.127
13	3	0.0772	0.3182	1.1678	-179.91	0.0955
9	1	0.0869	0.3133	1.1719	-174.94	0.0924
15	10	0.1119	0.3129	1.1723	-8.61	0.0898
14	10	0.055	0.3127	1.1724	-3.26	0.0749
13	9	0.0914	0.3108	1.174	-7.96	0.1023
13	1	0.0304	0.3101	1.1746	177.36	0.0785
10	4	0.1445	0.3067	1.1776	-168.91	0.1192
12	2	0.1122	0.3066	1.1776	173.78	0.0742
13	2	0.0357	0.2976	1.1852	178.31	0.063
14	4	0.0817	0.288	1.1933	-172.78	0.0946
14	12	0.0321	0.2838	1.1968	-0.7	0.0671
14	5	0.1839	0.2835	1.197	-162.89	0.0687
12	6	0.076	0.2816	1.1986	-5.22	0.0681
15	7	0.0838	0.2765	1.2029	5.13	0.0915
4	3	0.1355	0.2689	1.2092	-15.16	0.06
13	8	0.0088	0.2486	1.2259	179.58	0.0898
3	2	0.0636	0.2478	1.2266	6.56	0.0603
15	8	0.2098	0.2377	1.2347	158.18	0.0674
16	7	0.0931	0.2377	1.2347	4.67	0.0863
10	8	0.155	0.2365	1.2357	166.35	0.0329
15	13	0.0398	0.235	1.2369	-7	0.0408

Tablica A.4 Grupa C, Otvorene oči, delta (δ) frekvencijsko područje, Drugi dio

El 1	El 2	wPLI	PLV/R	circ std	circ mean (°)	Kurtosis
9	4	0.1231	0.232	1.2393	-170.25	0.097
14	3	0.0067	0.2291	1.2417	-177.85	0.0675
10	6	0.1368	0.2201	1.2489	15.19	0.0732
7	4	0.1383	0.2114	1.2559	158.54	0.0556
8	1	0.1751	0.2075	1.259	22.75	0.0564
16	9	0.094	0.2044	1.2614	-11.32	0.0486
9	5	0.2047	0.2018	1.2635	-21.7	0.0642
5	1	0.2064	0.1978	1.2667	-28.03	0.0443
14	13	0.0091	0.191	1.272	-0.76	0.0217
12	7	0.0422	0.1902	1.2726	-2.01	0.0499
8	2	0.159	0.1879	1.2745	24.91	0.0535
14	7	0.0913	0.1531	1.3015	8.54	0.071
N=69		median=0.0931	median=0.3196			median=0.3821

Tablica A.5 Grupa C, Zatvorene oči, Alfa (α) frekvencijsko područje, Prvi dio

El 1	El 2	wPLI	PLV/R	circ std	circ mean (°)	Kurtosis
16	3	0.4062	0.6546	0.8312	-170	0.3619
10	7	0.1362	0.6514	0.835	-175.37	0.3738
14	9	0.3651	0.6431	0.8449	170.54	0.3586
15	8	0.1567	0.6284	0.8621	176.09	0.3378
14	11	0.2173	0.6224	0.869	5.38	0.3464
16	13	0.2385	0.6187	0.8733	5.43	0.3149
15	3	0.3225	0.6158	0.8766	-171.36	0.3336
16	8	0.058	0.6115	0.8815	177.86	0.3125
15	5	0.2807	0.6005	0.8939	-173.48	0.3207
4	2	0.53	0.5966	0.8982	16.47	0.3192
13	4	0.2379	0.5959	0.899	173.8	0.2926
12	1	0.2777	0.5958	0.8991	171.07	0.2957
12	2	0.3632	0.5938	0.9013	169.65	0.3115
2	1	0.1457	0.584	0.9121	2.99	0.2975
16	7	0.0891	0.573	0.9241	177.43	0.2717
11	5	0.3069	0.5621	0.9358	170.11	0.2648
9	6	0.1201	0.5577	0.9405	-176.37	0.2589
4	1	0.5638	0.5517	0.9469	20.35	0.2561
13	7	0.1102	0.5388	0.9605	177.52	0.257
16	5	0.2612	0.5274	0.9722	-172.35	0.2494
3	2	0.2758	0.5265	0.9732	9.96	0.2409
14	6	0.2284	0.5155	0.9843	-8.92	0.2259
10	3	0.334	0.5145	0.9854	-167.43	0.225
7	3	0.3171	0.495	1.005	11.67	0.2044
5	3	0.1529	0.4737	1.026	4.71	0.1931
15	13	0.1668	0.4726	1.0271	4.97	0.1835
15	7	0.1849	0.4658	1.0337	172.99	0.179
8	3	0.4214	0.4532	1.0457	19.7	0.1857
8	5	0.2848	0.4494	1.0494	13.16	0.177
14	8	0.2748	0.4482	1.0505	166.56	0.1569
13	2	0.1619	0.4446	1.054	-171.54	0.1774
10	8	0.0327	0.444	1.0545	-177.81	0.1627
13	12	0.375	0.4435	1.055	18.54	0.1713
13	10	0.1902	0.4431	1.0554	-8.57	0.168
15	2	0.4968	0.4422	1.0562	-156.84	0.1962
15	14	0.2962	0.435	1.063	13.87	0.1591
16	1	0.46	0.43	1.0677	-157.94	0.1272
14	2	0.233	0.4291	1.0685	-170.27	0.1731
8	7	0.0666	0.4248	1.0725	-3.74	0.1429
6	5	0.2779	0.4152	1.0815	-166.24	0.1246
9	5	0.3648	0.4109	1.0855	16.42	0.1514
11	6	0.2662	0.4096	1.0866	-14.75	0.1211
14	4	0.0886	0.4089	1.0873	174.6	0.136
10	4	0.1361	0.404	1.0918	-172.61	0.1247
7	4	0.1999	0.3933	1.1015	9.92	0.12
16	10	0.1065	0.3887	1.1057	-7.11	0.1064
16	2	0.4755	0.3885	1.1059	-153.95	0.1526
12	3	0.4388	0.3854	1.1087	154.52	0.1324
11	7	0.4594	0.3818	1.1119	25.95	0.1332
15	1	0.4427	0.3806	1.113	-155.79	0.1206
10	1	0.3441	0.3795	1.114	-160	0.1085
5	1	0.4148	0.3722	1.1205	21.71	0.1399
12	11	0.1838	0.3684	1.1239	-10.06	0.1063
11	4	0.4539	0.3643	1.1275	150.79	0.107
9	1	0.384	0.3569	1.1341	157	0.08
8	6	0.0715	0.3543	1.1364	176.36	0.0792
N=90	median=0.2801	median=0.391				median=0.4809

Tablica A.6 Grupa C, Zatvorene oči, Alfa (α) frekvencijsko područje, Drugi dio

El 1	El 2	wPLI	PLV/R	circ std	circ mean ($^{\circ}$)	Kurtosis
11	9	0.2822	0.3502	1.14	162.41	0.098
13	5	0.1931	0.3468	1.143	169.37	0.1151
12	8	0.5277	0.3437	1.1457	42.16	0.074
9	8	0.1569	0.3395	1.1493	9.32	0.0866
7	1	0.3138	0.3349	1.1533	19.25	0.0926
15	11	0.5048	0.3091	1.1755	40.19	0.0772
12	6	0.2917	0.3071	1.1772	-158.86	0.0667
6	1	0.3653	0.3071	1.1772	-26.35	0.0497
15	9	0.1145	0.3068	1.1775	173.6	0.0816
11	10	0.2546	0.3063	1.1779	-163.08	0.0996
13	6	0.2998	0.3059	1.1782	-158.93	0.0581
11	1	0.0345	0.2932	1.1889	175.49	0.0728
13	9	0.3413	0.2918	1.1901	25.88	0.0607
11	3	0.337	0.2871	1.194	151	0.0657
12	5	0.4147	0.2831	1.1974	145.82	0.0879
7	6	0.0926	0.2827	1.1978	-9.63	0.0567
13	8	0.319	0.2795	1.2004	153.38	0.0502
6	4	0.2348	0.2661	1.2115	-163.19	0.0303
12	4	0.5219	0.2657	1.2119	125.81	0.0929
15	10	0.1252	0.2648	1.2126	-9.8	0.0515
8	2	0.5113	0.2582	1.218	57.42	0.0632
10	9	0.1737	0.2527	1.2225	13.47	0.0346
16	14	0.2546	0.2517	1.2234	22.04	0.0469
8	1	0.5117	0.2401	1.2328	64.7	0.0611
15	12	0.4529	0.2299	1.241	54.87	0.0887
6	2	0.3413	0.228	1.2426	-146.72	0.0107
12	9	0.2707	0.2197	1.2493	30.99	0.0091
11	8	0.4818	0.2192	1.2496	112.96	0.0322
9	7	0.0266	0.2183	1.2503	179.61	0.0255
16	12	0.4351	0.2144	1.2534	55.86	0.0731
16	11	0.4757	0.207	1.2594	67.69	0.0296
12	10	0.2794	0.1991	1.2656	-144.51	0.0268
9	4	0.3186	0.1962	1.2679	32.03	0.0277
14	7	0.1929	0.1939	1.2697	22.69	0.0373
N=90		median=0.2801	median=0.391			median=0.4809

Tablica A.7 Grupa C, Zatvorene oči, Delta (δ) frekvencijsko područje, Prvi dio

El 1	El 2	wPLI	PLV/R	circ std	circ mean (°)	Kurtosis
10	7	0.0451	0.4813	1.0185	-175.9	0.2302
16	13	0.0847	0.4757	1.024	-4.86	0.2039
16	3	0.0535	0.4703	1.0293	-178.42	0.2105
12	2	0.042	0.4646	1.0348	-178.13	0.1898
13	3	0.0564	0.4594	1.0398	-176.62	0.1857
9	6	0.0822	0.4404	1.0579	-179.94	0.1904
6	1	0.1399	0.4315	1.0663	4.92	0.2098
9	1	0.1641	0.4311	1.0667	-177.15	0.1608
12	1	0.094	0.4195	1.0775	177.2	0.1755
15	3	0.0027	0.4185	1.0784	-179.9	0.1852
11	5	0.1267	0.4118	1.0846	-174.37	0.1482
16	1	0.0515	0.3939	1.101	177.74	0.1574
15	2	0.0311	0.3909	1.1037	-178.79	0.1452
14	9	0.0994	0.3844	1.1096	-179.63	0.1438
10	3	0.0306	0.3811	1.1126	-177.98	0.1464
13	12	0.0779	0.374	1.1189	5.64	0.1143
2	1	0.0856	0.3736	1.1193	-4.22	0.1489
15	5	0.0713	0.3725	1.1203	-176.34	0.1506
13	4	0.1248	0.3711	1.1215	-174.98	0.1645
16	2	0.0089	0.3702	1.1223	-176.54	0.1141
13	2	0.0346	0.3684	1.1239	-176.76	0.1347
15	13	0.1584	0.3639	1.128	-8.91	0.1159
4	1	0.1337	0.3541	1.1366	-4.26	0.1503
12	3	0.0009	0.3345	1.1537	179.52	0.0956
15	11	0.0027	0.3334	1.1546	1.52	0.1003
6	5	0.0124	0.3271	1.1601	-173.74	0.1114
11	4	0.0436	0.3269	1.1602	-179.78	0.097
13	6	0.1364	0.3258	1.1612	174.26	0.1335
10	1	0.0595	0.3237	1.163	-175.28	0.0848
12	11	0.0572	0.3134	1.1718	3.95	0.1138
10	2	0.0571	0.3126	1.1725	-4.92	0.0919
15	14	0.0293	0.3123	1.1728	0.7	0.1006
16	12	0.076	0.3094	1.1753	-1.4	0.0735
11	10	0.038	0.3082	1.1763	-178.02	0.0842
11	7	0.0309	0.3057	1.1784	1.92	0.1023
10	9	0.0633	0.2997	1.1835	7.51	0.1094
16	5	0.0623	0.2987	1.1843	-173.24	0.0984
15	1	0.0878	0.2976	1.1852	176.65	0.1096
15	12	0.1462	0.2917	1.1902	-7.37	0.1052
14	11	0.0126	0.2911	1.1907	-1.99	0.0776
14	4	0.0373	0.2897	1.1919	172.67	0.0896
9	5	0.0546	0.2885	1.1929	-2.86	0.092
7	6	0.0249	0.2871	1.194	2.74	0.1083
9	3	0.086	0.2854	1.1955	-176.91	0.0923
11	1	0.0869	0.2793	1.2006	176.11	0.0878
6	4	0.15	0.2717	1.2069	175.61	0.0705
8	4	0.013	0.2643	1.213	-0.88	0.0786
9	7	0.0242	0.2642	1.2131	-178.16	0.0987

Tablica A.8 Grupa C, Zatvorene oči, Delta (δ) frekvencijsko područje, Drugi dio

El 1	El 2	wPLI	PLV/R	circ std	circ mean (°)	Kurtosis
16	7	0.0302	0.2628	1.2142	173.08	0.0635
7	3	0.0556	0.2607	1.216	3.56	0.0675
13	7	0.0544	0.2543	1.2212	174.92	0.0607
16	11	0.0266	0.2526	1.2226	-0.06	0.0542
14	2	0.0307	0.25	1.2247	178.85	0.0725
12	6	0.0991	0.2444	1.2293	173.43	0.0977
7	2	0.0257	0.2443	1.2294	174.32	0.0613
10	6	0.0059	0.2439	1.2297	-172.51	0.0728
3	2	0.0539	0.2437	1.2298	7.83	0.0743
6	3	0.1767	0.2329	1.2386	12.04	0.0724
12	5	0.0753	0.2281	1.2425	-172.61	0.0448
7	5	0.0165	0.2257	1.2444	-177.6	0.0589
13	9	0.1914	0.2255	1.2446	-12.5	0.0525
14	6	0.0427	0.2233	1.2464	-7.04	0.0666
14	7	0.066	0.2155	1.2526	3.86	0.0534
7	1	0.0285	0.2142	1.2536	-0.52	0.07
13	10	0.0977	0.2116	1.2557	-9.65	0.0318
8	6	0.0806	0.2057	1.2604	173.38	0.0503
8	1	0.0551	0.2021	1.2632	-174.89	0.0541
15	7	0.0902	0.1904	1.2725	167.21	0.0676
10	5	0.018	0.1812	1.2797	1.94	0.0483
11	9	0.0684	0.1751	1.2844	-169.46	0.0187
10	8	0.0876	0.1747	1.2847	-175.42	0.0255
10	4	0.0277	0.1732	1.2859	-177.61	0.0237
11	3	0.0586	0.1685	1.2896	172.55	0.0433
14	1	0.0782	0.163	1.2938	5.76	0.0541
12	10	0.1058	0.1617	1.2948	-162.82	0.0398
15	9	0.0492	0.1265	1.3218	-174.08	0.0327
N=76	median=0.0568	median=0.2946			median=0.2719	