Naivna korelacijska tehnika iskanja signala ENF v zvočnem posnetku

Jakob Marušič

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija

Vpisna številka: 63170196

E-pošta: jm8166@student.uni-lj.si

**Povzetek.** Iskanje frekvence električnega omrežja (ang. *electric network frequency, ENF*) v zvočnih in video posnetkih je v zadnjem času dodobra raziskano področje. V večini primerov se ga predstavi kot težak problem detekcije in iskanja frekvenčnih komponent, v članku ga zasnujemo kot naiven korelacijski pristop z minimalnim pred procesiranjem. Implementacijo smo tekom poskusov testirali v okolju z nadzorovanimi spremenljivkami, preden smo izvedli zadnji poskus na realnem zvočnem posnetku.

**Ključne besede:** signal ENF, korelacija signala, filtriranje signala, zvočni posnetek

# UVOD

Frekvenca električnega omrežja je posledica uporabe izmenične napetosti. To pomeni, da se vrednost napetosti enakomerno periodično izmenjuje med pozitivno in negativno vrednostjo. Čeprav je v Evropi frekvenca omrežja 50Hz, se ta, zaradi uravnavanja porabe in obremenitve omrežja, rahlo vendar stalno spreminja[4].

Za porabnike električne energije je značilno, da med porabo del energije resonirajo v obliki šuma (zvočnega ali vidnega). Ta šum je enak trenutni frekvenci električnega omrežja, vendar je prešibek, da bi ga (v večini primerov) lahko zaznali s človeškimi čutili. Ga pa lahko zaznajo (in zajamejo) naprave za zajem videa in zvoka.

Ob dejstvu, da se frekvenca električnega omrežja ves čas spreminja, hkrati pa jo lahko zajamemo v zvočne in video posnetke, lahko zajem umestimo v daljši časovni prostor. Takšno tehniko imenujemo iskanje signala ENF.

Tehnika je v zadnjem času dodobra raziskana in tudi uporabljena, kot forenzična tehnika s katero so definirali čas nastanka zvočnega posnetka na podlagi komponente ENF v tem.

# Predlagana rešitev

Iskanje komponente NEF je običajno definirana kot težek problem[4] zaradi velikega števila neznanih spremenljivk, neznane prisotnosti signala ENF in velike količine šuma v posnetku. Običajno se zato pred samim postopkom umestitve signala ENF v časovni prostor, izvede detekcija signal ENF in pred procesiranje. Detektorji so običajno definirani kot statistični testi, kjer se išče optimalne nastavitve za detekcijo.

Za razliko od predstavljanih rešitev, se v okviru projekta osredotočimo na zasnovo naivne rešitve za detekcijo signala ENF z iskanje najvišje korelacije med testnim in referenčnim signalom[5]. Testni signal bomo pred tem obdelali zgolj z uporabo »bandpass« filtra, ki bo v posnetku ohranil zgolj frekvenčne komponente v območju, kjer lahko pričakujemo osnovno frekvenco električnega omrežja (med 48 in 52 Hz). V raziskavo ne vključujemo iskanja komponent ENF v območju višjih harmonikov.

# Metodologija

Predlagano rešitev testiramo v štirih poskusih.

V prvem poskusu testiramo iskanje najvišje korelacije med testnim posnetkom in referenčnim posnetkom signal ENF, pri čemer je testni signal zgolj izsek referenčnega signala, brez dodanega šuma. Testnega signala ne filtriramo. Korelacija med dvema enakima izsekoma mora biti (pričakovano) enaka 1.

Pri drugem poskusu testnemu signalu dodamo sintetični beli Gaussov šum. Korelacijo med testnem in referenčnem signalom računamo brez dodatnega filtriranja pri različnih nastavitvah šuma (standardne deviacije porazdelitve moči šuma) in pri različnih dolžinah testnega signala.

Pri tretjem poskusu testni signal z dodanim belim Gaussovim šumom dodatno filtriramo. Pri tem uporabimo bandpass filter z različnimi stopnjami. Dolžino testnega posnetka definiramo z rezultati drugega poskusa.

Pri četrtem poskusu uporabimo testne signale pridobljene iz zvočnih posnetkov z zaznavnim signalom ENF. Korelacijo izvajamo z referenčnim posnetkom komponente ENF. Dolžina testnega signala je definirana v drugem poskusu, nastavitve filtra pa z rezultati tretjega poskusa.

Poskusi so deloma ali v celoti objavljeni v okviru projektnega repozitorija[2]. Signali so bili pridobljeni iz spletne zbirke[1] ali posneti v laboratoriju z uporabo mobilnega telefona in osciloskopa[2].

# Rezultati testiranj

## Testiranje korelacije med znanima signaloma

Prvi poskus nam služi zgolj kot testiranje pravilnega delovanja korelacijske funkcije. Poskus izvedemo z uporabo referenčnega zvočnega posnetka signala ENF, testni signal je zgolj naključno dolg izsek referenčnega posnetka z naključnim posnetkom.

Rezultat poskusa je enak pričakovanim rezultatom – v vseh primerih zaznamo začetek testnega signala v referenčnem kot najvišjo korelacijo med obema signaloma. Korelacija je v vseh testiranih pogojih enaka ena oz. dovolj blizu, da lahko razliko pripišemo nenatančnosti plavajoče vejice.

Iz rezultatov poskusa, lahko sklepamo, da je uporabljena korelacijska metoda primerna za nadaljnjo testiranje, pri katere začnemo vpeljevati neznane komponente (npr. šum).

## Vpliv dolžine šumnega testnega signala na pravilnost korelacije

Pri drugem poskusu smo testnemu signalu dolžine 30, 60 in 90 sekund dodali sintetični beli Gaussov šum *(slika 1)*.

Testni signal predstavlja izsek daljšega referenčnega posnetka signala ENF z naključnim začetkom v posnetku.

Test, ki je del poskusa, je uspešno prestavljen, če korelacijska funkcija zazna najvišje ujemanje testnega in referenčnega signala v točki referenčnega signala, kjer se začne izsek testnega signala.

### Generiranje belega Gaussovega šuma

Testnemu signalu ENF dodamo sintetični beli Gaussov šum, pri čemer poskušamo replicirati pričakovan šum v realnem posnetku. Šum je apliciran čez celotno trajanje referenčnega posnetka, pri čemer je standardna deviacija šuma naključno izbrana med 0,01 in 0,25. Takšno standardno deviacijo Gaussovega šuma lahko pričakujemo tudi v realnih zvočnih posnetkih.

### Ovrednotenje rezultatov

Kot je prikazano v *tabeli 1*, so rezultati korelacije odvisni od dolžine testnega posnetka, pri čemer smo daljši posnetek uspeli večkrat pravilno korelirati z referenčnim posnetkom.

Kot nadgradnjo poskusa bi bilo smiselno testni posnetek še podaljšati, na npr. 120 in 180 sekund. V tem trenutku zgolj predvidevamo, da bi se uspešnost pravilnih korelacij linearno povečevala, vendar bi se s tem zmanjševala realna vrednost poskusa, saj ne moremo zagotoviti, da bomo vedno imeli dovolj dolg testni signal v primerjavi z referenčnim.

Za nadaljnji, tretji poskus, se odločimo, da bomo testne signale omejili na 90 sekund.

Tabela 1: Rezultat drugega poskusa: pravilne korelacije med testnim in referenčnim posnetkom v odvisnosti od dolžine testnega posnetka

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Dolžina testnega posnetka [s]** | **Pravilna korelacija** | **Napačna korelacija** | **Natančnost [%]** |
| 30 | 5 | 15 | 33 |
| 60 | 6 | 9 | 40 |
| 90 | 7 | 9 | 47 |

Slika, ki vsebuje besede besedilo, svinčnik, igla

Opis je samodejno ustvarjen

Slika 1: Primerjava nešumnega signala s signali, katerim je bil dodan bel Gaussov šum različnih deviacij

## Vpliv stopnje filtra na pravilnost korelacije

V tretjem poskusu nadaljujemo iskanje optimalnih nastavitev znanih spremenljiv. Korelacijo računamo med filtriranim 90 sekundnim testnim signalom z dodanim belim Gaussovim šumom in referenčnim signalom s frekvenčnimi komponentami ENF.

Korelacijo definiramo kot pravilno, če je izračunana najvišja korelacija v točki referenčnega signala, ki predstavlja začetek izseka testnega signala.

### Bandpass filter

V vseh testih uporabljamo »butter bandpass filter«, ki filtrira vse frekvenčne komponente, ki se ne nahajajo v območju osnovne frekvenčne komponente ENF (med 48 in 52 Hz).

Graf (*slika 2*) prikazuje frekvenčno karakteristiko filtra pri različnih stopnjah, graf (*slika 3*) prikazuje nefiltriran in filtriran šumni signal pri različnih stopnjah filtra.

### Ovrednotenje rezultatov

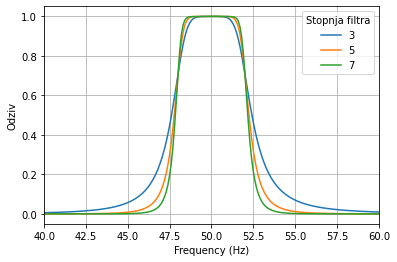
Kot je razvidno iz *tabele 2* je uspešno korelacije najvišja pri stopnji filtra 6, vendar še takrat zgolj malenkost boljša od 50%.

Že rezultati v dobro nadzorovanih pogoji nakazujejo, da korelacijska tehnika ni primerna za natančno iskanje komponent signala ENF.

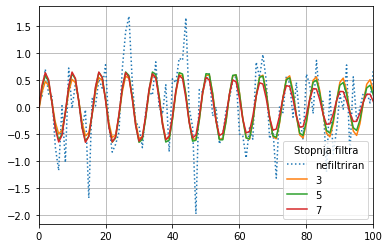
Vendar, v primeru, ko najvišja korelacija ni enaka »pravi« korelaciji, se izkaže, da je razlika korelacije minimalna (običajno manj kot nekaj odstotkov, pogostokrat manj kot 1% - zanemarljivo majhna razlika). Zaradi tega s poskusi nadaljujemo.

Tabela 2: Rezultat tretjega poskusa: pravilne korelacije med testnim in referenčnim posnetkom v odvisnosti od stopnje filtra

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Stopnja filtra (t = 90 s)** | **Pravilna korelacija** | **Napačna korelacija** | **Natančnost [%]** |
| Brez filtra | 18 | 27 | 40 |
| 4 | 20 | 25 | 44 |
| 6 | 23 | 22 | 51 |
| 8 | 19 | 26 | 42 |



Slika : Frekvenčna karakteristika uporabljenega filtra



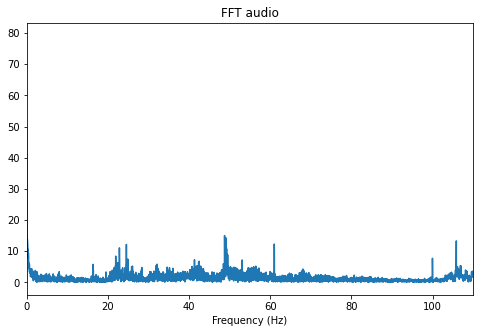
Slika : Primerjava filtriranega in nefiltriranega signala

## Testiranje korelacijske tehnike na realnih posnetkih

V zadnjem poskusu testiramo optimizirano korelacijsko tehniko – stopnja filtra je nastavljena na 6, dolžina posnetka je 90 sekund. Korelacijo izvajamo med testnim signalom pridobljenim iz realnega zvočnega posnetka z zaznavno frekvenco električnega omrežja in referenčnim posnetkom pridobljenim iz meritev osciloskopa.

Za razliko od prejšnjih poskusov, je v tem detekcija in korelacija še težji problem, saj so v testnem signalu prisotne raznorazne (močnejše) komponente. Tako lahko signal ENF razberemo na frekvenčnem spektru (*slika 4*), ne pa tudi na spektrogramu iz katerega izvajamo korelacijo (*slika 5*).

Omenjeni problemi se izkažejo kot nerazrešljivi z uporabo našega pristopa. Izmed 100 90-sekundnih posnetkov nismo pravilno korelirali niti enega testnega signala, tudi korelacija je veliko manjša od prejšnjih testov (običajno manj kot 10%).



Slika : Izsek frekvenčnega spektra realnega posnetka z zaznavnim signalom ENF

Slika, ki vsebuje besede besedilo, monitor, zaslon, televizija

Opis je samodejno ustvarjen

Slika : Spektrogram realnega posnetka (v dB), signal ENF je slabo oz. ne zaznaven

# Izboljšave korelacijske tehnike

Na tem mestu predlagamo izboljšave korelacijske tehnike.

Prva nadgradnja korelacijske tehnike bi bila računanje korelacije v višje harmonskih legah, pri čemer bi nujno morali vpeljati tudi detekcijo signala ENF (trenutna različica prisotnost frekvenc predpostavlja).

Naslednja logična nadgradnja, bi bila združevanje korelacij posnetkov različnih harmonskih leg[3] skupaj z osnovno. Ta predlog izhaja iz pridobljenih podatkov 2. in 3. poskusa, ki kažejo, da najvišja korelacija za relativno majhno vrednost »preglasi« korelacijo v pravem času.

Tehniko bi lahko nadgradili tudi z dodatnim apriori znanjem, s katerim bi potencialno zmanjšali število potrebnih korelacijskih primerjav z povečanjem razlike med testiranimi okni referenčnega posnetka. S tem bi se potencialno zmanjšala tudi časovna zahtevnost alogritma.

Končna nadgradnja bi lahko izboljšanje kakovosti razmerja SNR (ang. *signal to noise ratio*) v testnem posnetku.

Nobena izmed predlaganih izboljšav sicer ni bila testirana. Vprašljiva pa je tudi smiselnost, sploh glede nato, da obstajajo natančnejše tehnike zaznave.

# Zaključek

Tekom projekta smo sestavili in raziskali uporabno vrednost naivne rešitve iskanja korelacije med testnim in referenčnim posnetkom na podlagi prisotnosti frekvence električnega omrežja.

Naivno rešitev smo sestavili iz pred procesiranja in filtriranja testnega signala ter nadalje implementacije korelacije med testnim in referenčnim posnetkom, pri čemer smo predpostavili, da najvišja korelacija predstavlja začetek testnega posnetka v (daljšem) referenčnem.

Po testiranju z sintetičnimi (nadzorovanimi) spremenljivkami (količina šuma, moč šuma, filter) smo ugotovili, da je uspešno rešitve odvisna od nastavitve filtra in dolžine posnetka.

Predlagana rešitev se ni izkazala za dobro pri testiranju realnih zvočnih posnetkov, saj iz njih nismo s predlagano tehniko uspeli izločiti dovoljšen del šuma in vsebine, da bi lahko z gotovostjo poiskali korelacijo med testnim signalom in referenčnim signalom ENF.

Kot dodatno težavo predlagane rešitve navajamo še veliko časovno zahtevnost algoritma. Zaradi vseh navedenih težav, lahko kot zaključek trdimo, da predlagana rešitev ni primerna za resno uporabo izven strogo nadzorovanih parametrov.

# Literatura

1. ENF WHU Dataset, [https://github.com/ghuawhu/ENF-WHU-Dataset (1](https://github.com/ghuawhu/ENF-WHU-Dataset%20(1). 2. 2022).
2. SSM ENF detection, [https://github.com/JakMar17/SSM-ENFdetection (](https://github.com/JakMar17/SSM-ENFdetection%20()5. 2. 2022).
3. Liao, Han, Guang Hua, and Haijian Zhang. "ENF Detection in Audio Recordings via Multi-Harmonic Combining." IEEE Signal Processing Letters 28 (2021): 1808-1812.
4. Hua, Guang, Han Liao, Qingyi Wang, Haijian Zhang, and Dengpan Ye. "Detection of electric network frequency in audio recordings–from theory to practical detectors." IEEE Transactions on Information Forensics and Security 16 (2020): 236-248.
5. Burda, Zdzislaw, A. Görlich, Andrzej Jarosz, and Jerzy Jurkiewicz. "Signal and noise in correlation matrix." Physica A: Statistical Mechanics and its Applications 343 (2004): 295-310.