

Rekonstrukcija FHSS signala zasnovana na principu kompresivnog odabiranja

Andjela Draganić, Irena Orović, *Member, IEEE*, Srdjan Stanković, *Senior Member, IEEE*,
Moeness G. Amin, *Fellow, IEEE*

Sadržaj — U radu je opisana procedura za rekonstrukciju Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS) signala. FHSS je modulacijska tehnika koja se javlja u komunikacijama proširenog spektra (tzv. *spread spectrum* komunikacijama). Procedura rekonstrukcije je bazirana na tehnici kompresivnog odabiranja, koje omogućuje rekonstrukciju signala korišćenjem značajno manjeg broja odbiraka, nego što to zahtijeva Shannon-Nyquist-ova teorema o odabiranju. Metod se primjenjuje za signale koji imaju razrijeđenu predstavu u nekom domenu, što je čest slučaj u realnim aplikacijama. Rekonstrukcija signala je bazirana na optimizacionim algoritmima koji koriste minimalnu l_1 -normu u domenu u kojem je signal razrijeđen. Pored analize vremenskih i frekvencijskih karakteristika signala, vremensko-frekvencijska analiza signala je kombinovana sa metodom kompresivnog odabiranja, u cilju poređenja parametara polaznog i rekonstruisanog signala.

Keywords — Bluetooth, FHSS, kompresivno odabiranje, l_1 -norma, optimizacioni algoritmi, vremensko-frekvencijska analiza.

I. UVOD

Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS) [1], [2] je modulacijska tehnika koja se koristi u komunikacijama širokog spektra. Tehnike proširenja spektra (Spread Spectrum techniques) se koriste u telekomunikacijama i radio komunikacijama za proširenje frekvencijskog opsega signala. Signal proširenog spektra ima frekvencijski opseg nekoliko puta veći od frekvencijskog opsega nemodulisanog signala. Tehnike su razvijene u cilju otežavanja prislušivanja povjerljivih informacija, kao i povećanja otpornosti na šumove. Proširenje frekvencijskog opsega postiže se upotrebom DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum), THSS (Time Hopping Spread Spectrum), CSS (Chirp Spread Spectrum), FHSS modulacije, ili njihovom kombinacijom. Svaka od pomenutih tehnika koristi pseudoslučajne sekvence za povećanje opsega signala. Kod FHSS tehnike, frekvencija nosioca signala se mijenja sa jedne vrijednosti na drugu, što smanjuje uticaj smetnji na signal i otežava njegovo

Ovaj rad je nastao kao rezultat istraživanja u sklopu projekta "Napredne tehnike za automatizovanu analizu i obradu nestacionarnih signala u savremenim aplikacijama: komunikacije, radari, biomedicina i multimedije" finansiranim od strane Ministarstva nauke Crne Gore.

Prva tri autora su sa Elektrotehničkog fakulteta, Univerziteta Crne Gore, Džordža Vašingtona bb. 81000 Podgorica: e-mails: irenao@ac.me, srdjan@ac.me, andjelad@ac.me. Četvrti autor je sa Univerziteta Villanova, Fakultet za elektrotehniku i kompjuterske nauke, 800 Lancaster Avenue, Tolentine 119, Villanova, PA 19085 (e-mail: moeness.amin@villanova.edu). Autor za kontakt je: Irena Orović (e-mail: irenao@ac.me).

presretanje.

Za karakterizaciju FHSS signala moguće je koristiti vremensko-frekvencijsku analizu signala, koja pruža informacije o varijacijama spektra nestacionarnih signala [3], kakva je većina realnih signala. Ova analiza može se koristiti za analizu biomedicinskih, radarskih, multimedijalnih i drugih signala koji se javljaju u realnim aplikacijama [4]-[7]. U slučaju FHSS signala, vremensko-frekvencijska analiza daje zadovoljavajuće rezultate prilikom estimacije parametara ovih signala [2], [8], što je značajno prilikom identifikacije načina rada u komunikacionim sistemima.

U bežičnim komunikacijama signali rade na frekvencijama reda MHz-a. Bluetooth signali, koji koriste FHSS tehniku modulacije, zauzimaju opseg frekvencija od 2.4 MHz do 2.4835 MHz. U slučaju signala visokih frekvencija, odabiranje na osnovu teoreme o odabiranju rezultuje velikim brojem odbiraka. Međutim, u novije vrijeme razvijeni su algoritmi koji obezbijavaju prikupljanje odbiraka signala od interesa na sasvim slučajnan način, a koji su nazvani algoritmi za kompresivno odabiranje i rekonstrukciju. Naime, kompresivno odabiranje (Compressive Sensing ili Compressive Sampling) [9]-[15] je relativno novi pristup odabiranju signala, koji se intenzivno razvija u poslednjih nekoliko godina. Ovaj pristup omogućava rekonstrukciju signala sa velikom tačnošću iz značajno manjeg broja odbiraka, nego što to zahtijeva teorema o odabiranju. Smanjenje broja odbiraka signala, neophodnih za uspješnu rekonstrukciju, može dovesti do smanjenja potrošnje energije, kao i cijene izrade bežičnih prijemnika. Kompresivno odabiranje nalazi značajnu primjenu kod snimanja magnetnom rezonansom gdje se, redukcijom odbiraka potrebnih za rekonstrukciju slike, smanjuje i vrijeme izloženosti pacijenta uređaju [14]. Značajna je primjena u radarskim sistemima, u sistemima za akviziciju slika visokih rezolucija [15], kod kojih odabiranje u skladu sa klasičnom teoremom rezultira jako velikim brojem odbiraka. Da bi se kompresivno odabiranje moglo primijeniti na signal, moraju biti zadovoljena dva uslova:

1) Signal treba da ima razrijeđenu predstavu u nekom transformacionom domenu. Ako je dužina signala N odbiraka, onda K transformacionih koeficijenata ima nenulte vrijednosti, pri čemu je $K \ll N$. Za takav signal kažemo da je kompresibilan i može se prikazati sa samo K najvećih koeficijenata.

2) Drugi uslov koji treba da bude zadovoljen, da bi metoda kompresivnog odabiranja mogla da se primijeni, je

nekoherentnost. Signali koji imaju razrijeđenu predstavu u transformacionom domenu, moraju imati znatno gušći oblik u domenu u kojem se odabiraju.

U radu je ispitivana mogućnost primjene kompresivnog odabiranja na signale u komunikacionim tehnologijama. Pokazana je rekonstrukcija FHSS signala korišćenjem pomenutog metoda. Primjena navedenog metoda u ovim tehnologijama može dovesti do uštede resursa u procesu prenosa i smještanja signala. Prilikom rekonstrukcije signala korišćen je MATLAB-ov toolbox L1-Magic [16].

Rad je podijeljen na 5 sekcija. U drugom dijelu data je teorijska osnova kompresivnog odabiranja. Objasnjen je postupak uzimanja odbiraka signala, kao i uslovi koje signal treba da zadovoljava da bi se pomenuta metoda mogla primijeniti. Treće poglavlje sadrži opis FHSS modulacije, kao i analizu kompresivnog metoda primijenjenog na ovaj tip signala. Esperimentalni rezultati su dati u poglavlju IV, dok je zaključak dat u poglavlju V.

II. TEORIJSKA OSNOVA

Posmatrajmo jednodimenzioni signal x , dužine N . Signal se može predstaviti kao:

$$x = \sum_{i=1}^N s_i \psi_i = \psi s, \quad (1)$$

gdje je ψ matrica transformacionih koeficijenata, a s vektor težinskih koeficijenata. Transformaciona matrica može biti matrica Fourier-ovih koeficijenata, matrica diskretne kosinusne transformacije, matrica wavelet koeficijenta, itd.

Odbirci signala u kompresivnom odabiranju nazivaju se slučajnim uzorcima ili slučajnim mjerenjima. Vektor mjerenja y ima dimenzije $M \times 1$, ($M < N$), i može se definisati kao [13], [14]:

$$y_{M \times 1} = \phi_{M \times N} x_{N \times 1}, \quad (2)$$

dok ϕ predstavlja matricu mjerenja. U matričnom obliku relacija (2) postaje:

$$y = \phi x = \phi \psi s = \theta s. \quad (3)$$

U cilju rekonstrukcije signala sa velikom tačnošću, procedura mjerenja treba da zadovoljava svojstvo nekoherentnosti [15]. Kao što je ranije naglašeno, nekoherentnost se odnosi na svojstvo signala da ima razrijeđenu predstavu u transformacionom domenu, dok u domenu iz kojeg se uzimaju odbirci signal ima gustu predstavu, tako da se slučajnim odabiranjem malog skupa uzoraka signala obezbijedi dovoljno informacija za rekonstrukciju signala. Matrica mjerenja ϕ treba da bude nekoherentna sa transformacionom matricom ψ . Broj odbiraka neophodan za uspješnu rekonstrukciju signala zavisi od mjere koherencije ove dvije matrice. Koherencija između dvije matrice može se izraziti na sledeći način:

$$\mu(\phi, \psi) = \sqrt{N} \max_{k \geq 1, j \leq N} \left| \langle \phi_k, \psi_j \rangle \right|, \quad (4)$$

gdje N predstavlja dužinu signala, ϕ_k i ψ_j su vektor vrsta i vektor kolona matrice mjerenja i transformacione matrice, respektivno. Koherencija može imati vrijednosti iz skupa:

$$1 \leq \mu(\phi, \psi) \leq \sqrt{N}. \quad (5)$$

Poželjno je matricu mjerenja ϕ odabrati tako da koherentnost između ove matrice i matrice transformacionih koeficijenata ψ bude što manja. Manja koherentnost znači da je moguće je uzeti manji broj slučajnih mjerenja i u potpunosti rekonstruisati signal.

Kako se sistem jednačina, dat relacijom (3), sastoji od M jednačina sa N nepoznatih, to je sistem neodređen ($M < N$) i ima beskonačno mnogo rješenja. U cilju rješavanja pomenutog sistema, koriste se optimizacione tehnike. Postoji više tehnika za optimizaciju, i svaka traži x koje ima najrjeđu predstavu u transformacionom domenu. Najčešće korišćena metoda za rekonstrukciju zasniva se na l_1 -minimizaciji. Optimizacioni problem se definiše kao:

$$\hat{x} = \min \|x\|_{l_1}, \quad (6)$$

uz uslov $y = \phi x$. \hat{x} je rješenje minimizacionog problema,

a l_1 -norma vektora x je definisana kao: $\|x\|_{l_1} = \sum_{i=1}^N |x_i|$.

III. KOMPRESIVNO ODABIRANJE U REKONSTRUKCIJI FHSS SIGNALA

A. FHSS tehnika modulacije

FHSS je tip modulacije koji se koristi za prenos radio signala, promjenom frekvencije nosioca sa jedne vrijednosti na drugu i nalazi primjenu u Bluetooth sistemima. Bluetooth je komunikacijski protokol, koji koristi ISM (Industrial, Scientific and Medical) opseg frekvencija od 2.4GHz do 2.4835 GHz. Kako broj korisnika ovog opsega raste iz dana u dan, raste i vjerovatnoća pojave smetnji u sistemu usled prisustva raznih tipova signala. Razvijene su određene tehnike u cilju redukovanja interferencija u sistemu i identifikacije tipova signala. Neke od njih koriste vremensko-frekvencijske distribucije za karakterizaciju signala [8].

Bluetooth protokol koristi FSK (Frequency Shift Keying) modulacijsku tehniku, u kombinaciji sa GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying) modulacijom. FSK modulacijom se dobija povorka nula i jedinica, a u cilju ublažavanja prelaza sa nule na jedincu i efikasnijeg iskorištenja spektra, upotrijebljena je GFSK modulacija.

U Bluetooth sistemima koristi se tehnika proširenja spektra signala. Na osnovu Shannon-ove formule za kapacitet, vidi se da, ukoliko raste širina propusnog opsega, povećava se kapacitet kanala za prenos informacije (8):

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right), \quad (7)$$

gdje C predstavlja kapacitet kanala, W propusni opseg, S snagu signala a N snagu šuma. Takođe, proširivanjem spektra povećava se broj korisnika istog medijuma za prenos signala, a da se međusobno ne ometaju.

Proširenje spektra Bluetooth signala moguće je korišćenjem FHSS modulacije. Spekter je moguće proširiti množenjem pseudoslučajnog (najčešće binarnog) niza sa korisnim signalom. Na prijemnoj strani signal se sažima i dekodira. Da bi se signal mogao dekodirati, pseudoslučajna sekvenca mora biti poznata kako

predajniku, tako i prijemniku. FHSS signal prilikom prenosa mijenja frekvencije. Frekvencije na kojima se signal pojavljuje definisane su pseudoslučajnom sekvencom. Djelovi signala na pojedinim frekvencijama nazivaju se skokovi (hops) i jednakog su trajanja.

B. Kompresivno odabiranje

U ovom dijelu rada opisana je rekonstrukcija FHSS signala, korišćenjem metoda kompresivnog odabiranja. Da bi se FHSS signal mogao demodulisati, mora se detektovati i opisati. Estimacija parametara signala je značajna i prilikom klasifikacije standarda koji postoji u tzv. radio okolini, prije nego se signal dekodira [8]. FHSS signal je opisan vremenskim i frekvencijskim trajanjem hop-a, rastojanjem između dva uzastopna hop-a i brojem frekvencija koje postoje u signalu [2]. Signal opisan navedenim karakteristikama može biti demodulisan.

FHSS signal se sastoji od sinusoida, različitih frekvencija. Može se smatrati da signal ima rijetku predstavu u frekvencijskom domenu. U našem slučaju, za prelazak u frekvencijski domen korišćena je Fourier-ova transformacija. Posmatran je signal dužine 3072 odbiraka. Transformaciona matrica ψ je matrica inverzne Fourier-ove transformacije, dok se matrica mjerenja, θ , dobija na osnovu slučajnih permutacija transformacione matrice. Mjerenja se uzimaju iz vremenskog domena. Vektor y , koji predstavlja mjerni vektor, dobijen je kao:

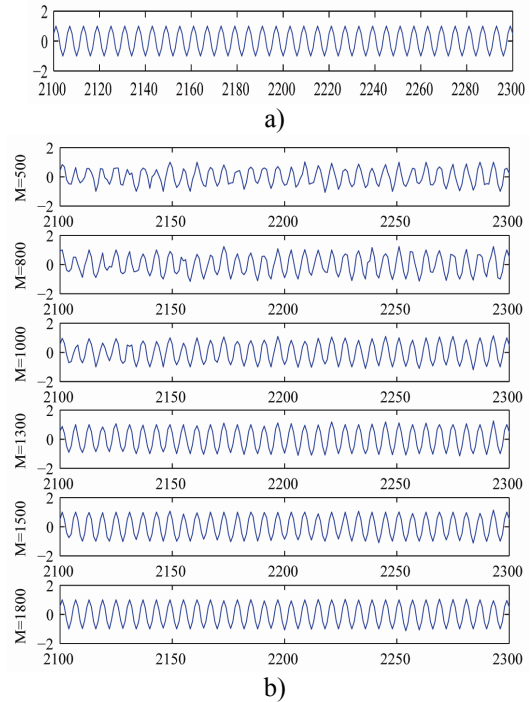
$$y = \theta s, \quad (8)$$

gdje s predstavlja Fourier-ovu transformaciju posmatranog signala. Signal je rekonstruisan sa 1300 odbiraka. Optimizacioni problem se rješava l_1 – minimizacijom:

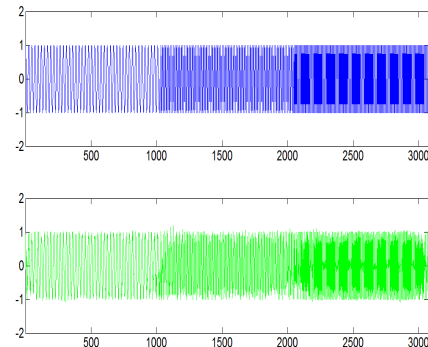
$$\min \sum_{i=1}^N |s_i| \text{ uz uslov } y = \theta s. \quad (9)$$

IV. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

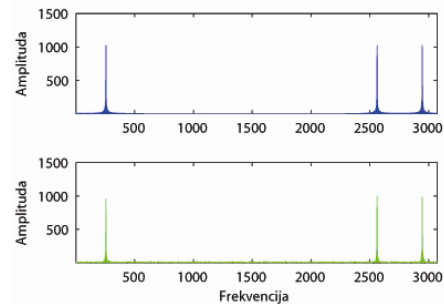
U ovom dijelu rada dati su eksperimentalni rezultati rekonstrukcije FHSS signala, bazirani na kompresivnom odabiranju. Posmatran je signal dužine 3072 odbirka, sastavljen od tri kompleksne sinusoide različitih frekvencija. U frekvencijskom domenu, signal sačinjavaju tri pika, na frekvencijama koje odgovaraju frekvencijama sinusoida. Kako je broj nenulatih komponenti u frekvencijskom domenu mnogo manji od dužine signala, to se može smatrati da signal ima rijetku predstavu u ovom domenu. Rekonstrukcija signala je ponavljana više puta, sa različitim brojem slučajnih mjerenja, u cilju dobijanja signala što sličnijeg polaznom signalu. Na Slici 1a prikazan je uvećani vremenski region polaznog signala, dok Slika 1b prikazuje rekonstrukciju odgovarajućeg regiona sa različitim brojem slučajnih mjerenja. Broj odbiraka signala uzetih prilikom mjerenja je: 500, 800, 1000, 1300, 1500 i 1800, redom (Slika 1b, odozdo ka dolje). Sa Slike 1b se vidi da već za $M=1300$ slučajnih mjerenja razlika između originalnog i rekonstruisanog signala je mala, odnosno, greška koja se prilikom rekonstrukcije pravi, gotovo je beznačajna. Uspješna rekonstrukcija moguća je sa oko 40% od ukupne dužine signala. Na Slici 2 dat je vremenski oblik originalnog i rekonstruisanog signala sa 1300 slučajnih mjerenja.



Slika 1: Vremenski regioni a) originalnog, b) rekonstruisanog signala sa različitim brojem slučajnih mjerenja



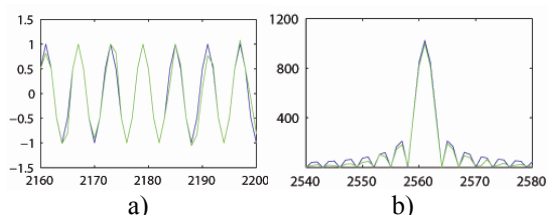
Slika 2. Plavom bojom je prikazan vremenski oblik originalnog, a zelenom bojom vremenski oblik rekonstruisanog signala



Slika 3. Apsolutna vrijednost Fourier-ove transformacije originalnog signala (prikazana plavom bojom) i rekonstruisanog signala (prikazana zelenom bojom)

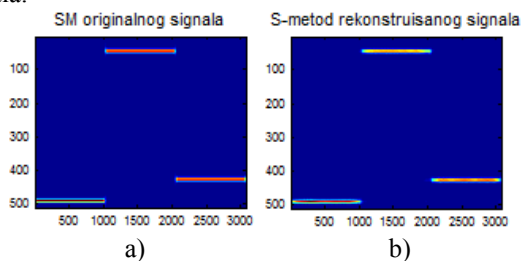
Slika 3 prikazuje Fourier-ovu transformaciju originalnog i rekonstruisanog signala, sa 1300 odbiraka korišćenih prilikom rekonstrukcije. Na Slici 4 prikazani su

uvećani vremenski i frekvencijski regioni originalnog i rekonstruisanog signala.



Slika 4. Uvećani regioni originalnog (plavo) i rekonstruisanog (zeleno) signala, u a) vremenskom i b) frekvencijskom domenu

Signal je rekonstruisan i prikazan u vremensko-frekvencijskoj ravni. Za prikaz signala u vremensko-frekvencijskom domenu korišćen je S-metod. Na ovaj način dobijena je dobra koncentracija signala. Na Slici 5a je S-metod originalnog signala, dok Slika 5b prikazuje istu vremensko-frekvencijsku distribuciju rekonstruisanog signala.



Slika 5. S-metod a) originalnog i b) rekonstruisanog signala

Iz vremensko-frekvencijske predstave FHSS signala, mogu se izvući parametri kojim je taj signal opisan. Parametri dobijeni iz VF reprezentacije dovode se na ulaz klasifikacionog modula, čime je omogućena njegova identifikacija [8].

V. ZAKLJUČAK

Kompresivno odabiranje je relativno nov način odabiranja signala, sa frekvencijom odabiranja značajno manjom nego što klasični pristup odabiranju zahtijeva. U radu je pokazana rekonstrukcija FHSS signala korišćenjem pomenutog metoda. Signal je rekonstruisan sa oko 40% odbiraka, što je više nego duplo manje od broja zahtijevanog teoremom o odabiranju. Kako je FHSS modulacija širokog spektra, to smanjenje broja odbiraka signala neophodnih za rekonstrukciju signala može smanjiti troškove izrade bežičnih prijemnika, kao i njihovu kompleksnost.

REFERENCE

- [1] T. J. Lynn, A. Z. bin Sha'ameri, "Comparison between the Performance of Spectrogram and Multi-Window Spectrogram in Digital Modulated Communication Signals", *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Telecommunications and Malaysia International Conference on Communications*, May 2007, Penang, Malaysia, pp. 97 - 101.
- [2] O. Berder, C. Boudier, G. Burel, "Identification of Frequency Hopping Communications", *Problems in Modern Applied Mathematics*, published by WSES, 2000, pp. 259-264, ISBN 960 8052-15-7.

- [3] S. Stankovic, N. Zaric, I. Orovic, C. Ioana, "General form of time-frequency distribution with complex-lag argument," *Electronics Letters*, Vol. 44, No. 11, May 2008, pp. 699-701.
- [4] I. Orovic, S. Stankovic, T. Chau, C. M. Steele, E. Sejdic, "Time-frequency analysis and Hermite projection method applied to swallowing accelerometry signals," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, Vol. 2010, Article ID 323125, 7 pages, 2010.
- [5] I. Orovic, S. Stankovic, T. Thayaparan, L.J. Stankovic, "Multiwindow S-method for Instantaneous Frequency Estimation and its Application in Radar Signal Analysis," *IET Signal Processing*, Vol. 4, No. 4, pp: 363-370, Jan. 2010.
- [6] S. Stankovic, I. Orovic, N. Zaric, "An Application of Multidimensional Time-Frequency Analysis as a base for the Unified Watermarking Approach," *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 1, No. 3, March 2010., pp.736-745.
- [7] W. J. Pielemeier, G. H. Wakefield, M. H. Simoni, "Time-frequency analysis of musical signals," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 84, Issue 9, Pages 1216 - 1230, September 1996.
- [8] M. Gandetto, M. Guainazzo, C. S. Regazzoni, "Use of Time-Frequency Analysis and Neural Networks for Mode Identification in a Wireless Software-Defined Radio Approach", *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, Vol. 2004, pp. 1778-1790, 2004.
- [9] R. Baraniuk, "Compressive Sensing", *Lecture Notes in IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 24, July 2007.
- [10] Y. D. Zhang, M. G. Amin, "Compressive sensing in non-stationary array processing using bilinear transforms", *IEEE Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop*, Hoboken, NJ, June 2012.
- [11] S. Stankovic, I. Orovic, M. Amin, "Compressed sensing based robust time-frequency representation for signals in heavy tailed noise", *ISSPA 2012*.
- [12] S. Stankovic, I. Orovic, E. Sejdic, "Multimedia Signals and Systems", Springer, September 2012.
- [13] E. J. Candès, M. B. Wakin, "An Introduction to Compressive Sampling", *IEEE Signal Processing Magazine*, March 2008.
- [14] M. Lüsigg, D.L. Donoho, J.M. Santos, J.M. Pauly, "Compressed Sensing MRI", *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 25, Issue 2, Pages 72-82, March 2008.
- [15] J. Romberg, "Imaging via Compressive Sampling", *IEEE Signal Processing Magazine*, March 2008.
- [16] <http://users.ece.gatech.edu/~justin/l1magic/>

ABSTRACT

The method for the reconstruction of Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS) signals is described in the paper. FHSS is a modulation technique employed in spread spectrum communications. Reconstruction procedure is based on the compressive sampling principle, which allows signal reconstruction using a significantly smaller number of samples than required by the Nyquist-Shannon sampling theorem. The method is applied on signals having a sparse representation in transform domain, which often appears in real applications. Reconstruction is based on the optimization algorithms using l_1 -norm minimization in the domain in which the signal is sparse. In addition, the joint time-frequency signal analysis is combined with a compressive sampling method, in order to compare parameters of the original and the reconstructed signal.

FHSS SIGNAL RECONSTRUCTION BASED ON THE COMPRESSIVE SAMPLING PRINCIPLE

Andjela Draganic, Irena Orovic, Srdjan Stankovic, Moeness G. Amin