

Моделовање LNA за LTE системе помоћу RVFFTDNN мрежа

Јелена Мишић

Електронски факултет,
Ниш, Србија
& Wireless Communications Research Group,
University of Westminster, London, UK
jelenaeka@gmail.com

Ђурађ Будимир

Wireless Communications Research Group,
University of Westminster
London, UK
d.budimir@westminster.ac.uk

Вера Марковић

Електронски факултет,
Универзитет у Нишу
Ниш, Србија
vera.markovic@elfak.ni.ac.rs

Садржај — У овом раду представљен је модел понашања малошумног појачавача за примену у оквиру пријемног дела Long Term Evolution (LTE) мобилних система. Предложени модел базиран је на вештачким неуронским мрежама RVFFTDNN типа. За развој модела коришћени су подаци добијени мерењима за Mini Circuit ZFL-500, а моделовање је извршено у софтверском окружењу MATLAB. Поређење измерених резултата са онима које даје изабрани модел показује одлично слагање.

Кључне речи: Long Term Evolution, малошумни појачавач, вештачке неуронске мреже

I. УВОД

Бежичне комуникације су доминантни тип комуникација у данашње време, а посебан значај у овој области имају мобилни комуникациони системи. Погодности које пружају мобилни системи условили су њихов веома брз развој, почев од прве генерације осамдесетих година двадесетог века, до данашњег LTE (Long Term Evolution) Advanced стандарда, чије спецификације одговарају четвртој генерацији мобилних система (4G) [1],[2]. Популарност мобилних система довела је до великог интереса за истраживања у овој области, а самим тим и брзог технолошког напретка ових система. Техничке спецификације мобилних система развијају се у фазама од стране једног глобално успостављеног тела за стандардизацију под називом 3GPP, а груписане су у виду тзв. „издања“ („Releases“). Стандард LTE дефинисан је у једном делу издања 8, а имплементација је кренула већ 2009. године. Даље побољшање ове технологије довело је 2011. год. до издања 10, које је специфицирало стандард LTE Advanced.

LTE системе карактерише пренос мултимедијалног садржаја већим брзинама у односу на претходне генерације, уз ниску латенцију, већу спектралну ефикасност, флексибилност употребе различитих фреквенцијских опсега, могућност избора између FDD (Frequency Division Duplex) и TDD (Time Division Duplex) мода, итд.

Архитектура LTE базира се на тзв. унапређеном пакетском систему - EPS (Evolved Packet System), који подржава искључиво пакетску комуникацију. За постизање жељених перформанси LTE система, врло битну улогу има

приступни део система, тзв. унапређена приступна мрежа E-UTRAN (Evolved UTRAN), при чему и предајни и пријемни део треба да задовоље одређене техничке спецификације.

Пријемни део LTE система треба да обавља успешну демодулацију жељеног сигнала у присуству интерференције и шума. Као резултат ефеката који се јављају при простирању сигнала по вишеструком путу, долази до јако великих варијација нивоа сигнала на пријему, што намеће потребу да пријемник има доста велики динамички опсег, са чиме је повезана и потреба за линеарношћу пријемника. Проблеми везани за линеарност у последње време такође су проузроковани све већом попуњеношћу фреквенцијског спектра од стране бројних и разноврсних телекомуникационих сервиса, што може довести до појаве јаких сигнала интерференције и увођења пријемника у нелинеарни режим рада.

С обзиром да је малошумни појачавач – MOB (Low Noise Amplifier) први блок у ланцу склопова пријемника, његове перформансе су кључне за рад целог пријемног дела. Код LTE система, при пројектовању малошумног појачавача поред традиционалних критеријума везаних за појачање и ниво шума, мора се водити рачуна и томе да се постигне задовољавајући ниво линеарности. Имајући у виду наведени захтев, у последње време је доста истраживања посвећено развоју метода за линеаризацију малошумних појачавача [3]. Неке од метода за линеаризацију базирају се на коришћењу математичког модела понашања појачавача, који треба што тачније да предвиди стварно понашање реалног појачавача. Модел понашања, који заправо представљају приступ „црне кутије“ (black box), често се користе при анализи и пројектовању комуникационих система и склопова, омогућавајући ефикасну симулацију уз задовољавајућу тачност.

У овом раду развијен је модел понашања малошумног појачавача који се базира на примени вештачких неуронских мрежа – ANN (Artificial Neural Networks). Вештачке неуронске мреже, које се доста користе у последње време, представљају један од моћних алата за моделовање у области електронских компонената и склопова, као на пример појачавача [4],[5], филтара [6], микрострип антена [7], RFMEMS прекидача [8], итд. За развој неуронског модела потребно је само познавање

парова побуда–одзив, на основу којих се врши тзв. обучавање неуронске мреже. Добро обучена неуронска мрежа има способност генерализације, тј. могућност генерисања коректних одзива и за вредности улазних параметара које нису биле представљене током учења. Такође, треба истаћи велику брзину генерисања одзива након завршеног обучавања, јер се тада одређивање одзива своди на израчунавање елементарних математичких функција.

У поглављу II дат је кратак концепт о неуронским мрежама, представљен је предложени модел неуронске мреже и наведени су параметри тренирања мреже. У оквиру поглавља III дискутовани су резултати добијени тестирањем предложеног модела у временском и фреквенцијском домену. У Закључку су сумирани резултати рада и смернице за будућа истраживања.

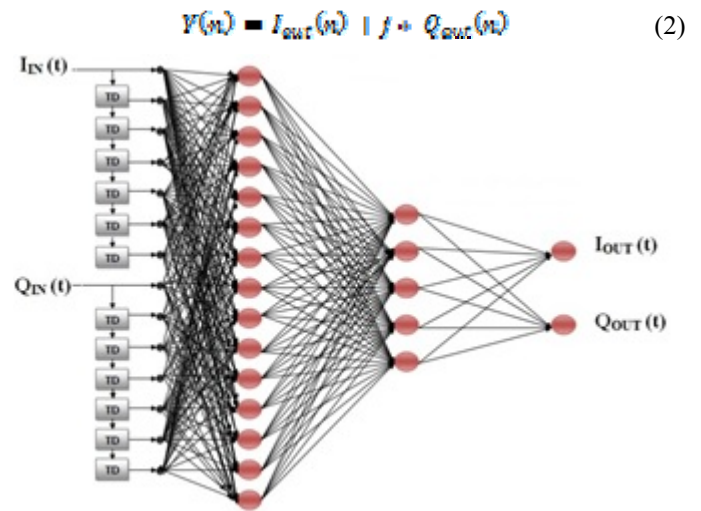
II. ПРЕДЛОЖЕНИ НЕУРОНСКИ МОДЕЛ МАЛОШУМНОГ ПОЈАЧАВАЧА

Вештачке неуронске мреже се могу дефинисати као паралелне, повезане структуре које се базирају на једноставним, нелинеарним елементима - неуронима. Најчешће коришћен модел неуронских мрежа је *Multilayer Perceptron (MLP)*. Свака MLP мрежа се састоји од улазног слоја, једног или више скривених слојева и излазног слоја, при чему се излаз сваког неурона у једном слоју доводи на улаз сваког од неурона у следећем слоју. Улазни параметри склопа који се моделује придружују се улазима првог слоја, а излази последњег слоја одговарају излазним параметрима. Везе између улазних и излазних величина сваког од неурона (слоја) дефинисане су преносном функцијом тог неурона (слоја). Поступак обучавања неуронске мреже представља алгоритам помоћу кога се одређују параметри неуронског модела, тако да разлика између стварних и жељених вредности излазних параметара буде мања од унапред задате вредности.

У овом раду коришћена је RVFFTDNN (*Real-Valued Feedforward Time Delay Neural Network*) мрежа са два скривена слоја, Сл. 1. RVFFTDNN је MLP мрежа која као улазне параметре има реалне вредности тренутног и једног, или више, закашњених улазних сигнала. Уколико се на улаз мреже доводе само вредности тренутног улазног сигнала, RVFFTDNN мрежа постаје RVFFNN (*Real-Valued Feedforward Neural Network*) јер нису присутне линије за кашњење на улазу мреже. Преносна функција скривених слојева је логаритамска сигмоидална функција (*logsig*), док улазни и излазни слој имају линеарну преносну функцију (*pureline*).

Предложени RVFFTDNN модел неуронске мреже реализован је у софтверском окружењу MATLAB. Како су, у проблему који се моделује, и улазни и излазни параметри комплексне величине, они су раздвојени на две компоненте, реалну и имагинарну, као што је дато изразима (1) и (2).

$$X(n) = I_{in}(n) + j * Q_{in}(n) \quad (1)$$



Слика 1. Предложена RVFFTDNN мрежа

У изразу (1), $X(n)$ представља снагу сигнала на улазу појачавача, I_{in} реалну компоненту улазне снаге, а Q_{in} имагинарну компоненту улазне снаге. Са друге стране, величине у изразу (2) су везане за излазну снагу појачавача, $Y(n)$ представља снагу сигнала на излазу појачавача, I_{out} је реална компонента излазне снаге, а Q_{out} имагинарна компонента излазне снаге.

У циљу развоја и тестирања неуронског модела потребно је формирати три скупа: тренинг, валидациони и тест скуп. Прва два скупа података користе се током обучавања мреже, док се последњи скуп користи за тестирање модела. Сваки од скупова се састоји од парова улаз-излаз, при чему под једним паром подразумевамо вредности реалне и имагинарне компоненте улазног сигнала и реалне и имагинарне компоненте одговарајућег излазног сигнала. Улазни сигнал X_t сачињавају реалне и имагинарне компоненте тренутног улазног сигнала и p закашњених сигнала (3).

Овај модел на свом улазу има $(2p+2)$ улазних параметара, односно $(p+1)$ реалних компоненти и $(p+1)$ имагинарних компоненти, које су формиране од $(p+1)$ комплексних улазних сигнала – улазни сигнал у датом временском тренутку и p закашњених улазних сигнала (3):

$$\begin{aligned} X_t &= X(t) + X(t-1) + X(t-2) + \dots + X(t-p) = \\ &= I_{in}(t) + I_{in}(t-1) + I_{in}(t-2) + \dots + I_{in}(t-p) \\ &\quad + j * Q_{in}(t) + j * Q_{in}(t-1) + j * Q_{in}(t-2) + \\ &\quad \quad \quad + \dots + j * Q_{in}(t-p) = \\ &= I_{in}(t) + I_{in}(t-1) + I_{in}(t-2) + \dots + I_{in}(t-p) \\ &\quad + j * (Q_{in}(t) + Q_{in}(t-1) + Q_{in}(t-2) + \\ &\quad \quad \quad + \dots + Q_{in}(t-p)) \end{aligned} \quad (3)$$

За обуку мреже у овом раду коришћен је Levenberg–Marquardt алгоритам (LMA) [9]. LMA се може посматрати

као комбинација Gauss–Newton алгоритма (GNA) и метода градијента.

III. НУМЕРИЧКИ РЕЗУЛТАТИ

Предложена неуронска мрежа примењена је за моделовање понашања малошумног појачавача Mini Circuit ZFL-500. Подаци потребни за обучавање и тестирање модела добијени су мерењима која су обављена на Westminster универзитету, Лондон, UK, у оквиру истраживачке групе *Wireless Communications Research Group*. Мерења су вршена са 4G сигналом генерисаним уз коришћење MATLAB-а. Генерисани сигнал представља OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) сигнал носеће фреквенције 1960 MHz и ширине 3 MHz, што одговара LTE спецификацијама. Генерисани сигнал је преко сигнал генератора MXGN5182A довођен на улаз разматраног малошумног појачавача. Излаз појачавача је вођен на векторски анализатор мрежа, одакле је преко софтвера VSA distortion suite 89604A сниман на рачунар у MATLAB формату. Након снимања сигнала, улазни и излазни сигнали појачавача су временски корелисани. Формиран је тренинг скуп, који се састоји од 20,000 одбирака, валидациони скуп који садржи 3,000 одбирака, и тест скуп са 40,000 одбирака.

У циљу проналажења најбољег модела вршена је опсежна анализа током које су мењани: дубина меморије, број слојева и број неурона у слојевима. Дубина меморије дефинисана је бројем линија за кашњење и њена вредност варирала је од 0 до 10. Сходно томе, тренирање мреже вршено је тренинг скупом, чији се сваки елемент састоји од најмање два улазна параметра (дубина меморије је у том случају нула), а највише 22 улазна параметра (дубина меморије је у том случају десет), и два излазна параметра. Закашњени улазни сигнали се доводе на улаз мреже како би се добио што веродостојнији модел појачавача, и како би се у моделовање узели у обзир и меморијски ефекти.

Најбоље резултате показала је RVFFTDNN мрежа која у првом и другом скривеном слоју садржи 15 и 5 неурона, респективно.

Способност предложеног неуронског модела да моделује понашање појачавача проверена је тестирањем, преко нормализоване средњеквадратне грешке дефинисане изразом (4):

$$NMSE_{dB} = 10 \log_{10} \left[\frac{\sum_{n=1}^N |Y_{meas}(n) - Y_{est}(n)|^2}{\sum_{n=1}^N |Y_{meas}(n)|^2} \right], \quad (4)$$

где су: $NMSE_{dB}$ нормализована средњеквадратна грешка, Y_{meas} измерени излазни сигнал појачавача, Y_{est} излазни сигнал добијен помоћу неуронске мреже, а n представља број одбирака сигнала у разматраном тест скупу.

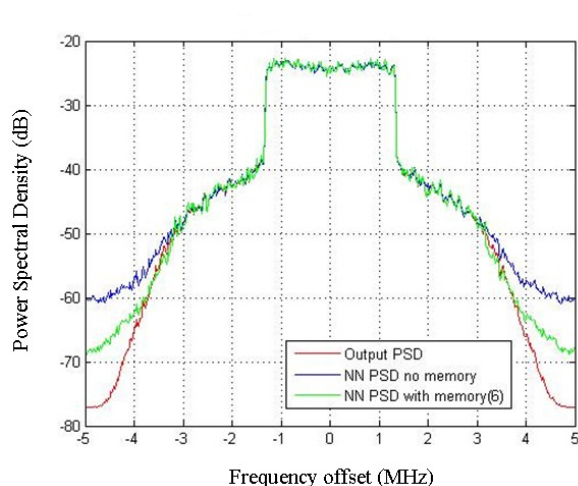
Вредности нормализоване средњеквадратне грешке за неке од анализираних дубина меморије приказане су у Табели 1. Анализа је вршена и за веће дубине меморије од 6, али то повећање није допринело побољшању генерализације мреже.

ТАБЕЛА 1 ВРЕДНОСТИ НОРМАЛИЗОВАНЕ СРЕДЊЕ-КВАДРАТНЕ ГРЕШКЕ У ЗАВИСНОСТИ ОД ДУБИНЕ МЕМОРИЈЕ

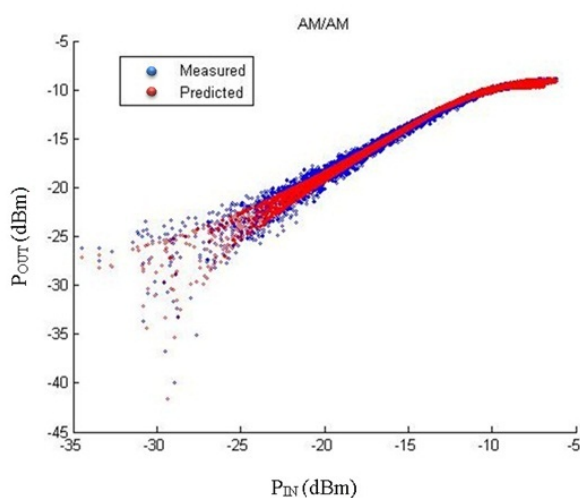
Вредност нормализоване средње квадратне грешке $NMSE (dB)$	Дубина меморије улазног сигнала p
-31.5	0
-32.4	1
-35.05	2
-37.8	3
-39.6	4
-40.4	5
-41.5	6

На основу резултата тестирања, као најбољи неуронски модел узет је модел са дужином меморије 6. Поменути модел је тестиран на скупу који садржи елементе који нису били укључени у обучавање мреже. Овакав начин тестирања је неопходан како би се испитала генерализација предложеног модела. У циљу потврђивања тачности предложеног модела проверено је слагање сигнала измереног на излазу појачавача и сигнала који представља излаз из неуронске мреже. Сигнали су упоређивани како у фреквенцијском тако и у временском домену. Слагање у фреквенцијском домену проверено је преко спектралне густине снаге - PSD (*Power Spectral Density*). На Сл.2 су приказане: PSD функција измереног сигнала, PSD функција сигнала који је генерисан од стране неуронске мреже без меморије и PSD функција сигнала генерисаног од стране мреже са меморијом 6. Са Сл.2 се може уочити да у одређеним деловима посматраног опсега постоји одступање између PSD функције измереног сигнала и PSD функције сигнала који је добијен помоћу неуронске мреже без меморије. Разлика у спектру постаје већа са повећањем фреквенцијског офсета (помераја) од централне фреквенције. Са друге стране, слагање PSD функција измереног сигнала и PSD функција излазног сигнала мреже са меморијом је знатно боље.

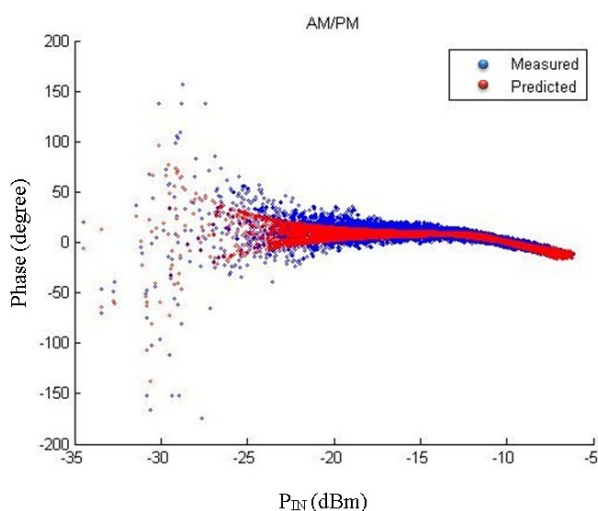
Слагање у временском домену проверено је анализом AM/AM И AM/PM карактеристика. Поређење AM/AM и AM/PM карактеристика за измерени излазни сигнал и сигнал који даје неуронска мрежа без меморије приказано је на Сл.3 и Сл.4, респективно. Поређење AM/AM и AM/PM карактеристика измереног излазног сигнала и излазног сигнала неуронске мреже са меморијом приказано је на Сл.5 и Сл.6, респективно. Као што се може уочити, слагање AM/AM и AM/PM карактеристика за измерени излазни сигнал и сигнал који даје неуронска мрежа боље је у случају неуронске мреже са меморијом, у односу на мрежу без меморије.



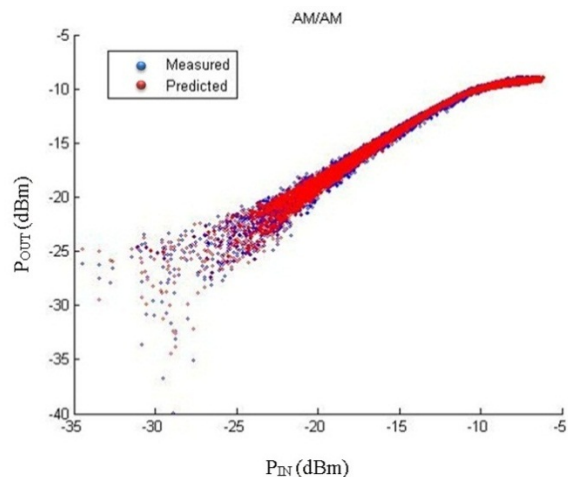
Слика 2. Поређење PSD карактеристика измереног сигнала, сигнала RVFFTDNN мреже без меморије и сигнала RVFFTDNN мреже дубине меморије 6



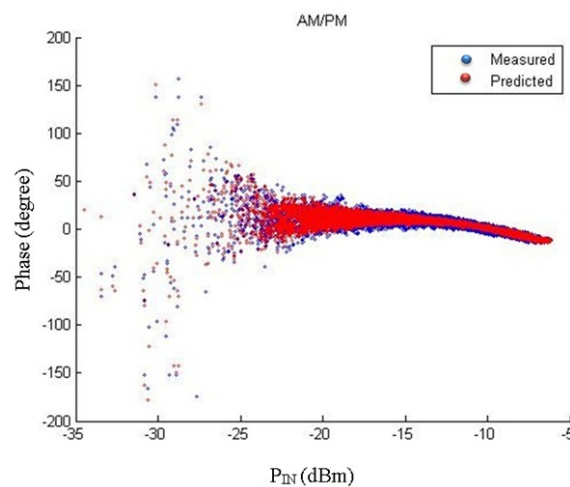
Слика 3. Поређење AM/AM карактеристика измереног сигнала и сигнала RVFFTDNN мреже без меморије



Слика 4. Поређење AM/PM карактеристика измереног сигнала и сигнала RVFFTDNN мреже без меморије



Слика 5. Поређење AM/AM карактеристика измереног сигнала и сигнала RVFFTDNN мреже дубине меморије 6



Слика 6. Поређење AM/PM карактеристика измереног сигнала и сигнала RVFFTDNN мреже дубине меморије 6

На основу тестирања модела и провере карактеристика, закључено је да RVFFTDNN мрежа са два скривена слоја са 15 и 5 неурона и са дубином меморије 6 представља задовољавајући модел понашања појачавача.

IV. ЗАКЉУЧАК

У овом раду представљено је моделовање понашања појачавача намењеног за пријемни сегмент у LTE системима, и то на примеру малошумног појачавача Mini Circuit ZFL-500. Моделовање је вршено помоћу вештачких неуронских мрежа RVFFTDNN типа, које показују велики потенцијал за ову врсту примене. Тачност предложеног модела и његова способност генерализације проверени су у фази тестирања, а као најбољи модел изабран је модел са два скривена слоја и дубином меморије 6. Анализом резултата тестирања може се закључити да предложени модел неуронске мреже веома добро моделује понашање појачавача. Наиме, нормализована средњеквадратна грешка је мања од -40 dB, што је задовољавајући резултат. Такође, поређењем измерених излазних сигнала са онима које генерише мрежа, у временском и фреквенцијском

домену, установљено је да модел има велику тачност у предвиђању понашања разматраног појачавача.

Потенцијална примена развијеног неуронског модела понашања малошумног појачавача може се сагледати у склопу актуелних техника за ублажавање нелинеарних ефеката појачавача.

ЗАХВАЛНИЦА

Резултати приказани у овом раду добијени су током истраживања у оквиру следећих пројеката: Erasmus Mundus Акцион 2 - EUROWEB, који финансира Европска комисија, и П43012, финансираног од стране Министарства просвете и науке Републике Србије.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Christopher Cox, "An Introduction to LTE", John Wiley&Sons Inc, Feb 28, 2012
- [2] Erik Dahlman, Stefan Parkvall And Johan Skold, "4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband", Academic Press, Apr 26, 2011
- [3] Heng Zhang; Sanchez-Sinencio, E., "Linearization Techniques for CMOS Low Noise Amplifiers: A Tutorial," *Circuits and Systems I: Regular Papers, IEEE Transactions on*, vol.58, no.1, pp.22,36, Jan. 2011
- [4] Alam, M.S.; Farooq, O.; Izharuddin, I.; Armstrong, G.A., "Artificial Neural Network Based Modeling of GaAs HBT and Power Amplifier Design for Wireless Communication System," *Microelectronics, 2006. ICM '06. International Conference on*, vol., no., pp.103,106, 16-19 Dec. 2006
- [5] Boukadoum, M.; Nabki, F.; Ajib, W., "Towards neural network-based design of radiofrequency low-noise amplifiers," *Circuits and Systems (ISCAS), 2012 IEEE International Symposium on*, vol., no., pp.2741,2744, 20-23 May 2012.

- [6] Burrascano, P.; Dionigi, M.; Fancelli, C.; Mongiardo, M., "A neural network model for CAD and optimization of microwave filters," *Microwave Symposium Digest, 1998 IEEE MTT-S International*, vol.1, no., pp.13-16, vol.1, 7-12 June 1998.
- [7] Raida, Z., "Modeling EM structures in the neural network toolbox of MATLAB," *Antennas and Propagation Magazine, IEEE*, vol.44, no.6, pp.46,67, Dec 2002.
- [8] Marinkovic, Zlatica; Ciric, Tomislav; Kim, Teayoung; Vietzorreck, Larissa; Pronic-Rancic, Olivera; Milijic, Marija; Markovic, Vera, "ANN based inverse modeling of RF MEMS capacitive switches," *Telecommunication in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services (TELSIKS), 2013 11th International Conference on*, vol.02, no., pp.366,369, 16-19 Oct. 2013.
- [9] Q. J. Zhang and K. C. Gupta, *Neural Networks for RF and Microwave Design*. Boston, MA: Artech House, 2000.

ABSTRACT

In this paper, the behavior model of a low-noise amplifier for LTE receiver applications is presented. The proposed model is based on artificial neural network approach, whereby the RVFFTDNNs are applied. For the modeling purpose, the measured data of the device Mini Circuit ZFL-500 have been used, and the development of the model has been performed in MATLAB software environment. Excellent agreement has been demonstrated through the comparison of measured results with those obtained by the chosen model.

MODELING OF LNA FOR LTE SYSTEMS USING RVFFTDNN NETWORK

Jelena Mistic, Djuradj Budimir, Vera Markovic