

Ս.Վ. ԱՆՏՈՆՅԱՆ, Գ.Ա. ԾԱՏՈՒՐՅԱՆ, Լ.Ռ. ՄՈՎՍԻՍՅԱՆ

**ԲԶՋԱՅԻՆ ԿԱՊԻ 5-ՐԴ ՄԵՐՆԴԻ ՀԶՈՐՈՒԹՅԱՆ ՈՒԺԵՂԱՐԱՐՆԵՐԻ
ՍՈՒՏՔԱՅԻՆ ԱԶԴԱՆՇԱՆԻ ԹՎԱՅԻՆ ԱՂԱՎԱՂՄԱՆ ԵՂԱՆԱԿԻ
ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ**

5-րդ սերնդի բջջային կապի համակարգերում ի հայտ եկող խնդիրների լուծման համար հզորության ուժեղարարների (ՀՈԻ) պարամետրերի բարելավման նպատակով անհրաժեշտ է ուժեղարարներում առկա մի շարք խնդիրների լուծում: Ներկայացվում են LabVIEW ծրագրային միջավայրում հզորության ուժեղարարի մուտքային ազդանշանի թվային աղավաղման եղանակի մոդելավորման, ինչպես նաև վեկտորային հաղորդիչ-ընդունիչ սարքի միջոցով ուժեղարարի ելքային պարամետրերի չափման արդյունքները: Բերված են ծրագրի դիմային պանելը և գրաֆիկների տեսքով հաշվարկային արդյունքները:

Առանցքային բառեր. 5-րդ սերնդի բջջային կապի համակարգ (5G), հզորության ուժեղարար, մուտքային ազդանշանի թվային աղավաղման եղանակ, Digital PreDistortion (DPD), OFDM, PAPR:

Ներածություն. Օրթոգոնալ հաճախային տարանջատմամբ մուլտիպլեքսավորումը (OFDM) 5-րդ սերնդի կապի համակարգերի բարձր տեսակի մոդուլացման եղանակն է, որն առանձնանում է բարձր արդյունավետությամբ և փոքր հապաղումով: Այնուամենայնիվ, OFDM համակարգում ի հայտ են գալիս խնդիրներ, որոնցից մեկը ազդանշանի առավելագույն և միջին հզորությունների հարաբերակցության (PAPR) բարձր արժեքն է: PAPR-ը ներկայացվում է հետևյալ արտահայտությամբ՝

$$PAPR = \frac{\max_{0 \leq t \leq NT} |x(t)|^2}{P_{avg}}, \quad (1)$$

որտեղ P_{avg} -ը $x(t)$ ազդանշանի միջին հզորությունն է:

PAPR բարձր արժեք ունեցող ազդանշանների զծային ուժեղացման համար օգտագործվում են ազդանշանների մինչմուտքային աղավաղումներ (DPD) մտցնող սարքեր, ինչը թույլ է տալիս ընդլայնել ուժեղարարի բնութագրի զծային տեղամասը:

ՀՈԻ-ի անցումային բնութագրի զծային տեղամասի ընդլայնումը հանգեցնում է ՀՈԻ-ի արդյունավետության բարձրացմանը:

Ենթադրենք ՀՈԻ-ի բնութագիրն ունի հետևյալ տեսքը՝

$$v_0 = a_1 v_{\omega\eta} + a_3 v_{\omega\eta}^3, \quad (2)$$

որտեղ $v_{\omega\eta}$ -ը ուժեղարարի մուտքային աղավաղված լարումն է և միաժամանակ մինչմուտքային աղավաղող շղթայի (ՄՄԱՇ) ելքային լարումը, որը ներկայացվում է հետևյալ արտահայտությամբ՝

$$v_{\omega\eta} = b_1 v_{\omega} + b_3 v_{\omega}^3: \quad (3)$$

Հետևաբար, ՀՈԻ-ի բնութագիրը կունենա հետևյալ տեսքը:

$$v_0 = a_1(b_1 v_{\omega} + b_3 v_{\omega}^3) + a_3(b_1 v_{\omega} + b_3 v_{\omega}^3)^3: \quad (4)$$

Որոշ ձևափոխություններից հետո ստացվում է՝

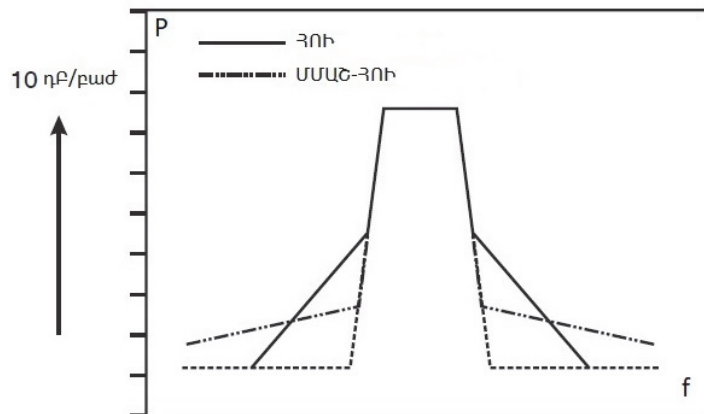
$$v_0 = a_1 b_1 v_{\omega} + (a_1 b_3 + a_3 b_1) v_{\omega}^3 + 3 a_3 b_1^2 b_3 v_{\omega}^5 + 3 a_3 b_3^2 b_1 v_{\omega}^7 + a_3 b_3^3 v_{\omega}^9: \quad (5)$$

(5)-ից հետևում է, որ ելքային ազդանշանի ոչ գծային 3-րդ բաղադրիչը կգրոյանա, եթե ՄՄԱՇ-ն աղավաղի $b_3 = -\frac{a_3 b_1}{a_1}$ օրենքով: Ինչպես տեսնում ենք, ելքում ՀՈԻ-ի 3-րդ գրոյացած բաղադրիչից բացի, առաջանում են նաև ավելի բարձր կարգի ոչ գծային բաղադրիչներ, ինչը մինչմուտքային աղավաղող շղթայի գլխավոր թերությունն է:

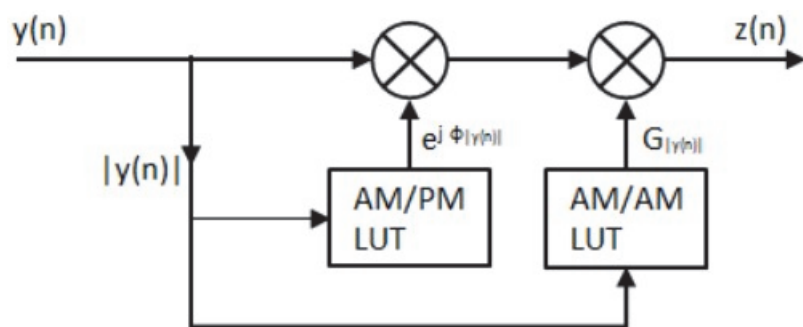
Այսպիսով, աղավաղող մուտքային շղթա-ՀՈԻ համակցությունը ստեղծում է ազդանշանի այնպիսի աղավաղումներ, որոնք, որպես կանոն, չեն առաջանում «միայն ՀՈԻ» համակարգում [1]:

Արդյունքում, չնայած մինչմուտքային աղավաղող շղթան գեներացնում է ազդանշանի ավելի բարձր կարգի աղավաղումներ, սակայն նրա ելքային ազդանշանի սպեկտրալ հզորությունը մնում է հավասար այն ազդանշանի սպեկտրալ հզորությանը, որն առաջանում էր «միայն ՀՈԻ» համակարգի ելքում (նկ. 1):

Գոյություն ունի մինչմուտքային աղավաղման 2 հիմնական եղանակ: **Առանց հիշողության եղանակի** մոդելի դեպքում ենթադրվում է, որ ՀՈԻ-ի բնութագրերը ժամանակի ընթացքում չեն փոխվում: ՀՈԻ-ի ելքային ազդանշանը կախված է միայն մուտքին կիրառված լարումից և ՀՈԻ-ի անցումային բնութագրից: Ակնթարթային ոչ գծայնությունը սովորաբար բնութագրվում է ՀՈԻ-ի ամպլիտուդ/ամպլիտուդ (AM/AM) և ամպլիտուդ/փուլ (AM/PM) բնութագրերով, որոնք ելքային ազդանշանի ամպլիտուդի և փուլային շեղման կախվածություններն են մուտքային ազդանշանի ամպլիտուդից: Առանց հիշողության մոդելի դեպքում ՀՈԻ-ի անցումային բնութագրի ոչ գծայնությունն ապահովող գործակիցներին (բանաձև (2)) համապատասխանող հակադիր արժեքները գրանցվում են հիշողության մեջ (Look-Up Table, LUT) և տրվում են ՀՈԻ-ին: Նկ 2-ում բերված է առանց հիշողության մոդելի կառուցվածքային սխեման:



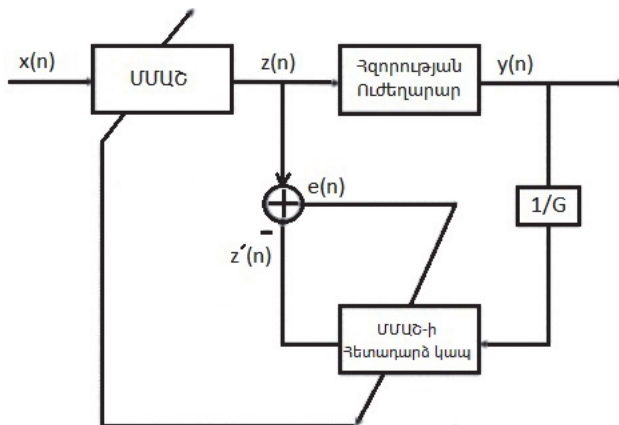
Նկ. 1. Սպեկտրալ հզորությունների բաշխվածությունը միայն-ձՈԻ և ՄՄԱՇ-ձՈԻ համակարգերում



Նկ. 2. Առանց հիշողության մոդելի կառուցվածքային սխեման

Մինչև մուտքային աղավաղման **հիշողության մոդելը** հիմնականում օգտագործվում է բավականին լայն սպեկտրով ազդանշանների դեպքում՝ մինչև 400 ՄՀ, 5 ենթակրողների միացությունով (WCDMA, բջջային WiMAX, 3GPP LTE, 5G NR ստանդարտների համար)։ Մեծ թողարկման շերտի դեպքում ձՈԻ-ն դրսևորում է հիշողության հատկություն։ Սա հատկապես ճիշտ է անլար բազային կայաններում օգտագործվող մեծ հզորությամբ ձՈԻ-երի դեպքում։ Հիշողության հատկությունները պայմանավորված են ակտիվ տարրերի ջերմային գործակիցներով, որոնք փոփոխվում են հաճախությունից։ Արդյունքում՝ ելքային լարումը կախված է ոչ միայն մուտքային լարման առկա, այլ նաև ելքային լարման նախորդ արժեքներից։ Այլ կերպ ասած՝ ձՈԻ-ի ոչ գծայնությունն ունի, այսպես կոչված, հիշողություն։ Այդպիսի ձՈԻ-ի դեպքում մինչև մուտքային աղավաղման առանց հիշողության մոդելը կտա ձՈԻ-ի ելքային բնութագրի ոչ բավարար գծայնացում։ Հետևաբար, ՄՄԱՇ-ները պետք է ունենան հիշողության շղթաներ։

Մինչև մոտ քայլին աղավաղման հիշողության մոդելի ամենահայտնի ալգորիթմներից են Վոլտերրայի հաջորդականությունը և դրա ածանցյալները: Հիմնականում օգտագործվում է Վոլտերրայի հաջորդականությունը, սակայն գործակիցների մեծ քանակությունը պրակտիկ չէ: Գոյություն ունեն Վոլտերրայի հաջորդականության ածանցյալներ, որոնք ունեն համեմատաբար պարզ կառուցվածք: Դրանցից են Վիներ, Համմերսթայն, Վիներ-Համմերսթայն, զուգահեռ Վիներ և այլ կառուցվածքները: Այսպես կոչված՝ «հիշողության բազմանդամ» մոդելը Համմերսթայնի և Վիների մոդելի մասնավոր դեպքն է: Մինչև մոտ քայլին աղավաղման շղթայի հիշողության մոդելը կազմելու համար, գոյություն ունի 2 մոտեցում: Առաջին մոտեցման նպատակն է որոշել նախօրոք հայտնի պարամետրերով ՀՈՒ-ի հակադիր պարամետրերը և ՄՄԱՇ-ի նախագծումը: Եղանակը կոչվում է «նուդղակի սովորեցման ճարտարապետություն» (DLA): Այնուամենայնիվ, ՀՈՒ-ի հակադիր պարամետրերի որոշումը բարդ խնդիր է: Գոյություն ունի նաև պարզեցված «անուդղակի սովորեցման ճարտարապետություն» տարբերակը (IDLA), որի դեպքում նախ որոշվում է ՄՄԱՇ-ն, այնուհետև ընտրվում է նրան համապատասխանող ՀՈՒ (նկ. 3) [2]:



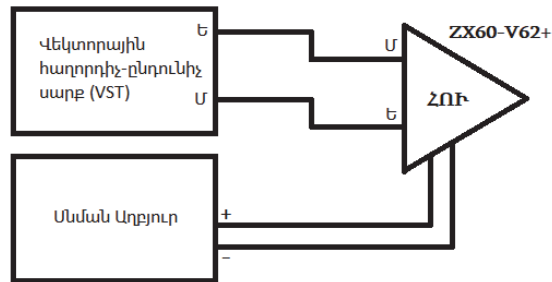
Նկ. 3. «Անուդղակի սովորեցման ճարտարապետություն»

Խնդրի դրվածքը. Հետագոտել մտցվող մինչև մոտ քայլին աղավաղումների ազդեցությունը հզորության ուժեղարարի բնութագրերի վրա՝ դրանց լավացման նպատակով: Հետագոտման ընթացքում օգտագործել հիշողությամբ (memory polynomial) և առանց հիշողության (Look-Up Table) աղավաղումներ մտցնելու եղանակները:

Հետագոտությունների արդյունքները. Նկ. 4-ում պատկերված է հետագոտվող համակարգի բոլոր-սխեման: Ուժեղարարի մուտքը միացվել է NI PXIe-5840 վեկտորային ընդունիչ-հաղորդչի RF_{out} ուղղուն, իսկ ելքը՝ RF_{in} -ին: Մտումը

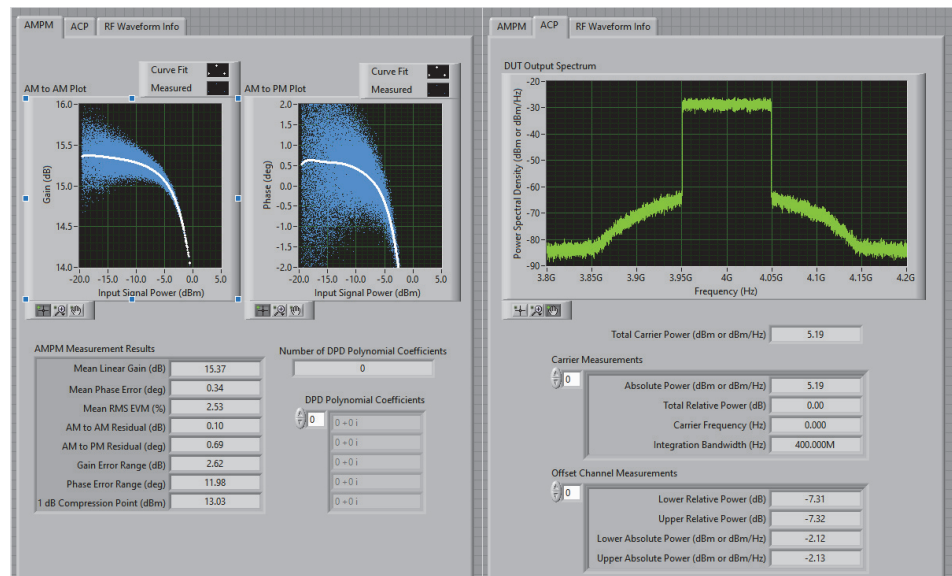
տրվել է NI PXI-4130 սնման լարմամբ: Որպես ՀՌԻ օգտագործվել է Minicircuit արտադրողի ZX60-V62+ մականիշի միկրոսխեման, որն աշխատում է մինչև 6 ԳՀց հաճախությունների տիրույթում՝ 15 ԴԲ առավելագույն ուժեղացման գործակցով:

Վեկտորային հաղորդիչ-ընդունիչ սարքի կառուցվածքը հնարավորություն է տալիս մտցնել մինչև մուտքային աղավաղումները ծրագրային եղանակով:



Նկ. 4. Համակարգի բլոկ-սխեման

Նկ. 5 ա-ում բերված են առանց մինչև մուտքային աղավաղումների օգտագործման հետազոտության արդյունքում ստացված ՀՌԻ-ի ուժեղացման գործակցի և էլքային ազդանշանի փուլի կախվածություն մուտքային ազդանշանի մակարդակից: Ուժեղարարի էլքային ազդանշանի սպեկտրալ խտությունը պատկերված է նկ. 5 Բ-ում:

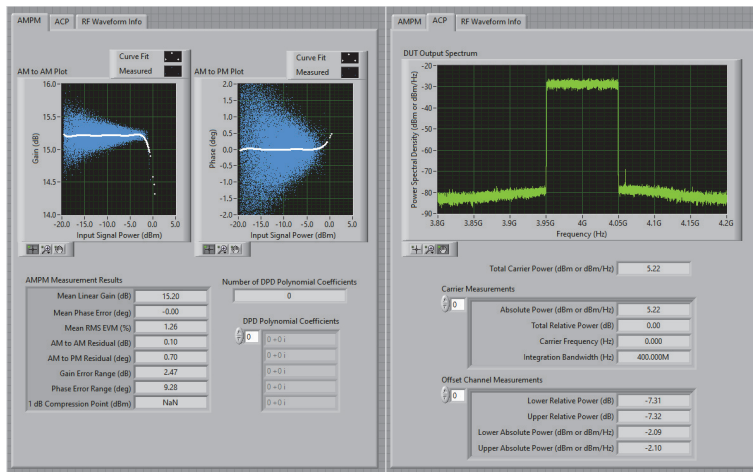


ա)

բ)

Նկ.5. Առանց մինչև մուտքային աղավաղումների ՀՌԻ-ի հետազոտման արդյունքները

Նկ. 6 ա և բ-ում բերված են մինչնուտքային աղավաղումներ մտցնելու արդյունքում հիշողության մոդելի համար ստացված ուժեղարարի բնութագրերը և ելքային ազդանշանի սպեկտրալ խտությունը:

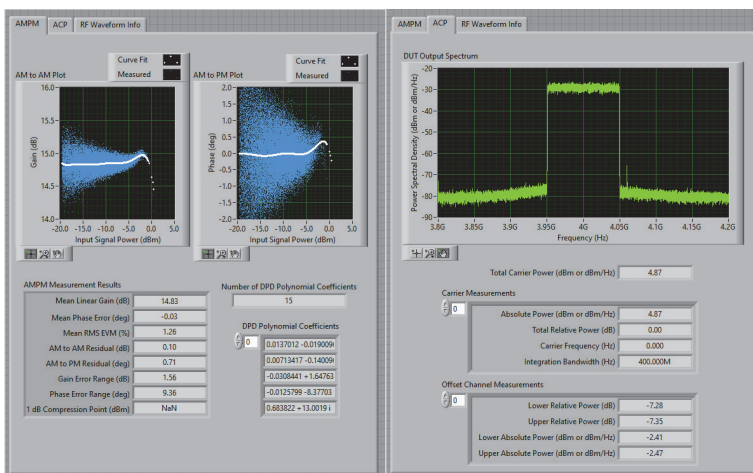


ա)

բ)

Նկ. 6. ա) և բ)-ում հիշողության մոդելի դեպքում մինչնուտքային աղավաղումների մտցման արդյունքում ուժեղարարի ստացված բնութագրերը

Նկ. 7 ա և բ-ում բերված են մինչնուտքային աղավաղումներ մտցնելու արդյունքում ստացված ուժեղարարի բնութագրերը և ելքային ազդանշանի սպեկտրալ խտությունը, որոնք ստացվել են առանց հիշողության մոդելի դեպքում:



ա)

բ)

Նկ. 7. ա) և բ)-ում առանց հիշողության մոդելի դեպքում մինչնուտքային աղավաղումներ մտցնելու արդյունքում ուժեղարարի ստացված բնութագրերը

Ինչպես երևում է նկ. 6-ում և 7-ում բերված արդյունքներից, մինչև մուտքային աղավաղումների ազդեցության դեպքում բարձրանում է ուժեղարարի ուժեղացման գործակցի գծայնությունը՝ մուտքային ազդանշանի փոփոխության ընտրված միջակայքում, և մոտավորապես 20 *դԲ*-ով լավանում խանգարող հարևան ուղիների ընտրողականությունը:

Փորձը իրականացվել է սենյակային ջերմաստիճանային պայմաններում (+27 °C), ուժեղարարին տրվել է 5 Վ սնուցման լարում:

Եզրակացություն. LabVIEW ծրագրային միջավայրում կատարվել է հզորության ուժեղարարի մուտքային ազդանշանի թվային աղավաղման եղանակի մոդելավորումը՝ վեկտորային հաղորդիչ-ընդունիչ սարքի միջոցով ուժեղարարի ելքային պարամետրերի չափման նպատակով: Ստացվել են առանց մինչև մուտքային աղավաղումների և դրանց օգտագործման դեպքում ՀՈԻ-ի հետագոտության արդյունքում ստացված ուժեղացման գործակցի և ելքային ազդանշանի փուլի կախվածությունները մուտքային ազդանշանի մակարդակից, ինչպես նաև ելքային ազդանշանի սպեկտրալ խտությունը: Արդյունքների վերլուծության հիման վրա արվել է եզրակացություն, որ մինչև մուտքային աղավաղումներ մտցնելու արդյունքում բարձրանում են ՀՈԻ-ի ուժեղացման գծայնությունը և հարևան ուղիների ընտրողականությունը:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Cripps Steve C.** RF Power Amplifiers for Wireless Communications. Second edition.- Artech House, 2006.- 404 p.
2. **Morgan Dennis R., Zhengxiang Ma** A Generalized Memory Polynomial Model for Digital Predistortion of RF Power Amplifiers // IEEE Transactions on signal processing.- 2006.- Vol. 54, NO. 10.- P. 3852-3860.

С.В. АНТОНЯН, Г.А. ЦАТУРЯН, Л.Р. МОВСИСЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ЦИФРОВОГО ИСКАЖЕНИЯ ВХОДНОГО СИГНАЛА УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ СОТОВОЙ СВЯЗИ ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЯ

Для решения проблем, возникающих в системах мобильной связи 5-го поколения, необходимо выполнить ряд задач для улучшения параметров усилителя мощности. Представлены результаты численного моделирования искажений входного сигнала усилителя мощности в программной среде LabVIEW, а также выходных параметров усилителя через векторный передатчик. Приведены передняя панель программы и результаты расчетов в графическом виде.

Ключевые слова: система мобильной связи 5-го поколения (5G), усилитель мощности, метод цифрового искажения входного сигнала, Digital PreDistortion (DPD), OFDM, PAPR.

S.V. ANTONYAN, G.A. TSATURYAN, L.R. MOVSIYAN

**INVESTIGATING THE DIGITAL DISTORTION OF THE INPUT SIGNAL
OF 5G CELLULAR POWER AMPLIFIER**

To solve the problems arising in the 5th generation mobile communication systems, a number of problems should be solved to improve the parameters of power amplifiers (PA). The results of numerical simulation of distortions of the input signal of the power amplifier in the LabVIEW software environment, as well as the output parameters of the amplifier through a vector transmitter are presented. The front panel of the program and the calculation results are presented in graphical form.

Keywords: 5th generation (5G) mobile communication system, power amplifier, digital distortion input method, digital pre-distortion (DPD), OFDM, PAPR.