

ՀՀ ԳԱԱ ԻՆՖՈՐՄԱՏԻԿԱՅԻ ԵՎ ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՄԱՆ ՊՐՈԲԼԵՄՆԵՐԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ

Նահապետյան Հայկ Էդվարդի

ԻՆՔՆԱԿԱԶՄԱԿԵՐՊՎՈՂ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐՈՒՄ ԴԻՆԱՄԻԿ ՊՐՈՑԵՍՆԵՐԻ
ՀԵՏԱԶՈՏՄԱՆ ԳՈՐԾԻՔԱՅԻՆ ԾՐԱԳՐԱՅԻՆ ՄԻՋՈՑՆԵՐԻ ՄՇԱԿՈՒՄ

Ե.13.04 – «Հաշվողական մեքենաների, համալիրների, համակարգերի և ցանցերի մաթեմատիկական և ծրագրային ապահովում» մասնագիտությամբ տեխնիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

Երևան – 2018

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ИНФОРМАТИКИ И АВТОМАТИЗАЦИИ НАН РА

Нагапетян Айк Эдвардович

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ В САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ СИСТЕМАХ

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности
05.13.04 – «Математическое и программное обеспечение вычислительных машин,
комплексов, систем и сетей»

Ереван - 2018

Ատենախոսության թեման հաստատվել է ՀՀ ԳԱԱ Ինֆորմատիկայի և ավտոմատացման պրոբլեմների ինստիտուտում

Գիտական ղեկավար՝
Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝

տեխ.գիտ.դոկտոր Յու.Հ. Շուքրյան
Ֆիզ.մաթ.գիտ.դոկտոր Ա.Կ.Շուքրյան
տեխ.գիտ.թեկնածու Մ.Ղ.Գյուրջյան

Առաջատար կազմակերպություն՝

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական
համալսարան

Պաշտպանությունը կայանալու է 2018թ. հունիսի 18-ին, ժ. 12:00-ին ՀՀ ԳԱԱ Ինֆորմատիկայի և ավտոմատացման պրոբլեմների ինստիտուտում գործող 037 «Ինֆորմատիկա» մասնագիտական խորհրդի նիստում հետևյալ հասցեով՝ Երևան, 0014, Պ. Սևակի 1:

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀՀ ԳԱԱ ԻԱՊԻ գրադարանում:

Սեղմագիրը առաքված է 2018թ. մայիսի 18-ին:

Մասնագիտական խորհրդի
գիտական քարտուղար, ֆիզ.մաթ.գիտ.դոկտոր



Ս. Ս. Սարգսյան

Тема диссертации утверждена в Институте проблем информатики и автоматизации НАН РА

Научный руководитель:

доктор тех.наук

Ю. Г. Шукурян

Официальные оппоненты:

доктор физ.мат.наук

С. К. Шукурян

кандидат тех.наук

М. К.Гюрджян

Ведущая организация:

Национальный политехнический университет
Армении

Защита состоится 18-го июня 2018г. в 12:00 на заседании специализированного совета 037 «Информатика» Института проблем информатики и автоматизации НАН РА по адресу: 0014, г. Ереван, ул. П. Севака 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПИА НАН РА.

Автореферат разослан 18-го мая 2018г.

Ученый секретарь специализированного
совета, доктор физ.мат.наук



А. Г. Саруханян

ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԸՆԴՀԱՆՈՒՐ ԲՆՈՒԹԱԳԻՐԸ

ԹԵՄԱՅԻ ԱՐԴԻԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ժամանակակից գիտական հետազոտություններում առաջնային ուղղություններից մեկը բարդ դինամիկական համակարգերի վարքի ուսումնասիրումն է: Դինամիկական համակարգերը կարող են հանդիսանալ մի շարք ֆիզիկական և կենսաբանական երևույթների, երկրաշարժերի, տնտեսագիտության, հեռահաղորդակցության և շատ այլ ոլորտների նկարագրման հարմարավետ մոդել:

Բարդ դինամիկական համակարգերի կառուցվածքը բնորոշվում է միլիոնավոր և ավել գազաթանի գրաֆի/ցանցի հանգույցներում/բջիջներում տեղադրված պրոցեսորներով(ավտոմատներով), որոնք միմիանց հետ կապված են ինֆորմացիոն կապուղիներով: Համակարգի վիճակները ներկայացվում են հանգույցներում տեղադրված պրոցեսորների վիճակների վեկտորով, իսկ բջջի վիճակների անցումները ձևավորվում են լոկալ անցումային ֆունկցիաներով՝ կախված հարևան պրոցեսորների վիճակներից: Արտաքին մուտքային ազդանշանների հաջորդականություններն ընդհանուր դեպքում ունեն ստոխաստիկ բնույթ և արտահայտում են արտաքին միջավայրի ազդեցությունը համակարգի վրա:

Սույն աշխատանքը վերաբերում է բարդ դինամիկական համակարգերի ենթադաս հանդիսացող **ինքնակազմակերպվող համակարգերին**, որոնցում, որպես կանոն, կարող են առաջանալ վիճակների առաձևահատուկ կարգավորվածություններ: Ժամանակի ընթացքում «դանդաղ» փոփոխելով վիճակը, «թռիչքային» անցում է կատարվում դեպի այսպես կոչված «ռեկուրենտ» վիճակների բազմություն, որը համակարգը չի լքում և, արդյունքում, ռեկուրենտ վիճակների բազմության մեջ շարժման սահմանափակումը ծնում է ներքին կարգավորվածություն: Կարգավորվածության առաջացման և կրիտիկական հատկությունների նման մեխանիզմն անվանվում է **ինքնակազմակերպվող կրիտիկականություն**: Նշված համակարգերի դասի համար որպես մոդելավորման հարմարավետ միջոց կարող են հանդիսանալ բջջային ավտոմատները, պայմանով, որ դրանց միջոցով հնարավոր լինի նկարագրել համակարգերի ինքնակազմակերպվող կրիտիկականությունը: Կատարված հետազոտություններում որպես բջջային ավտոմատներ ընտրվել են **ավազակույտի**^{1,2} և **rotor-router**³ մոդելները:

¹ D. Dhar., Self-organized critical state of sandpile automaton models, Phys.Rev. Lett., 64(14):1613–1616, 1990.

² V. Papoyan, V.S. Poghosyan and V.B. Priezzhev," Spiral Structures in the Rotor-Router Walk", J. Stat. Mech. (2016) 043207

³ B. Priezzhev, D. Dhar, A. Dhar, S. Krishnamurthy, Eulerian walkers as a model of self-organised criticality, Phys. Rev. Lett. 77 (1996) 5079–5082

Նշենք, որ ավազակույտի մոդելը ամենապարզ տեսական մոդելն է՝ ինքնակազմակերպվող կրիտիկականության լավագույնս նկարագրման համար:

Ավազակույտի մոդելով նկարագրվող ֆիզիկական երևույթների ուսումնասիրությունն ավելի արդյունավետ դարձնելու նպատակով մշակվել և գոյություն ունեն գործիքաշարեր, որոնք իրականացնում են ավազակույտի մոդելի սիմուլացիա և տեսաբերում (վիզուալիզացիա): Ավազակույտի մոդելի աշխատանքի ալգորիթմական կիրառություն է կատարվել նաև ոչ բնական համակարգերում, ինչպիսիք են՝ օրինակ, կլաստերային և ամպային համակարգերը:

Այնուամենայնիվ, ավազակույտի մոդելի հետազոտության գոյություն ունեցող գործիքաշարերում առկա են մի շարք թերացումներ, որոնցից են, մասնավորապես՝ ցանցի տեղայնացվածությունը, ավազակույտի մոդելն իրագործող ցանցի ցածր չափայնությունը, համակարգի միաժամանակյա օգտատերերի քանակի խիստ սահմանափակումը, համատեղ աշխատանքների կատարման ընթացքում օգտատերերի ֆունկցիոնալ սահմանափակումները, սիմուլատորի աշխատանքի հաջողականային բնույթը և համակարգի ըստ պահանջի ընդլայնումների հնարավորության բացակայությունը:

Հաշվի առնելով ինքնակազմակերպվող համակարգերի ուսումնասիրման կարևորությունը նաև «լուրջ խաղերի» տեսության մեջ նպատակահարմար է մշակել ավազակույտի մոդելի վրա կառուցված «լուրջ խաղի» ծրագրային օրինակ, որը կարող է գրավիչ հարթակ հանդիսանալ ինքնակազմակերպ կրիտիկականության տեսողական հետազոտության և ուսուցողական նպատակների համար:

Մյուս կողմից, նկատի ունենալով ավազակույտի և rotor-router մոդելների պիտանելիությունը կլաստերային և ամպային համակարգերի կազմակերպման գործընթացներում, մասնավորապես՝ էներգապահպանման և հավասարաչափ բաշխվածության ապահովումը, արդիական խնդիր է լիարժեք սիմուլացնող գործիքաշարի ստեղծումը:

Ատենախոսության նպատակն է հետազոտել և մշակել ծրագրային փաթեթներ ինքնակազմակերպ համակարգերում դինամիկ պրոցեսների ուսումնասիրության համար:

Նշված նպատակին հասնելու համար առաջադրվել և լուծվել են հետևյալ խնդիրները.

- մշակել ավազակույտի մոդելով նկարագրվող ինքնակազմակերպվող դինամիկ պրոցեսների հետազոտման բազմաօգտատեր ծրագրային փաթեթ երկչափ և եռաչափ տեսաբերման հնարավորությամբ:
- դուրս բերել d չափանի խորանարդային ցանցի համար գազաթային ծածկույթների հայտնաբերման ալգորիթմ և իրականացնել ավազակույտի մոդելի աշխատանքի զուգահեռացում տվյալ տոպոլոգիական տարածությունում:

- հավելել «լուրջ խաղերի»⁴ տեսության գրադարանը ևս մեկ «լուրջ խաղ»-ի օրինակով՝ հիմնելով ավագակույտի մոդելի աշխատանքի վրա:
- հետազոտել նեյրոնային ցանցերի օգտագործումը ավագակույտի մոդելի վրա դիտարկվող «Մինիմում ավագահատիկներ և մաքսիմալ հեռավորություն» խնդրի հնարավոր լուծման համար
- նախագծել կլաստերային համակարգի բաշխիչի սիմուլատոր՝ հիմնվելով ավագակույտի և rotor-router մոդելների աշխատանքի ալգորիթմի վրա, համասեռ բաշխվածություն և էներգախնայում ապահովելու նպատակով:

Հետազոտման մեթոդները

Կատարված հետազոտությունները հիմնված են դիսկրետ մաթեմատիկայի, գրաֆների տեսության, ավտոմատների տեսության դրույթների, ինչպես նաև զուգահեռ ծրագրավորման մեթոդների և նեյրոնային ցանցերի մեթոդաբանության օգտագործման վրա:

Գիտական նորությունը

- Մշակվել է d չափանի խորանարդային ցանցի համար գազաթային ծածկույթների հայտնաբերման օպտիմալ ալգորիթմ, որը հիմք է հանդիսացել ցանցերում ավագակույտի մոդելի աշխատանքի զուգահեռացման օպտիմալ ապահովմանը:
- Մշակվել և իրականացվել է լուրջ խաղի ալգորիթմ՝ հիմնված ավագակույտի մոդելի վրա:
- Ստեղծվել է կլաստերային համակարգերում խնդիրների տարաբաշխման նոր ալգորիթմ՝ հիմնված ավագակույտի և rotor-router մոդելների վրա:

Արդյունքների կիրառական նշանակությունը

Մշակված բազմաօգտատեր ծրագրային համակարգը՝ հիմնված ավագակույտի մոդելով նկարագրվող ինքնակազմակերպվող դինամիկ պրոցեսների հետազոտման համար, թույլ է տալիս հետազոտել և հաշվարկել տարբեր ֆիզիկական, ինֆորմացիոն բնութագրիչներ երկչափ և եռաչափ տարածություններում, ինչպես նաև կատարել համատեղ հետազոտություններ՝ աշխատանքների միաժամանակյա դիտման, փոփոխությունների կատարման, մոդելներում վիճակների պահպանման, ստացման և ուղարկման հնարավորություններով:

⁴ Cheng Meng-Tzu, Chen Jih-Hao, Chu Sheng-Ju, Chen Shin-Yen "The use of serious games in science education: a review of selected empirical research from 2002 to 2013", Journal of Computers in Education 2015 Sep. 01 pp. 353-375

Իրականացված ծրագրային փաթեթների միջոցով *d* չափանի խորանարդային ցանցում ավազակույտի մոդելի աշխատանքի զուգահեռացումը՝ հիմնված նույն տոպոլոգիական տարածությունում աստղային լրիվ ծածկույթները նկարագրող բանաձևի վրա, հնարավորություն են տալիս օգտագործողներին կատարել բնութագրիչների հաշվարկ միջև 3 անգամ ավելի արագ նույն CPU-ի սահմաններում, և մինչև 50 անգամ ավելի արագ համարժեք վիդեոկարտայի դեպքում:

Ստեղծված բազմաօգտատեր «լուրջ խաղ»-ի օրինակը՝ հիմնվելով ավազակույտի մոդելի վերաբերող բազմաթիվ թեորեմների վրա և չունենալով հաղթանակին տանող ակընհայտ ստրատեգիա, խթան է հանդիսանում ինքնակազմակերպվող համակարգերի հանդեպ եղած հետաքրքրության մեծացմանը, հետևաբար նաև համատեղ ուսուցմանը և հետազոտմանը:

«Մինիմում ավազահատիկներ և մաքսիմալ հեռավորություն» խնդրի հետազոտմանը միտված նեյրոնային ցանցերի մշակումը հնարավորություն է ստեղծում փոխարինել ավազակույտի աշխատանքի սիմուլյացիան համապատասխան նեյրոնային ցանցով՝ տույնով օպտիմիզացնելով պահաջվող սպասվելիք արդյունքների ստացման ժամանակը:

Նախագծված կլաստերային համակարգի սիմուլատորը՝ հիմնված ավազակույտի և rotor-router մոդելների աշխատանքի ալգորիթմի վրա, դյուրացնում է ինքնակազմակերպվող համակարգերի աշխատանքային ալգորիթմի դրսևորման հետազոտումը կլաստերային համակարգերում: Ինչպես նաև նկարագրված և առաջ բերված հիպոթեզը rotor-router մոդելների տրամաբանությամբ խնդիրների տարաբաշխման համակարգի վերաբերյալ կարող է դինամիկ խնդիրների պլանավորման նոր հիմք հանդիսանալ:

Պաշտպանությանը ներկայացվող դրույթները

- *d* չափանի խորանարդային ցանցի համար գազաթային ծածկույթների հայտնաբերման օպտիմալ մեթոդի մշակումը,
- լուրջ խաղի ալգորիթմի մշակումը՝ հիմնված ավազակույտի մոդելի վրա,
- կլաստերային համակարգերում խնդիրների տարաբաշխման նոր ալգորիթմի մշակումը՝ հիմնված ավազակույտի և rotor-router մոդելների վրա,
- վերոհիշյալ դրույթների ալգորիթմական ներկայացումը բազմաօգտատեր միջավայրում:

Աշխատանքի արդյունքների ներդրումը

Աշխատանքում մշակված համակարգերից ներդրվել և փորձարկվել են Հայկական ազգային հաշվողական գրիդ ենթակառուցվածքում (Երևան, Հայաստան): Մշակված

համակարգերը օգտագործվել է որպես գործիքային ծրագրային միջոց վիճակագրական ֆիզիկայի խնդիրների լուծման համար Դուբնայի ՄՀՄԻ-ի և ԻԱՊԻ-ի համատեղ հետազոտողական խմբի կողմից:

Աշխատանքի ապրոբացիան. Ատենախոսության հիմնական արդյունքները զեկուցվել են.

- Միջազգային գիտաժողով՝ “Computer Science and Information Technology” (CSIT-2013), Երևան, Հայաստան, 2013 թ.
- Միջազգային գիտաժողով՝ “Computer Science and Information Technology” (CSIT-2017), Երևան, Հայաստան, 2017 թ.
- ՀՀ ԳԱԱ ԻԱՊԻ ընդհանուր սեմինարներում
- Թուլուզի IRIT (Կոմպյուտերագիտության ինստիտուտ) լաբորատորիայի սեմինարին

Հրատարակումներ

Աշխատանքի հիմնական արդյունքները ներկայացված են 6 գիտական աշխատություններում, որոնց ցանկը բերված է սեղմագրի վերջում:

Ատենախոսության կառուցվածքը

Ատենախոսությունը բաղկացած է առաջաբանից, 4 գլուխներից, 63 անուն պարունակող գրականության ցանկից: Աշխատանքի ընդհանուր ծավալը կազմում է 106 էջ:

ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ՀԻՄՆԱԿԱՆ ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ներածության մեջ հիմնավորվել է ատենախոսության թեմայի արդիականությունը, ներկայացվել են հետազոտության նպատակն ու խնդիրները, գիտական նորույթը, պաշտպանությանը ներկայացվող հիմնական դրույթները և հետազոտության տեսական ու գործնական նշանակությունը:

Ատենախոսության **առաջին գլխում** նկարագրվել են ինքնակազմակերպվող համակարգերը, դրանց աշխատանքի սկզբունքը և հիմնախնդիրները: Ներկայացվել են նաև ինքնակազմակերպվող համակարգերը մոդելավորող և սիմուլյացնող արդի ծրագրային փաթեթները, ինչպես նաև նկարագրվել են «լուրջ խաղերի» հայեցակետերը և կլաստերային համակարգերի գոյություն ունեցող իրականացումները հիմնված ինքնակազմակերպվող համակարգերի մոդելների վրա:

Բաժին 1.1-ում ներկայացվել են ինքնակազմակերպվող համակարգերի **ավազակույտի** և **rotor-router** մոդելները: Մասնավորապես, ավազակույտի մոդելը արտահայտվում է $G = (V, E)$ գրաֆով (V -ն գագաթների, E -ն կողերի բազմություններն են), $\eta : V \rightarrow N(N-ը բնական թվերի բազմությունն է) արտապատկերմամբ, որն անվանվում$

է **կոնֆիգուրացիա**, որտեղ $\eta(v)$ -ով կնշանակենք $v \in V$ գագաթում պարունակվող ավազահատիկների քանակը (v **գագաթի հզորություն**): G գրաֆում առանձնացնենք $S \subset V, S \neq \emptyset$ գագաթների բազմությունը, որոնց կանվանենք **փոսեր**: G գրաֆում $v \in V \setminus S$ գագաթը կանվանենք **կայուն**, եթե $\eta(v) < d_v, d_v = \sum_{w \in V} a_{v,w}$, որտեղ $a_{v,w}$ -ն $v, w \in V$ գագաթները կապող կողերի քանակն է: Նշված պայմանին չբավարարող գագաթները կոչվում են **անկայուն**: **Փլուզում** կանվանենք v անկայուն գագաթից մեկական ավազահատիկների փոխանցումը իրեն կից կողերով հարևան գագաթներին, որի հետևանքով ծնվում է նոր η' կոնֆիգուրացիա, որտեղ $\eta'(v) = \eta(v) - d_v$ և $\eta'(w) = \eta(w) + a_{v,w}, \forall w \in V$: Փոսերն ըստ սահմանման երբեք չեն փլուզվում, ուստի դրանց կարելի է համարել կայուն: η **կոնֆիգուրացիան կանվանենք կայուն**, եթե այդ կոնֆիգուրացիայում բոլոր գագաթները կայուն են:

Սույն գլխում պարզաբանված է նաև ավազակույտի մոդելի արելյան հատկությունը, որը հնարավորություն է ընձեռում ստանալ մոդելի միևնույն վերջնական վիճակը՝ անկախ ավազակույտի մոդելում կատարվող փոփոխությունների հաջորդականությունից: Բերված են նաև ատենախոսության բովանդակությանը հարկավոր սահմանումները: Թվարկված են ավազակույտի մոդելի այն կարևոր բնութագրիչները, որոնք անհրաժեշտ է հաշվարկել ծրագրային փաթեթի միջոցով:

Բաժին 1.2-ում ներկայացված են ինքնակազմակերպվող համակարգերի հետազոտման գոյություն ունեցող ծրագրային փաթեթները՝ մոդելների տեսաբերման և աշխատանքի սիմուլյացիայի նկարագրությամբ, ինչպես նաև դրանց առավելությունները և թերությունները: Մասնավորապես, դիտարկվել է ամենահայտնի և ֆունկցիոնալ տեսանկյունից ամենահարուստ NetLogo ծրագրային փաթեթը:

Բաժին 1.3-ում նկարագրված են ազավակույտի արելյան մոդելի հիման վրա առաջադրված «Մինիմում ավազահատիկներ և մաքսիմալ հեռավորություն» խնդիրը: Նկարագրված է խնդրին վերաբերող արդի լուծումները: Նշեմ, որ բոլոր լուծումները հանդիսանում են մոտարկմամբ լուծումներ. մինչև այժմ խնդրի ճշգրիտ լուծումը նկարագրող բանաձև գոյություն չունի:

Բաժին 1.4-ում բերված են կլաստերային համակարգերի օրինակներ^{5,6}, իրենց առավելություններով և թերություններով, որոնցում խնդիրների տեղաբաշխումն իրականացված է ավազակույտի մոդելի ներգրավմամբ:

⁵ J.L.J. Laredo, P. Bouvry, F. Guinand, B. Dorransoro, C. Fernandes, " The sandpile scheduler" Cluster Comput (2014) 17:191-204

⁶ J. Gąsior, F. Seredyński. A Sandpile cellular automata-based scheduler and load balancer. Journal of Computational Science, Volume 21, July 2017, Pages 460-468

Ատենախոսության **երկրորդ գլուխը** նվիրված է աշխատանքում ստացված տեսական արդյունքների և մշակված ալգորիթմների նկարագրությանը, որոնք հետագայում ծրագրային փաթեթների աշխատանքի հիմք են հանդիսանում:

Բաժին 2.1-ում ձևակերպված է d չափանի խորանարդային ցանցերում աստղային ծածկույթները նկարագրող բանաձևը, որի հիմք է հանդիսացել d չափանի խորանարդային ցանցերում ավազակույտի աբելյան մոդելի աշխատանքի զուգահեռացմանը:

Դիտարկենք d չափանի ցանց L_d ՝ n գծային երկարությամբ, պարբերական սահմանային պայմաններով, որն իրենից ներկայացնում է գրաֆ հետևյալ գագաթների բազմությամբ.

$$V = V(L_d) = \{v = (x_1, x_2, \dots, x_d) : x_i = 0, 1, 2, \dots, n - 1; \\ i = 1, 2, \dots, d\}$$

և ոչ ուղղորդված $E = E(L_d)$ կողերով, որոնք սահմանվում են հետևյալ կանոններով: Յուրաքանչյուր $v = (x_1, x_2, \dots, x_d) \in V$ գագաթ հարևան է $2d$ քանակությամբ գագաթների՝ տրված հարևանության ցուցակին համապատասխան.

$$Adj(v) = \{(x_1, x_2, \dots, (x_k \pm 1) \bmod n, \dots, x_d) : k = 1, 2, \dots, d\}$$

Գագաթների և կողերի քանակը համապատասխանաբար ստացվում է $|V| = n^d$, $|E| = d * n^d$. Կասենք որ երկու v_1 և v_2 գագաթներ անկախ են, եթե նրանք հարևան չեն և չունեն ընդհանուր հարևան

$$v_1 \notin Adj(v_2), v_2 \notin Adj(v_1) \text{ and } Adj(v_1) \cap Adj(v_2) = \emptyset$$

Աստղային ծածկույթի խնդիրն իրենից ներկայացնում է L_d ցանցի ծածկումը չհատվող աստղային գրաֆներով. Դիտարկենք աստղային ծածկույթ, որի աստղային գրաֆների կենտրոնական գագաթների բազմությունը պետք է բավարարի հետևյալ 2 պայմաններին.

- ամբողջական ծածկույթի պայման
 $(\cup_{v \in V'} Adj(v)) \cup V' = V$

2. չհատման պայման: կամայական երկու $v_1, v_2, \in V'$ անկախ են:

Ակնհայտ է, որ աստղային ծածկույթ գոյություն ունի այն և միայն այն դեպքում, երբ V -ն անմնացորդ բաժանելի է $2d + 1$ -ի վրա :

Տրված է $v = (x_1, x_2, \dots, x_d) \in V$ գազաթը, և $\vec{r} = (p_1, p_2, \dots, p_d) \in Z$ վեկտորը: Սահմանենք $v + \vec{r}$ գումարման գործողությունը, որի արդյունքը կլինի գազաթ V -ում հետևյալ կորդինատներով.

$$v + \vec{r} \equiv ((x_1 + p_1) \bmod n, (x_2 + p_2) \bmod n, \dots, (x_d + p_d) \bmod n) \in V$$

Համապատասխանաբար, \vec{r} վեկտորի և v -ի կամայական ենթաբազմության գումարը $V' \subseteq V$ ենթաբազմությունն է:

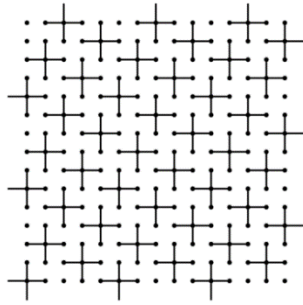
$$V' + \vec{r} \equiv \{v + \vec{r} : v \in V'\} \subseteq V$$

Նկատենք, որ V' -ի ենթաբազմությամբ նկարագրվող աստղային ծածկույթի դեպքում , $V' + \vec{r}$ -ը նույնպես կնկարագրի աստղային ծածկույթ, որտեղ $\vec{r} \in V'$:

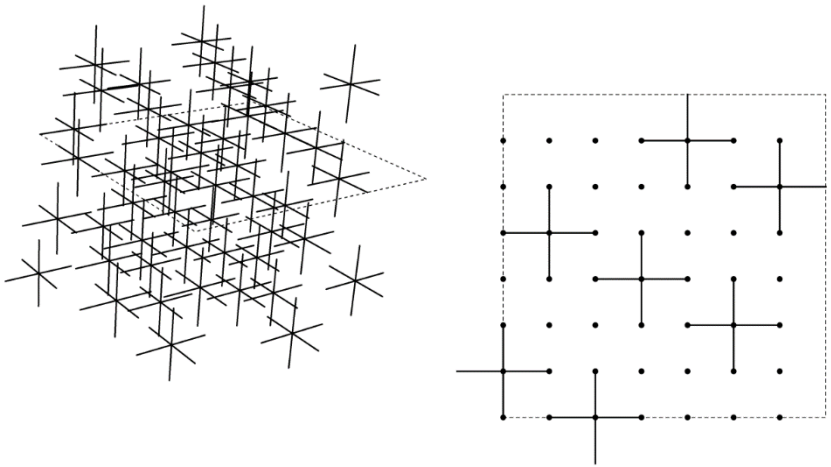
Թեորեմ, դիտարկենք d չափանի ցանց L_d ՝ n գծային երկարությամբ և պարբերական սահմանային պայմանով. Ենթադրենք, որ n -ը անմնացորդ բաժանելի է $2d + 1$ -ի վրա: Ապա գոյություն ունի L_d -ի աստղային ծածկույթ, որի աստղային գրաֆների կենտրոնական գազաթները նկարագրվում են հետևյալ բանաձևով

$$V' = \{v = (x_1, x_2, \dots, x_d) : (x_1 + 2x_2 + 3x_3 + \dots + d x_d) \bmod (2d + 1) = 0, v \in V\}$$

Մասնավորապես, երկչափ, եռաչափ և քառաչափ ցանցերի դեպքում կունենանք հետևյալ պատկերները:



Նկար 1: Երկչափանի ցանցի աստղային ծածկույթ:



Նկար 2: Եռաչափ և քառաչափ ցանցերի աստղային ծածկույթ, $Z=4$ առանցքը պատկերված է աջ մասում:

Նույն բաժնում բերված է նաև վերոնշյալ թեորեմի ապացույցը:

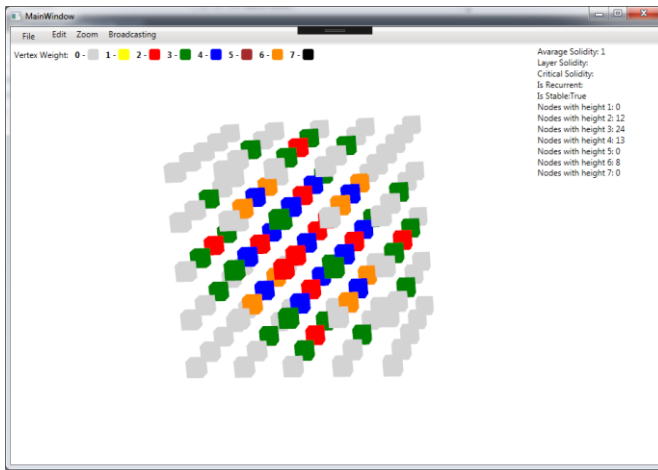
Բաժին 2.2-ում նկարագրված է ավազահատիկների քանակի $C = 3 * n^3$ ստորին գնահատականի ստացումը փակ եզրերով եռաչափ ցանցում անվերջ անկայուն վիճակի հասնելու համար: Ստորին գնահատականի առկայությունն օգտագործվել է կատարված աշխատանքներից «լուրջ խաղի» օրինակ հանդիսացող SandGame ծրագրային փաթեթում, որտեղ խաղից առաջ մոդելը սկզբնաթեքավորվում է $C - 1$ քանակությամբ ավազահատիկներով՝ կրճատելով խաղում հաղթելուն անհրաժեշտ քայլերի քանակը:

Բաժին 2.3-ում ներկայացված են rotor-router համակարգի առանձնահատկությունները: Մասնավորապես հետաքրքրություն է առաջացրել rotor-router մոդելում ավազահատիկների հավասարաչափ տեղաբաշխումը տարբեր

տոպոլոգիական տարածություններում: Մեր կողմից այս առանձնահատկությունն օգտագործվել է կլաստերային համակարգերի, ավազակույտի և rotor-router մոդելների աշխատանքային սկզբունքներով օժտված, սիմուլատորի բաշխիչի ստեղծման համար: Բացի այդ, առաջ է քաշվել հիպոթեզ, որ rotor-router մոդելի հիման վրա ստեղծված կլաստերային համակարգում խնդիրների հավասարաչափ բաշխվածություն կապահովի ոչ միայն ստատիկ, այլ և դինամիկ խնդիրների դեպքում: Ընդամին, դինամիկ խնդիրներ ասելով հասկանում ենք, որ յուրաքանչյուր խնդիր ունի կատարման անհրաժեշտ ժամանակ, և ավարտվելուն (կատարվելուն) պես ազատում է զբաղեցրած հանգույցը:

Ատենախոսության **երրորդ գլուխը** նվիրված է մշակված ծրագրային փաթեթների, իրականացման համար ընտրված միջավայրի, ծրագրավորման լեզվի, ալգորիթմական աշխատանքների և օգտագործման սկզբունքների նկարագրությանը:

Բաժին 3.1-ում ներկայացված է բազմաօգտատեր «CA Simulator» համակարգը, որը նախատեսված է ինքնակազմակերպվող համակարգերի հետազոտման նպատակով: Մեր աշխատանքների դեպքում ինքնակազմակերպվող համակարգի օրինակ է ընտրվել ավազակույտի արեյան մոդելը: «CA Simulator» համակարգը, նպատակաուղղված լինելով բազմաօգտագործողների համար, հնարավորություն է տալիս կատարել հետազոտություններ երկչափ և եռաչափ տարածություններում համատեղ կատարվող հետազոտական աշխատանքների միաժամանակյա դիտման, փոփոխությունների կատարման, մոդելներում վիճակների պահպանման, ստացման և ուղարկման հնարավորություններով: Նախատեսված է նաև մոդելի տվյալ պահին տարբեր ֆիզիկական և ինֆորմացիոն բնութագրիչների տեսաբերման հնարավորություն, որն ավելի նպատակահարմար է դարձնում «CA Simulator» համակարգի օգտագործումը:



Նկար 3: CA Simulator միջավայրը ավազակույտի արեյան մոդելի օրինակով

Բաժին 3.2-ում ներկայացված է բազմաօգտատեր SandGame «լուրջ խաղի» օրինակը, որն ստեղծվել է ավագակույտի աբեյյան մոդելի հիման վրա՝ նպատակ ունենալով խթանել ինքնակազմակերպվող համակարգերի հետազոտումը և դյուրըմբռումը: Խաղը միաժամանակ ապահովում է երկչափ և եռաչափ տեսաբերում, ինչպես նաև դիտման անկյունների փոփոխություն և շերտերի առանձին դիտման հնարավորություն: Վերոնշյալից զատ, SandGame-ում կա նաև մոդելի տվյալ պահին վերաբերող համապատասխան բնութագրիչների տեսաբերում իրական ժամանակում, որոնք, ավագակույտի մոդելին վերաբերող բազմաթիվ թերեմների հետ մեկտեղ նպաստում են օգտատերերի ավելի ճշգրիտ որոշումների կայացմանը: Նշենք նաև, որ SandGame-ը չունի ինչպես հոսթինգների, այնպես էլ միևնույն հոսթինգի օգտատերերի քանակի սահմանափակումներ:

Խաղում օգտագործողների նպատակն է հասնել անվերջ անկայուն վիճակի հերթով գցելով ավագահատիկներ օգտագործողների կողմից ընտրված կորդիինատներին: Խաղը՝ դիտարկված լինելով փակ եզրակետերով եռաչափ ցանցի վրա, հնարավորություն է ընձեռում մոդելին չկորցնել ավագահատիկ: Հետևաբար, կարելի է վստահ լինել վերջավոր ժամանակում հաղթող ճանաչվելու փաստում: Գտնվել է նաև ավագահատիկների քանակի ստորին գնահատականը, որով սկզբնարժեքավորելու դեպքում կարելի է համոզված լինել մոդելի անվերջ անկայուն վիճակի մեջ չընկնելու մեջ: Ուստի մոդելը նախօրոք սկզբնարժեքավորվում է պատահականության սկզբունքով՝ ամեն անգամ հնարավորություն տալով նոր խաղային ռազմավարության: Բացի այդ, զգալիորեն կրճատվում է հաղթողի ճանաչմանն անհրաժեշտ քայլերի քանակը:

Բաժին 3.3-ում բերված է «Մինիմում ավագահատիկներ և մաքսիմալ հեռավորություն» խնդրի ուսումնասիրության նպատակով մշակված նեյրոնային ցանցի նկարագրությունը: Նշենք, որ տարբեր կոնֆուգարացիաների վարքագծային հետազոտման նպատակով նեյրոնային ցանցի ներգրավումը պայմանավորված է այն հանգամանքով, որ տվյալ խնդրի համար մինչ այժմ բացակայում է լուծման որևէ ճշգրիտ ալգորիթմ

Բաժին 3.4-ում ներկայացված է ավագակույտի և ռոտոր-ռոտտեր մոդելների վրա հիմնված կլաստերային համակարգերի աշխատանքը սիմուլացնող և տեսաբերող «SandScheduler» ծրագրային փաթեթը:

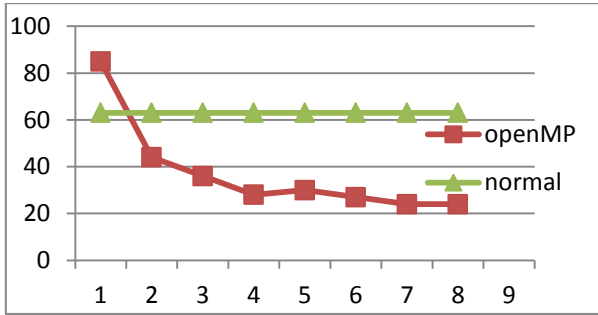
Ատենախոսության **չորրորդ գլխում** գետեղված են ինքնակազմակերպվող համակարգերի ուսումնասիրմանը նվիրված ծրագրային փաթեթների, ստացված տեսական արդյունքերի հիման վրա փորձարկված ինչպես նաև մշակված նեյրոնային ցանցերի կողմից ստացված արդյունքերի համեմատական վերլուծությանը:

Բաժին 4.1-ում ներկայացված է «CA Simulator» ծրագրային փաթեթի գործարկման արդյունքների և գոյություն ունեցող լուծումների միջև տարբերությունը:

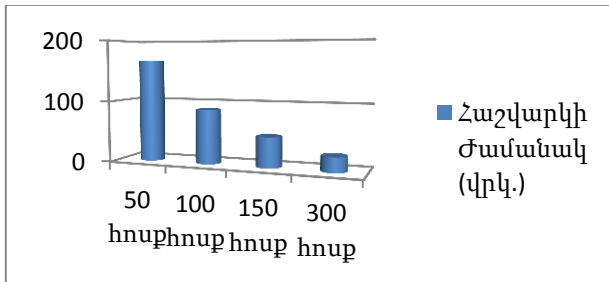
Մասնավորապես, դիտարկվել է NetLogo միջավայրը, որը, լինելով բազմաազենտ համակարգերի ծրագրավորման միջավայր և ունենալով հարուստ գրադարան, ամենահայտնի և ֆունկցիոնալ առումով ամենահարուստն է մինչև այժմ գոյություն ունեցող լուծումների միջև: Այնուամենայնիվ «CA Simulator»-ը, օժտված լինելով բազում ֆունկցիոնալ հատկություններով, ոչ միայն լրացնում է ամենահայտնի լուծումներում հանդիպող բացթողումները, այլ և ներառում է, բայց չի սահմանափակվում արդի լուծումների ֆունկցիոնալ հնարավորություններով, ինչպիսիք են, օրինակ՝ բազմաօգտատեր միջավայրի ապահովումը գլոբալ ցանցում, եռաչափ ցանցի կառուցումը և տեսաբերումը, ինչպես նաև տեսաբերվող ցանցի դիտման անկյունների փոփոխությունները, դիտարկվող ցանցի շերտերի և ենթամասերի առանձակի տեսաբերումը, մոդելի ինչպես կետային, այնպես էլ մասնակի փոփոխությունները պատահական և կոնկրետ սկզբունքով, ֆիզիկական և ինֆորմացիոն բնութագրիչների հաշվարկը և այլն: Նշենք նաև, որ «CA Simulator» փաթեթի միջոցով կարելի է կատարել բազմաթիվ տարանջատված համատեղ հետազոտություններ, և պահպանել հետազոտությունների ընթացքում կամայական պահին մոդելի վիճակը՝ հետագա ինչպես համատեղ, այնպես էլ միանձնյա հետազոտությունների համար:

«CA Simulator»-ը ստեղծվել է օգտագործելով .Net միջավայրը և C# լեզուն, իսկ սերվերի տեղակայման համար ընտրվել է Microsoft Azure-ը: Իրականացման ընթացքում պահպանվել են OՎԾ-ի (OOP) բոլոր ստանդարտները և SOLID-ի սկզբունքները, որոնք խիստ անհրաժեշտ են այնքանով, որ հնարավորություն են ընձեռում ավելի դյուրին կերպով կատարել համակարգի ֆունկցիոնալ ընդլայնումը և հավելումը այլ բջջային ավտոմատների մոդելներով:

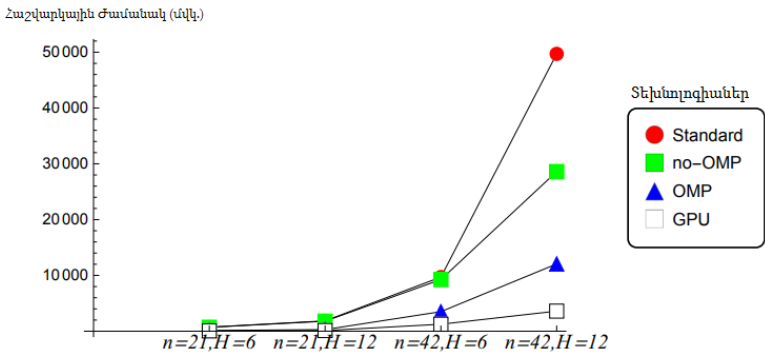
Բաժին 4.2-ում կատարված է համեմատական վերլուծություն ավազակույտի մոդելի սիմուլատորի աշխատանքի զուգահեռ և ոչ զուգահեռ տարբերակների ժամանակների միջև: Ավազակույտի մոդելը՝ դիտարկվելով բազ եզրերով երկչափ և եռաչափ ցանցերի վրա, սկզբնարժեքավորվել է որոշակի քանակությամբ ավազահատիկներով, որից հետո սիմուլատորը, սկսելով իր աշխատանքը, մոդելը ձգտեցրել է կայուն վիճակի: Որպես աշխատանքային ժամանակ, դիտարկվել է սիմուլատորի աշխատանքի մեկնարկի և մոդելի կայունանալու ավարտի ժամանակային տարբերությունը: Սիմուլատորի աշխատանքի զուգահեռացումը կատարվել է՝ օգտագործելով openMP և CUDA տեխնոլոգիաները: Ստորև բերված է համեմատական վերլուծություն երկչափ և եռաչափ ցանցերի վրա դիտարկված ավազակույտի մոդելների սիմուլատորի աշխատանքային ժամանակների միջև:



Նկար 5: CPU - Intel i7 2670QM,
250.000 հանգույց երկչափ ցանցում, 1.000.000 ավազահատիկ



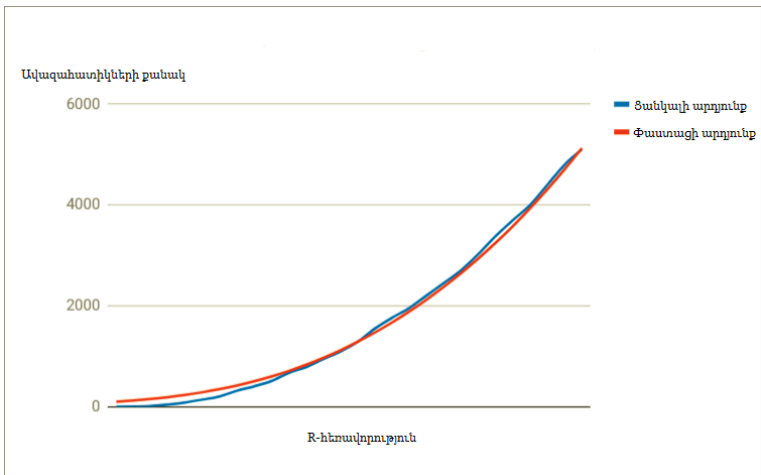
Նկար 6: GPU - Nvidia GT-540m,
250.000 հանգույց երկչափ ցանցում, 1.000.000 ավազահատիկ



Նկար 7: Եռաչափ ցանց, համետական վերլուծություն

Զուգահեռացման շնորհիվ նույն ռեսուրսների միջոցով հնարավոր է դարձել ստանալ մինչև 3 անգամ ավել արագագործություն openMP տեխնոլոգիայի միջոցով: Իսկ նկար 5 և 6-ում տեսանելի է CUDA-ի միջոցով ստացված ժամանակային լուրջ արդյունքները: Սովորական փլուզումների դեպքում օգտագործելով համարժեք VideoCard հնարավոր է ստանալ մինչև 50 անգամ արագագործություն, իսկ փլուզման ժամանակ փլուզման գործողությունից զատ՝ մոդելում այլ ժամանակատար փոփոխության դեպքում տարբերությունն է՛լ ավելի է աճում, որը պարզ տեսանելի է նկար 5 և 6-ում:

Բաժին 4.3-ում բերված է «Մինիմում ավազահատիկներ և մաքսիմալ հեռավորություն» խնդրի շրջանակներում ներյոնային ցանցերի և ճշգրիտ արդյունքների միջև համեմատական վերլուծությունը: Ներկայացված են ներյոնային ցանցերի լավագույն կոնֆիգուրացիաները, որոնք ճշգրիտ արդյունքներին հնարավորինս մոտ արդյունքներ են տվել: Մասնավորապես, ընտրվել է բազմաշերտ բաղադրիչ տիպի ներյոնային ցանցը մեկ մուտքային և մեկ ելքային ներյոններով: Ներյոնային ցանցում օգտագործվել են Bias ներյոնները, որպես փոխանցման ֆունկցիա ընտրվել է սիգմոիդ տիպը, մինչդեռ ուսուցողական կանոնը մշակվում է back-propagation մեթոդաբանության վրա: Դիտարկված ներյոնային ցանցերում կա ընդհամենը մեկ մակադակի թաքնված շերտ, որի ներյոնների քանակությունը տարբերակվում է նշված համեմատական վերլուծություններում:



Նկար 8: 15 թաքնված ներյոն

Ինչպես երևում է նկար 9-ից, ներյոնային ցանցի կողմից ճշգրիտ արդյունքներին ավելի մոտ արդյունք ստացվում է R հեռավորության մեծացմանը զուգընթաց:

ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ՀԻՄՆԱԿԱՆ ԱՐԴՅՈՒՆՔՆԵՐ

- Մշակվել է բազմաօգտատեր ծրագրային համակարգ՝ նախատեսված ավազակույտի մոդելով նկարագրվող ինքնակազմակերպվող դինամիկ պրոցեսների ֆիզիկական և ինֆորմացիոն բնութագրիչների համատեղ հետազոտման համար: [3]
- Առաջարկվել է d չափանի խորանարդային ցանցերում ավազակույտի մոդելի աշխատանքի զուգահեռացման նոր մեթոդ՝ հիմնված տվյալ տոպոլոգիական տարածությունում աստղային լրիվ ծածկույթները նկարագրող բանաձևի վրա: [1-2]
- Ստեղծվել է բազմաօգտատեր «լուջ խաղ»-ի օրինակ՝ հիմնված ավազակույտի մոդելի վրա: [4]
- Հետազոտվել և մշակվել են համապատասխան նեյրոնային ցանցեր «Մինիմում ավազահատիկներ և մաքսիմալ հեռավորություն» խնդրի լուծման նպատակով: Իրականացվել է նեյրոնային ցանցերով ստացված և ավազակույտի մոդելի սինուլացիայի միջոցով ստացված արդյունքների համեմատական վերլուծություն: [6]
- Նախագծվել է կլաստերային համակարգի սիմուլատոր՝ հիմնված ավազակույտի և rotor-router մոդելների աշխատանքի ալգորիթմի վրա: [5]

ՀՐԱՏԱՐԱԿՎԱԾ ԱՇԽԱՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ

1. V.S. Poghosyan, S.S. Poghosyan and H.E. Nahapetyan, “The Investigation of Models of Self-Organized Systems by Parallel Programming Methods Based on the Example of an Abelian Sandpile Model”, Proc. CSIT Conference 2013, Yerevan Armenia, Sept. 23-27, pp. 260-262.
2. Hayk E. Nahapetyan, Suren S. Poghosyan, Vahagn S. Poghosyan and Yuri H. Shoukourian, “The Parallel Simulation Method for d -dimensional Abelian Sandpile Automata”, Transactions of IIAP of NAS of RA, Mathematical Problems of Computer Science 46, pp.117-125, 2016.
3. Hayk E. Nahapetyan , Jean-Pierre Jessel , Suren S. Poghosyan, Yuri H. Shoukourian, “A multi-user and multi-purpose CA simulator ” IEEE conference proceedings pp.23 – 26, 2017, [10.1109/CSITechnol.2017.8312133](https://doi.org/10.1109/CSITechnol.2017.8312133)
4. Hayk E. Nahapetyan, “An Example of a Multiplayer Serious Game on 3D Sandpile Model”, Mathematical Problems of Computer Science 48, pp. 5-13, 2017.
5. Hayk E. Nahapetyan, Suren S. Poghosyan “Dynamic Task Scheduling Based On Abelian Sandpile and Rotor-Router Models”, Transactions of IIAP of NAS of RA, Mathematical Problems of Computer Science 49, pp.41-48, 2018
6. Hayk E. Nahapetyan, “Usage of Neural Networks for ASM Research”, Transactions of IIAP of NAS of RA, Mathematical Problems of Computer Science 49, pp.58-65, 2018

РЕЗЮМЕ

Айк Э. Нагапетян

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ СИСТЕМАХ

Одним из основных направлений в современных научных исследованиях является изучение поведения сложных динамических систем. Динамические системы привлекательны для исследований, как так они могут быть удобной моделью для описания ряда физических и биологических явлений, землетрясений, экономики, телекоммуникаций и многих других областей. Структура сложных динамических систем характеризуется процессорами (автоматами), установленными в узлах/ячейках графа/сети, которые связаны друг с другом информационными каналами. Состояние системы представляется вектором состояний процессоров в узлах, а переходы состояния ячейки формируются локальными функциями переходов в зависимости от состояния соседних процессоров. Последовательности внешних входящих сигналов обычно имеют стохастический характер и отражают влияние внешней среды на систему.

Настоящая работа относится к подклассу динамических систем, так называемых «самоорганизующихся» систем, в которых как правило, могут создаваться определенные упорядочения состояний: С течением времени, «медленно» изменяя состояние, осуществляется «быстрый» переход в так называемое множество «рекуррентных» состояний, и, как следствие, ограниченное движение в повторяющихся состояниях создает внутреннюю упорядоченность. Такой механизм возникновения упорядочения и критических свойств называется самоорганизованной критичностью. Удобным средством моделирования для упомянутого выше класса систем могут быть клеточные автоматы, с тем условием что ими можно описать самоорганизованную критичность систем. Для исследования моделей песчаной кучи^{1, 2} и ротор-роутера³, выбраны клеточные автоматы. Следует отметить, что модель песчаной кучи является простейшей и наилучшей теоретической моделью описания самоорганизующейся критичности. Для изучения физических явлений, описанных моделью песчаной кучи, существуют инструменты, которые имитируют моделирование и визуализацию песчаной кучи. Алгоритмическая реализация модели песчаной кучи показана также для неприродных систем, таких как кластерные и облачные системы.

¹ D. Dhar., Self-organized critical state of sandpile automaton models, Phys.Rev. Lett., 64(14):1613–1616, 1990.

² V. Papoyan, V.S. Poghosyan and V.B. Priezzhev, " Spiral Structures in the Rotor-Router Walk", J. Stat. Mech. (2016) 043207

³ B. Priezzhev, D. Dhar, A. Dhar, S. Krishnamurthy, Eulerian walkers as a model of self-organised criticality, Phys. Rev. Lett. 77 (1996) 5079–5082

Тем не менее, существует ряд недостатков в инструментах исследования модели песчаной кучи, такие как: локальность сети, привлечение сетей с низкой пропускной способностью, строгие ограничения количества одновременных пользователей, функциональные ограничения пользователей во время совместной работы, последовательный характер работы симулятора и не масштабируемости системы.

Принимая во внимание важность самоорганизованных систем для развития теории «серьезных игр», целесообразным представляется разработка программного примера «серьезной игры», построенной на модели песчаной кучи, который может быть подходящей платформой для визуализации и обучения явления критичной самоорганизации.

Другой актуальной проблемой является рассмотрение моделей песчаной кучи и ротора-роутера в кластерных и облачных системах для создание полного симулятора с целью использования при решении задач организации таких систем (энергосбережение и равномерное распределение задач),

Целью диссертации является изучение и разработка инструментальных программных средств для изучения процессов в самоорганизующихся системах.

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи:

- Разработать многопользовательский программный пакет для исследования самоорганизующихся динамических процессов, описанных с помощью модели песчаной кучи на двумерной и трехмерной решетках.
- Найти оптимальный алгоритм построения «звездных» покрытий (разбиений узлов) для d -мерной решетки и параллельного моделирования модели песчаной кучи в данном топологическом пространстве.
- Разработать пример «серьезной игры», основанной на модели песчаной кучи с последующим добавлением примера в библиотеку теории «серьезных игр».
- Исследовать возможность использования искусственных нейронных сетей для решения некоторых проблем, описанных на модели песчаной кучи.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

- Разработана многопользовательская программная система для совместного исследования физических и информационных характеристик самоорганизующихся динамических процессов, описываемых моделью песчаной кучи. [3]
- Предложен новый метод распараллеливания модели песчаной кучи на d -мерных решетках, спроектированного на основе формулы, описывающей звездные покровы в данном топологическом пространстве. [1-2]
- Разработан пример «серьезной игры», основанный на модели песчаной кучи. [4]

- Исследованы и разработаны нейронные сети для решения проблемы «минимального песка и максимального расстояния». Проведен сравнительный анализ результатов, полученных с помощью нейронной сети и имитирующей модели. [6]
- Разработан симулятор кластерной системы, основанный на алгоритме моделей песчаной кучи и роторных маршрутизаторов. [5]

ABSTRACT

Hayk E. Nahapetyan

DEVELOPMENT OF SOFTWARE TOOLS FOR INVESTIGATION OF DYNAMIC PROCESSES IN SELF-ORGANIZED SYSTEMS

One of the primary directions in modern scientific research is the study of the behavior of complex dynamic systems. Dynamic systems are attractive for research as they can be a convenient model for describing a number of physical and biological phenomena, earthquakes, economics, telecommunications, and many other areas. The structure of complex dynamic systems is characterized by huge number of interconnected processors installed in graph's/network's nodes/cells. Meanwhile, the state of the system is represented by the vector of nodes' processor states, where the transitions among states are performed by local switching functions depending on the state of neighboring processors. Sequences of the external incoming signals generally have a stochastic nature and have influence on the external environment.

This work refers to self-organizing systems that are subgroup to complex dynamic systems, in which typically specific status-states can be created over time as a result of "slow changes" in states. Due to a flight transition made to a so-called "recurrent" state, restriction of motions within recurrent states creates an internal ordering. The mechanism of emerging the ordering together with the critical properties is called self-organized criticality of the system. A convenient means for modeling the class of the abovementioned systems may be cellular automata with provision of possibility to describe the system self-organized criticality. For cellular automata investigation, the sandpile^{1, 2} and rotor-router³ models were selected. It should be noted that the sandpile model is the simplest theoretical model for the best description of self-organized criticality.

Up to date, there are lots of tools to study physical phenomena described by the sandpile model, also for their simulation and visualization. A number of algorithmic solutions have been implemented also for non-natural systems, such as cluster and cloud systems.

¹ D. Dhar., Self-organized critical state of sandpile automaton models, Phys.Rev. Lett., 64(14):1613-1616, 1990.

² V. Papoyan, V.S. Poghosyan and V.B. Priezzhev," Spiral Structures in the Rotor-Router Walk", J. Stat. Mech. (2016) 043207

³ B. Priezzhev, D. Dhar, A. Dhar, S. Krishnamurthy, Eulerian walkers as a model of self-organised criticality, Phys. Rev. Lett. 77 (1996) 5079-5082

However, there are a number of shortcomings in the sandpile model research tools, such as: network locality; sandpile grid limitations; small number of simultaneous users; functional limitations of users during joint work; sequential nature of the simulator; non scalability of the systems designed.

Taking into account the importance of self-organized systems in the theory of "serious games," an example of a "serious game" built on the sandpile model can serve as a good platform for conducting research and learning of self-criticality.

On the other hand, considering usefulness of applying the sandpile and rotor-router models in cluster and cloud computing, such as energy conservation and even distribution, constructing a full simulator is an actual issue.

The aim of the thesis is to research and analyze software packages for the study of dynamic processes in self-organized system.

The following objectives have been purposed and resolved to achieve this goal:

- Develop a multi-user software package for research of self-organized dynamic processes described by the sandpile model over 2-dimensional and 3-dimensional grids.
- Find out an optimal algorithm for detecting peak coverage for the d -shaped grid and to perform a parallel simulation of the sandpile model in the given topological space.
- Develop a pattern of a "serious game" based on the sandpile model and add the pattern to the library of the theory for "serious games".
- Introducing suitable neural networks for solving sandpile model related problems.

MAIN RESULTS OF THE WORK

- A multi-user software system has been developed aiming at the joint research of physical and informational characteristics of self-organized dynamic processes described by the sandpile model. [3]
- A new method of parallelizing the sandpile model in the d -dimensional grid was proposed based on the formula describing the superficial astrology in the given topological space. [1-2]
- An example of a "serious game," based on the sandpiel model has been developed. [4]
- Neural networks have been investigated and developed for solving the "minimal sand and maximal distance" problem. A comparative analysis of the results obtained by neural network and simulating model has been performed and presented. [6]
- A cluster system simulator has been designed based on algorithms developed for sandpile and rotor-router models. [5]