

Egyetemi doktori (Ph.D.) értekezés tézisei
Abstract of Ph.D. Thesis

Sejtautomaták szociodinamikai alkalmazásai

Applications of cellular automata in sociodynamics

Kocsis Gergely

Témavezetők / Supervisors
Dr. Sztrik János, Dr. Kun Ferenc



Debreceni Egyetem
Informatikai Tudományok Doktori Iskola

University of Debrecen
PhD School of Informatics

Debrecen
2012

Készült

a Debreceni Egyetem Informatikai Tudományok Doktori Iskolájának
Informatikai rendszerek és hálózatok programja keretében

Prepared at

the University of Debrecen,
PhD School of Informatics

Bevezetés

A nagyszámú kölcsönható egyedből álló rendszerek viselkedésének megértésére számos tudományterületen végeznek intenzív kutatásokat. A természetben megjelenő bonyolult biológiai rendszerek, az állati populációk és emberi társadalmak, a gazdasági folyamatok rendszere, vagy az egyszerű részecskékből felépülő fizikai és kémiai rendszerek nagyon érdekes tulajdonsága, hogy az elemeik és kölcsönhatásaik nyilvánvaló eltérése ellenére makroszkopikus skálán a viselkedésük erős hasonlóságot mutat. Ez a megfigyelés arra hívja fel a figyelmet, hogy a kölcsönhatás dominanciája miatt az ilyen rendszerek makroszkopikus jellemzőit az elemeik kollektív viselkedése határozza meg, ami nem érzékeny a rendszer mikroszkopikus részleteire. Mai tudásunk szerint ezen rendszerek vizsgálatához a statisztikus fizika és komplex rendszerek fizikája, valamint az informatika számítógépes szimulációs módszerei szolgáltatják a megfelelő keretet.

Doktori munkám során a társadalmi-gazdasági rendszerekben végbemenő terjedési folyamatok modellezésével és elemzésével foglalkoztam. A problémakör vizsgálata az 1970-1980-as évekig elsősorban a szociológia és a közgazdaságtan témakörébe tartozott. Ekkortól azonban a statisztikus fizika eszközrendszerének fejlődése jelentős hatást gyakorolt a további kutatásokra: A statisztikus fizika eszközeivel végzett szociológiai kutatásokat mára gyakran külön tudományágként is emlegetik szociofizika néven¹. Ezen kutatások egy jelentős hányadának áll központjában a szociális hálózatokon történő terjedési folyamatok vizsgálata, azaz a szociodinamika.

Az 1990-es évektől az informatika rohamos fejlődése, a számítási és tárolási kapacitás drasztikus növekedése lehetővé tette, a komplex rendszerek analitikus vizsgálata mellett, realisztikus modellek kidolgozását és számítógépes szimulációkkal történő elemzését is. Különösen jelentős hatást gyakoroltak a kutatások aktuális irányára a szociális hálózati topológiákkal kapcsolatos új ismeretek². Mára egy szociális hálózaton végbemenő társadalmi-gazdasági folyamat modellezésekor lehetőségünk adódik az analitikus eredményektől indulva akár valósághoz egészen közeli szimulációk végrehaj-

¹Galam, S., Gefen, Y., Shapir, Y., *Sociophysics: a mean behavior model for the process of strike*, Mathematical Journal of Sociology, **9**, 1-13, (1982).

²Barabási, A.-L., Albert, R., *Emergence of scaling in random networks*, Science **286**, 509 (1999).

tására is. Ennek köszönhetően közel teljes képet kaphatunk olyan jelenségek működéséről, mint a kutatási témám alapját is jelentő szociodinamikai folyamatok.

Célkitűzések

Doktori dolgozatomban társadalmi- gazdasági rendszereken vizsgálom a technológiai fejlődés feltételeit és folyamatát. Rogers úttörő munkája¹ alapján társadalmi-gazdasági rendszerek technológiai fejlődését két fő lépésre bonthatjuk: A rendszer elemei (egyének, társaságok, vállalatok, ...) *innováció* révén új, a korábbiaknál fejlettebb technológiákat hozhatnak létre. Ugyanakkor előfordulhat, hogy egy fejlettebb technológiát akár nyilvánvaló előnyei ellenére sem fognak tömegek használni, így az nem járul hozzá a rendszer egészének fejlődéséhez. A technológiai fejlődés másik nagyon fontos lépése az új technológiák *terjedése*, ami a tömeges használat előfeltétele.

Kutatómunkám során két, a technológiai fejlődés mikéntjének megértéséhez igen fontos szociodinamikai folyamatot vizsgáltam részletesebben. A társadalmi- gazdasági rendszerekben megjelenő új innovációk elterjedésének egyik legfontosabb eleme az innováció megjelenése utáni információáramlás. A rendszer szereplői ekkor szereznek tudomást az új technológia létezéséről, illetve használatának lehetőségéről a korábbi, alacsonyabb szintű technológiákkal szemben. Piaci példát véve ez a folyamat megfelel a termék, vagy technológia gyártója és szolgáltatója által a médiában folytatott reklámtevékenységnek. Eközben a rendszer szereplői egymásközt is tapasztalatot cserélnek, híret keltik az adott terméknek. Ezeknek megfelelően az információ áramlásakor kétféle információs csatornát értelmeztem. A reklámtevékenységnek megfeleltethető, minden szereplőre együttesen ható vertikális csatornát, illetve a rendszer szereplői közötti lokális kommunikációt leíró, szereplőről-szereplőre ható horizontális információs csatornát. Dolgozatom első felében e két csatorna versengésének hatását vizsgálom mind analitikus, mind numerikus eszközökkel.

Kutatómunkám másik nagy témakörében egy lépéssel későbbi piaci folyamatot vizsgálok. Feltételezem, hogy a rendszer minden résztvevője már használ valamilyen terméket egy igény kielégítésére, de ezek technológiai

¹Rogers, E. M., *Diffusion of Innovations, 5th Edition* (New York, Free Press, ISBN 0-7432-2209-1).

szintje akár jelentősen is eltérhet egymástól. A nagyszámú lehetőség közül az úgynevezett hálózati technológiákra koncentrálok, amelyek használati értékét egy felhasználó számára elsősorban az határozza meg, hogy a technológiát már hány más felhasználó is birtokolja. Ilyenek például a telekommunikációs technológiák, de akár számítógépes szoftvereket is említhetünk, ahol használat közben előny a kompatibilitás más felhasználókkal. A vizsgálatok során a fejlettebb technológiákat jelentő termékek elterjedésének feltételeit és a terjedés módját tanulmányozom. Az előző esettel ellentétben ezúttal nincs külső befolyásoló tényező, a rendszer résztvevőinek viselkedését kizárólag a többi résztvevő technológiájával való kompatibilitásra való törekvés mozgatja. A minél teljesebb körű leírás érdekében vizsgálataim során ismét mind analitikus, mind numerikus eszközöket használtam.

Munkám során a statisztikus fizika eszközeivel az információ terjedésével és az úgynevezett hálózati technológiák versengésével kapcsolatos bonyolult társadalmi rendszerek működésére alkotok matematikai modelleket, melyek segítségével a terjedéssel kapcsolatos hatékonysági vizsgálatok végezhetők el. Eközben analitikus, numerikus, valamint szimulációs módszereket alkalmazok a szokásos rendszerjellemzők meghatározására.

Kutatómunkám célja olyan sejtautomatákra épülő egyed-alapú modellek kidolgozása volt, amelyek lehetővé teszik az információs csatornák versengésének és technológiák terjedésének realisztikus vizsgálatát gazdasági-társadalmi rendszerekben. A dolgozatban célul tűztam ki, hogy a vizsgált példákon keresztül bemutassam a sejtautomaták szociodinamikai alkalmazásainak lehetőségeit.

Konkrét kutatási célként a következő kérdésekre kerestem választ:

- Milyen hatással van egy új termékkel/technológiával kapcsolatos információ elterjedésére a médiából, illetve a személyes kapcsolatokon keresztül szerzett tudás, azaz hogyan befolyásolja az információterjedést a vertikális és horizontális információs csatornák versengése?
- Hogyan befolyásolja a rendszer résztvevőinek szociális kapcsolatrendszere az információáramlást?
- Az információáramlás után hogyan terjed el és egyáltalán el tud-e terjedni egy fejlettebb, minőségi technológia a környezetében jelen lévő nagy mennyiségű alacsonyabb színvonalú technológia mellett? Milyen

feltételek mellett győzhet a minőség a mennyiség felett?

- Milyen hatással van a szociális hálózat topológiája a hálózati technológiák terjedési folyamatára?
- Hogyan befolyásolja a fejlettebb technológiák terjedését a rendszerben több szolgáltató jelenléte és a ebből következő nyilvánvaló szolgáltató szerinti kompatibilitásra való törekvés az egyedek részéről?

Vizsgálati módszerek

Kutatómunkám elméleti jellegű, egyed alapú modelleket dolgoztam ki a technológiai fejlődés egyes aspektusainak vizsgálatára szociodinamikai rendszerekben. Egyszerűsítő feltételek alkalmazásával elvégeztem a modellek analitikus vizsgálatát, majd sejtautomatákra épülő hatékony szimulációs módszereket dolgoztam ki a teljes realisztikus modellek numerikus megoldásához. Informatikusként célom volt a sejtautomata modellezési eszközrendszer alkalmazási lehetőségeinek feltárása konkrét példákon keresztül szociodinamikai rendszerekre.

Új tudományos eredmények

1. Modellt dolgoztam ki a társadalmi-gazdasági rendszerekben lezajló információterjedés vizsgálatára. A modellben egyedek szociális hálózatát tekintve arra kerestem a választ, hogyan befolyásolja a terjedési folyamatot a vertikális és horizontális információs csatornák versengése, valamint a szociális hálózat topológiai jellemzői. Mind makro-, mind mikroskálán analitikus számolásokkal és sejtautomata szimulációkkal elemeztem a rendszer időfejlődését és strukturális tulajdonságait.
 - a) A terjedési folyamat időfejlődését makroszkopikus skálán a már informált egyedek részarányával és annak idő szerinti deriváltjával jellemeztem. A rendszer egyedszintű, mikroszkopikus dinamikájából kiindulva egy integrálegenletet adtam meg, amelynek megoldása szolgáltatja a makroszkopikus mennyiségek időfüggését. A mozgásegyenlet numerikus megoldásával azt találtam, hogy az

információ terjedését a diffúziós folyamatoknál megfigyelt logisztikus görbe írja le¹. Hatékony sejtautomata szimulációs programot fejlesztettem, amellyel részletesen elemeztem a rendszer egyedszintű dinamikáját is. A direkt szimulációval kapott eredmények kiváló egyezést mutatnak az integrálegyenlet megoldásával, amennyiben a rendszer fejlődését a külső információforrással szemben az egymás közötti információcsere dominálja.

- b) A számítógépes szimulációk alapján a vertikális és horizontális információs csatornák versengése a következő terjedési dinamikát eredményezi: a külső információforrás hatására véletlenszerűen informált egyedek jelennek meg a rendszerben. A véletlen nukleációt követően az egyedek egymás közti kommunikációjának hatására informált egyedek növekvő klaszterei jönnek létre. A folyamatos nukleáció és növekedés miatt a rendszerben változatos méretű informált klaszterek vannak jelen, amelyek egy kritikus időpillanatban egy makroszkopikus, óriásklaszterré olvadnak össze. A rendszer mikrostruktúráját a klaszterek geometriai jellemzőivel illetve méreteloszlásukkal jellemeztem. Megállapítottam, hogy míg az informált egyedek kis klaszterei kompaktak, egy méret fölött fraktállá válnak. A klaszterek méreteloszlása a perkolációhoz hasonlóan hatványfüggvénynek bizonyult exponenciális levágással, de a kritikus exponens értéke szignifikánsan eltér a perkolációnál tapasztalttól. Az egyedek közötti hosszútávú kapcsolatok megjelenésével a méreteloszlás átmenetet mutat két különböző exponensű hatványfüggvény között. Numerikus és analitikus számolásaim alapján a két információs csatorna erősségét jellemző paramétersíkon megadtam a rendszer fázisdiagramját.
- c) Rámutattam, hogy a rendszer klaszterstruktúrája jelentős hatással van az információ terjedésére: Ha az egyedek közötti kommunikáció a domináns, a klaszterek összeolvadása miatt erősen csökken a klaszterek szabad felülete, ahol az információáramlás történik. Ennek következményeként reguláris rácson az óriásklaszter megjelenésének pillanatában a terjedési folyamat drasztikusan le-

¹Mahajan, V., Peterson, R. A., *Models for Innovation Diffusion*, Sage Publications, London, (1985).

lassul. Ezt a lassulást az információ szolgáltatója csak úgy tudja ellensúlyozni, ha növeli a reklámtevékenység intenzitását, azaz erősíti a külső információs csatornát. Ugyanakkor a realisztikus komplex szociális hálókat vizsgálva a fenti jelenség sokkal kisebb mértékben jelentkezik, mert a hosszútávú kapcsolatok miatt a nagy klaszter felülete is nagy maradhat. Számítógépes szimulációkkal kimutattam, hogy az óriásklaszter megjelenésének t_c időpillanata a hálózat hosszútávú kapcsolatait kontrolláló újrakötési valószínűségnek logaritmikus függvényeként csökken.

2. Egyed alapú modellt dolgoztam ki úgynevezett hálózati technológiák társadalmi-gazdasági rendszerekben történő elterjedésének vizsgálatára. Ezek olyan technológiák, amelyek használati értékét elsősorban az határozza meg, hogy a technológiát már hányan használják. Ilyenek például a telekommunikációs technológiák, amelyek azzal a tulajdonsággal is rendelkeznek, hogy a piacon a felhasználók kommunikációs igényeinek kielégítésére egyszerre nagyon sok különböző technológiai színvonalú eszköz áll rendelkezésre. A terjedési folyamat mozgatórugója az egyedek azon törekvése, hogy kommunikációs költségeiket csökkentsék, ezért igyekeznek egymással kompatibilis technológiai szintű eszközöket használni.

- a) Átlagtér közelítésben végzett számításokkal megmutattam, hogy a rendszer fejlődésének szempontjából csak a technológiák közötti relatív fejlettségbeli különbség a meghatározó, azok pontos értéke nem. Ezután mester-egyenlet megközelítést alkalmazva sikerült leírnom a rendszer diszkrét időfejlődését feltételezve, hogy a terjedés során a térbeli korreláció elhanyagolható. Meghatároztam a rendszer fixpontjait és elemeztem stabilitási tulajdonságait. Ezek a számítások rámutattak, hogy az egyedek másolás-elutasítás dinamikája minden esetben homogén végállapotba vezet a rendszert, ahol egyetlen technológia válik dominánssá. Megállapítottam, hogy bizonyos kezdeti piaci részesedés esetén a technológiák közötti versengés nagyon kiélezett lehet, amit a rendszer relaxációs idejének divergenciája jellemez.

- b) Számítógépes szimulációk segítségével kimutattam, hogy az időfejlődés során az egyedek azonos technológiai szintű klasztereket formálnak. A klaszterek méreteloszlása az időfejlődés során exponenciális függvényalakból indulva hatványfüggvényhez konvergál, majd a közel homogén végállapotban az összes egyed egyetlen klasztert alkot. Kivételt képez az az eset, amikor a fejlettebb technológiák nem nyújtanak elegendő előnyt a fejletlenebbekkel szemben. Ilyenkor a rendszer befagy egy nem-triviális klaszterszerkezetbe, ahol a technológiai szintek valószínűségi eloszlása Gauss eloszlással jellemezhető. Amennyiben a fejlettebb technológia birtoklása kedvező az egyedek számára, nagyon érdekes eredményként azt találtam, hogy a technológiai szintek valószínűség eloszlása komplex időfejlődésen megy keresztül, amit úgynevezett extrém statisztikákkal¹ lehet leírni. A rendszer globális technológiai fejlettségét az egyedek által használt technológiák átlagos színvonalával jellemeztem. Az átlagos technológiai szint az idő múlásával egy konstanshoz konvergál, amelynek értékét a költségfaktor határozza meg.
3. A négyzetrácson és átlagtér közelítésben végzett számítások mellett, analitikus eszközökkel és számítógépes szimulációval elemeztem, hogyan befolyásolja a terjedési folyamatot az egyedek szociális hálózatának topológiája, valamint több szolgáltató jelenléte a piacon.
- a) A szociális kapcsolati háló szerkezeti jellemzőinek változtatásával sikerült rámutatnom, hogy az egyedek kapcsolódásai döntő fontosságúak a terjedés szempontjából. Kimutattam, hogy a szociális hálóban jelenlévő hosszútávú kapcsolatok a költségjellegű paramétereiktől függően csökkenthetik, de akár növelhetik is a rendszer által a homogén végállapotban elért átlagos technológiai szintet, más szóval segíthetik, de akár hátráltathatják is a terjedést. Ennek ismerete reklámstratégiák tervezésénél fontos szerepet játszhat.

¹Lamperti, S., *On Extreme Order Statistics*, The Annals of Mathematical Statistics, **35**, 4 (1964).

- b) A modell alkalmazásaként megvizsgáltam, milyen feltételek mellett képes egy innováció, azaz újonnan bevezetett, magasabb szintű technológia elterjedni egy alacsonyabb technológiai szintű, homogén környezetben. Megállapítottam, hogy az új technológia kezdeti piaci betörésének létezik egy kritikus értéke, amely alatt nem képes terjedni. A kritikus értéket átlépve az egyedek fokozatosan átveszik az új technológiát és a rendszer egy magasabb technológiai szintű homogén állapotba konvergál. Kimutattam, hogy a terjedéshez szükséges kezdeti kritikus jelenléti arány erősen függ a kapcsolati háló topológiájától. A kritikus pontban a terjedés karakterisztikus idejének maximuma van, amelynek értékét arányos a hálózat átmérőjével.
- c) A modellt továbbfejlesztettem több szolgáltató jelenlétének vizsgálatára azzal a feltevéssel, hogy a különböző szolgáltatóhoz tartozó egyedek kommunikációja az erősebb inkompatibilitás miatt extra költséggel jár. A kiterjesztett modell analitikus és szimulációs vizsgálatával megmutattam, hogy a több szolgáltató okozta versengés érzékenyebbé teszi a rendszert a magasabb technológiai szint által nyújtott előnyökre. Érdekes eredményként azt találtam, hogy a szolgáltatók segíthetik, de akár gátolhatják is a technológiai fejlődést. Amikor az egyes szolgáltatók által nyújtott termékek technológiai színvonala is elkülönül egymástól, analitikusan meghatároztam a szolgáltatóváltás feltételét. Az eredmények kiaknázzhatók a gyakorlatban olyan piaci körülmények között, mint például, amikor egy gyártó egy új csúcs-mobiltelefon forgalmazására kizárólagos szerződést köt egy szolgáltatóval.

Introduction

Understanding the behavior of systems containing many interacting agents is in the center of intensive research in numerous scientific fields. It is a very interesting common property of biological systems, animal populations, human societies, systems of economic processes and physical or chemical systems built from simple particles, that despite the obvious difference of their agents, and interactions, their behavior on the macroscopic level show a high degree of similarity. This observation points out, that because of the dominance of the interactions, the macroscopic properties of such systems are mostly driven by the collective behavior of their elements. These behaviors are not sensitive to the microscopic details of the system. The state of our current knowledge shows, that the most convenient tools to study these systems are provided by statistical physics, physics of complex systems, and the powerful numerical simulation methods of computer science.

During my work as a Ph.D. student I modeled and studied the spreading processes in socio-economic systems. This field was mainly mentioned as a part of sociology and economics until the 1970's-1980's. From that time on however the evolution of the tools of statistical physics highly affected the upcoming research: Today, the statistical physics aided sociological research is frequently referred as a new field of science, namely sociophysics¹. Sociodynamics – the study of spreading processes on social networks – is one of the main questions of sociophysics.

From the 1990's the rapid evolution of computer science and the growth of storage and computing power made it possible to analyze complex systems through realistic models and computer simulations, among the analytical studies. The new findings in social network topologies especially affected the direction of current research². Today when we model a socio-economic phenomenon on a social network among the simplified analytical calculations we have the possibility to study the system through realistic simulations as well. As a result we can get detailed information about such sociodynamical processes like the ones I study in my Ph.D. thesis.

¹Galam, S., Gefen, Y., Shapir, Y., *Sociophysics: a mean behavior model for the process of strike*, Mathematical Journal of Sociology, **9**, 1-13, (1982).

²Barabási, A.-L., Albert, R., *Emergence of scaling in random networks*, Science **286**, 509 (1999).

Objectives

In my Ph.D. thesis I study the process and the criteria of technological evolution in socio-economic systems. According to Rogers' pioneering study¹ technological evolution in socio-economic systems can be achieved in two steps: In the first step, the elements of the system (people, companies, societies, etc.) can create new technologies through *innovation*. However it may happen that this new, more advanced technology will not be used widely despite its obvious advantages, so its emergence does not imply a system-wide technological evolution. The second step of technological evolution is the *spreading* of technologies, that is the precondition of the widespread use of the new technology.

During my Ph.D. studies I examined in detail two phenomena of sociodynamics that play an important role in understanding the properties of technological evolution. One of the most important elements of the spreading of new innovations in socio-economic systems – beside the emergence of the innovation – is the information spreading process. The actors of the system are getting informed about the presence of the new innovation and from this point on they know that the new technology is available – in place of the earlier lower level technology. As an example from the market we may say, that this process is similar to the advertising efforts made by the producer and provider of the technology in the media. Meanwhile the actors of the system communicate with each other as well. They share their experiences about the product or technology. According to this I defined two channels of information in my model. A vertical channel, that affects all the agents in the system. one may take this as the advertising efforts. The second is a horizontal information channel, that exists between the agents, and symbolizes the inter-person communication of real societies. In the first part of my thesis I study the effect of the competition of these channels both with analytical and numerical tools.

In the second part of my thesis I study a process, that arises after the information spreading. I assume that all agents in the system are informed, and are already using a different realization of the new innovation. Thus the technological level of the used technologies may be significantly different.

¹Rogers, E. M., *Diffusion of Innovations, 5th Edition* (New York, Free Press, ISBN 0-7432-2209-1).

From the wide range of possible technologies, in my studies I focus on the so called networking technologies. The usability of these technologies for the user depends highly on the number of interacting partners, that use the same technology. Examples to such technologies are the telecommunication technologies, but computer software may be mentioned as well, since the compatibility with other users is one of the key properties of them. During my studies I examine the criteria and the way of spreading of more advanced technologies. Differently from the previous case, here there is no outer effect to the spreading. The behavior of the actors of the system is driven only by the aim to get more compatible to the technologies held by the others. In order to get a detailed picture of the process, again I used analytical and numerical methods as well.

In my research I propose mathematical models of information spreading, and the competition of so called networking technologies with the tools of statistical physics. With these models, the efficiency of spreading can be studied in future research. In the mean time I use analytical, and numerical methods to describe the usual properties of the modeled systems. The goal of my research was to create such cellular-automata based models, that make it possible to study the competition of information channels, and the spreading of new technologies in socio-economic systems. Through two specific examples, in my thesis my aim was to show the possible applications of cellular automata in sociodynamics.

More specifically my objectives during the research were to answer the following questions:

- How the knowledge got from the media, or from our contacts about a new product/technology affect the spreading of information about it? Or in other words, how does the competition of vertical and horizontal information channels affect the spreading of information?
- What is the effect of changes in the underlying social network topology on the spreading?
- After the spreading of the information what are the conditions for a new technology to spread over the social system even if it is neighbored by lower level technology? In which conditions the quality can overcome the quantity?

- How does the topology of the underlying social network affect the spreading process?
- What is the effect of the presence of multiple providers. How the properties of the spreading change as a result of the increased willing for compatibility because of them.

Analyzing methods

My work is mostly based on theoretical results. I created agent-based models of some specific aspects of the technological evolution in socio-dynamical systems. Assuming some simplifying conditions I studied the models with analytical tools. Then I worked out efficient cellular automata based simulation methods to solve these realistic models numerically. As a computer scientist my objective was to show the possible applications of cellular automata to socio-dynamical systems through some specific examples.

New scientific results

1. I worked out a model of information spreading in socio-economic systems. With the model observing a social network of agents I studied how the competition of vertical and horizontal information channels and the underlying network topology affect the the spreading process. I analyzed the time evolution of the system and its structural properties using analytical calculations and numerical simulations both on the micro-, and the macro-scale.
 - a) On the macroscopic scale I described the time evolution of the spreading process by the ratio of informed agents in the system, and by the spreading intensity. From the microscopic dynamics of the agents I introduced an integral equation. The solution of it shows the time dependence of the macroscopic properties. I found that the spreading of the information can be described by the logistic curve form, observed in other diffusion processes as well¹. I created an efficient cellular automata simulation prog-

¹Mahajan, V., Peterson, R. A., *Models for Innovation Diffusion*, Sage Publications, London, (1985).

ram, with which I analyzed the system's dynamics on the level of agents as well. The results of the direct simulation perfectly matched to the analytical predictions of the integral equation if the information spreading is dominated by the inner instead of the outer information channel.

- b) Based on the computer simulations it turned out, that the competition of the horizontal, and the vertical information channels imply the following dynamics of spreading: As a result of the outer information source, informed agents appear randomly in the system. After this nucleation process, as a result of the inter-agent communication growing clusters of informed agents appear. Because of the ongoing nucleation and the growing, there are clusters of different sizes in the system. At a critical time t_c these clusters merge into a macroscopic giant cluster. I described the microstructure of the system by the geometrical properties and the size distribution of the clusters. I found that while small clusters of informed agents are usually compact, above a specific size they turn to fractals. The size distribution of the clusters follows a power law behavior with exponential cutoff just like in the case of percolation. However it is important to note, that the critical exponent significantly differ from the traditional one. As long range connections appear between the agents, the size distribution shows a crossover between two power law functions with different exponents. Using the results of my analytical calculations, and numerical simulations I presented the phase diagram of the system on the parameter plain describing the strength of the two information channels.
- c) I showed that the cluster structure of the system has a remarkable effect on the information: If the communication between agents dominates, the free surface of the clusters – where the information spreads – rapidly decreases because of the merging of the clusters. As a result, on a regular lattice at the critical time t_c the spreading process dramatically slows down. This slowing can be compensated by increasing the intensity of marketing efforts, thus strengthening the outer information channel. However in

the case of more realistic complex social networks the above phenomenon does not appear that much. The reason is that because of the long range connections in the system the surface of the giant cluster can stay large. I showed by computer simulations that the critical point of time t_c , when the giant cluster appears is in logarithmic dependence with the rewiring probability, that controls the amount of long range connections in the system.

2. I proposed a model of the spreading of the so called networking technologies in socio-economic systems. The usability of these technologies highly depend on the amount of users already use them. As an example, telecommunication technologies may be mentioned. These have the property that their users use devices of many different technological levels to satisfy their needs of communication. The main driving force of the spreading process is the aim of the agents to minimize their costs of communication. To reach this they always try to use technologies that are compatible with the others'.

- a) As a result of mean field calculations I showed that the time evolution of the system does not depend on the exact values of the cost parameters describing the amount of the advantages provided by the more advanced technologies. Only the ration of them affects the spreading. I described the discrete time evolution of the system using a master equation approach with the condition that the spatial correlation during the spreading process can be omitted. I found the fix-points of the system, and analyzed the stability properties of them. These calculations pointed out, that the copying-declining dynamics of the agents always leads the system into a homogeneous state, where one technology becomes dominant. I found that with some specific starting conditions for the concentration of the different technologies, the competition of them can be very fierce. This is indicated by the divergence of the system's relaxation time.

- b) With computer simulations I showed, that during the time evolution, the agents form clusters of the same technological level. As time elapses, the size distribution of the clusters converge to a power law form from the previous exponential one. near to the homogeneous final state all agents join to one cluster. the only exceptional case is when the more advanced technologies do not provide advantages to the users compared to the less advanced ones. In this case the system freezes to a non-trivial cluster structure, where the probability distribution of the technological levels can be described by a Gaussian distribution. When using more advanced technologies provide advantages to the users, I found that the probability distribution of technological levels goes through a complex time evolution. It is very interesting to note, that this evolution can be followed by extreme order statistics¹. The global level of technological progression is described by the average technological level of technologies used by the agents. With time, this average converges to a constant value, that is controlled by the cost factor.
3. Among the analytical calculations and the simulations on square lattice, I analyzed the effect of the change of the social network's topology and the presence of more than one providers. I used again analytical and numerical tools as well.
- a) Analyzing the structural properties of the social network I showed, that the connections of the agents play a key role in the spreading. I found that the long range connections in the system can raise, but also can lower the average final technological level reached by the system in its final state. This behavior depends on the value of the cost factor. In other words, these connections can help, but also can hinder the spreading. This result may be useful when planning advertising strategies for new products.

¹Lamperti, S., *On Extreme Order Statistics*, The Annals of Mathematical Statistics, **35**, 4 (1964).

- b) As a possible application of the model I analyzed the conditions of spreading for a new innovation i.e. a newly introduced higher level technology, surrounded by homogeneous environment of lower level technologies. I found that a critical minimal concentration of the new technology exists below which the new technology can not spread. Above this critical concentration however, the agents adopt the new technology and the system converges to a state of a higher level of average technology. I showed that the critical concentration highly depends on the topology of the social network. At the critical point the characteristic time of the spreading has a maximum. The value of this is proportional to the diameter of the network.
- c) I modified the model in order to analyze the presence of more than one providers. In this case I assumed that the communication between agents of different providers require extra costs because of the increased incompatibility. From the analytical and numerical studies I found that the competition of more than one providers makes the system more sensitive to the advantages, a more advanced technology may provide. As an interesting result I found, that the providers may help, but also can hinder the technological evolution. I calculated the conditions of changing the provider of an agent in the case, when the technological level of agents are connected to providers. These results may be applicable in such cases when a producer would like to give exclusive selling rights of a new mobile-phone to a given provider.

Közlemények / Publications

Tudományos közlemények / Scientific papers

- P1 **Kocsis, G.**, Kun, F.,
Competition of information channels in the spreading of innovations,
 Physical Review E **84**, 026111 (2011).
 APS Journals, Impakt faktor: 2.352
- P2 **Kocsis, G.**, Kun, F.,
The effect of network topologies on the spreading of technological developments,
 Journal of Statistical Mechanics:
 Theory and Experiment, **P10014** (2008).
 IOPscience, Impakt faktor: 2.758
- P3 Kun, F., **Kocsis, G.**, and Farkas, J.,
Cellular automata for the spreading of technologies in socio-economic systems,
 Physica A **383**, 660 (2007).
 Elsevier, Impakt faktor: 1.332
- BC **Kocsis, G.**, Kun, F.
Cellular Automata Modelling of the Diffusion of Innovations
 Chapter 16. in
 A. Salcido (editor), Cellular Automata - Simplicity behind complexity,
 Intech Publishing, pp. 337 (2011).

Konferencia szereplések / Conference proceeding, talks and posters

- PR1 **Kocsis, G.**, Kun, F.,
Információterjedés társadalmi-gazdasági rendszerekben
 Informatika a felsőoktatásban 2011 konferencia
 ISBN: 978-963-473-461-1
 Debrecen (2011).
- PO1 **Kocsis, G.**, Kun, F.,
Spreading of innovations on complex networks of agents
 MECO 35 – 35th Conference of the Middle European Cooperation
 in Statistical Physics
 Pont à Mousson (2010).
- PO2 **Kocsis, G.**, Kun, F.,
Spreading of technological developments in a network of agents
 MECO 34 – 34th Conference of the Middle European Cooperation
 in Statistical Physics
 Lipcse (2009).
- PO3 **Kocsis, G.**, Kun, F.,
Spreading of innovations in socio-economic systems
 Sigma Phi 2008 – International Conference in Statistical Physics
 Kolympari (2008).
- PO4 **Kocsis, G.**, Kun, F.,
*Cellular automata for the spreading of technologies
 in socio-economic systems*
 Max Born Symposium 23 – "Critical Phenomena in Complex Systems"
 Polanica-Zdrój (2007).

- T1 **Kocsis, G.**, Kun, F.,
Information spreading in socio-economic systems
2nd Debrecen Workshop on Statistical Physics of Fracture
and other Complex Systems
Debrecen (09. 2010.).
- T2 **Kocsis, G.**, Kun, F.,
Spreading of technological developments in socio-economic systems
1st Debrecen Workshop on Statistical Physics of Fracture
and other Complex Systems
Debrecen (02. 2010.).
- T3 **Kocsis, G.**, Kun, F.,
Új technológiák elterjedésének modellezése
Statisztikus Fizikai Nap
Budapest (2007).