

Modelování komplexních sítí

Radek Pelánek

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Souvislosti

- další typ aplikace modelování a simulace
- nemodelujeme konkrétní systém, ale **obecný jev**, vlastnost společnou mnoha systémům (srovnej fyzikální zákony)
- ilustrace obecných principů komplexních systémů (např. mocninný zákon)

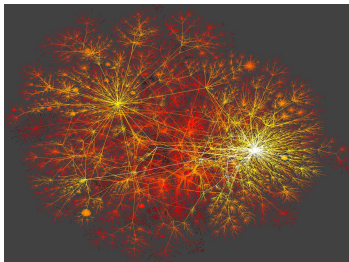
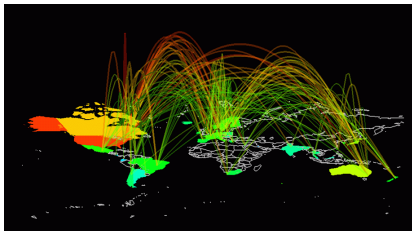
Komplexní síť

- **komplexní síť** (např. sociální sítě, regulační sítě exprese genů, Internet) = rozsáhlý graf
- **společné vlastnosti** – např. vzdálenosti, stupně vrcholů
- **abstraktní modely** (vesměs výpočetní)

Historické poznámky

- do 90. let: modelem náhodné grafy
- druhá polovina 90. let: dostatek sítí v elektronické podobě, možnost jejich počítačové analýzy
- konec 90. let: první modely komplexních sítí
- knihy:
 - Linked (V pavučině sítí), A-L Barabási, 2002
 - Small Worlds, Six degrees, D Watts, 2003

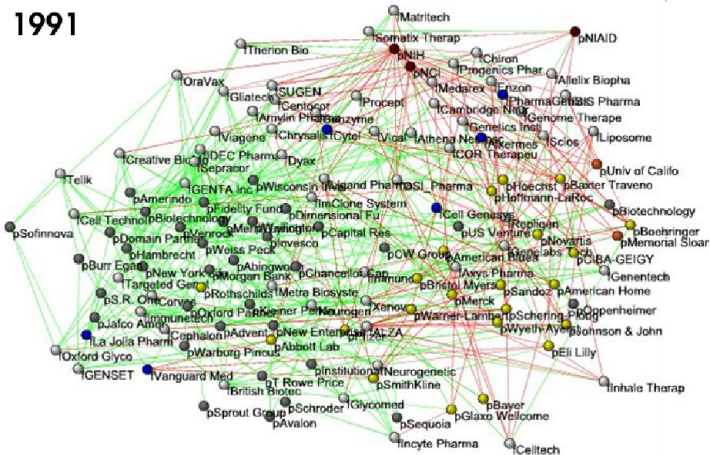
uzly: servery, hrany: dráty

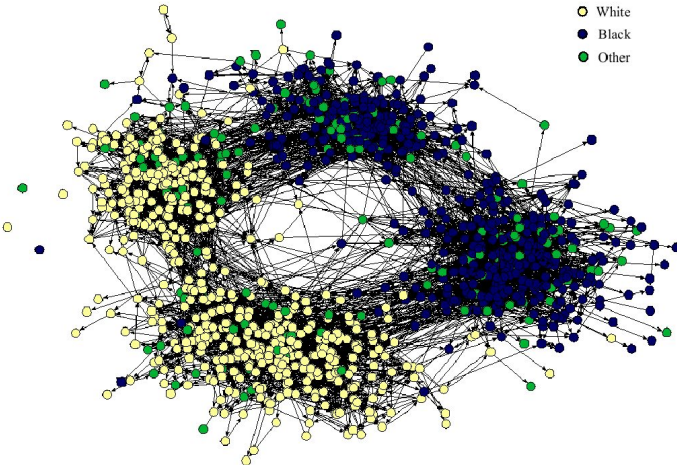


Firmy

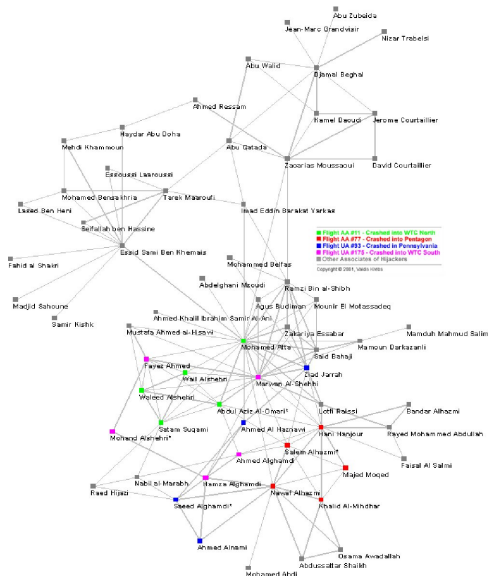
uzly: firmy, hrany: obchodují spolu, sdílejí šéfy, ...

1991

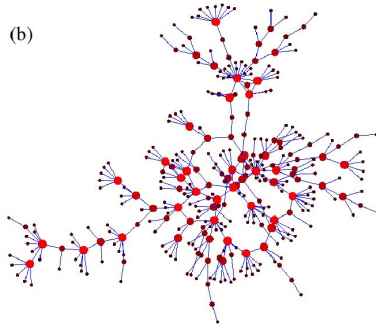




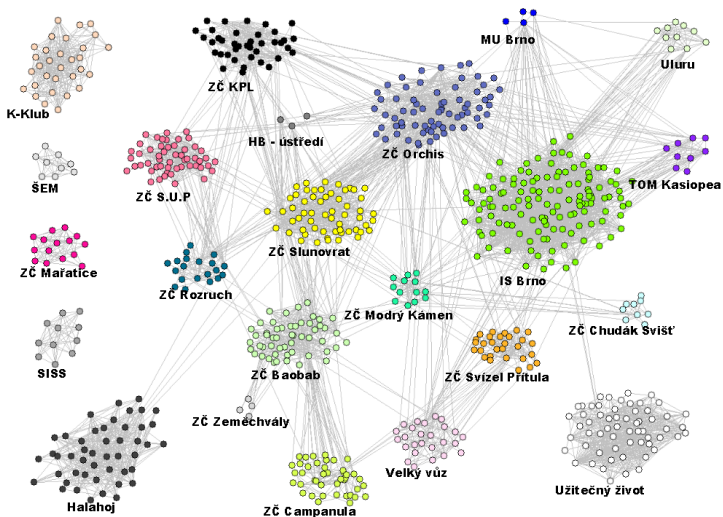
Příklady



(b)



Spolupráce organizátorů volnočasových akcí



Buněčná biologie

uzly: proteiny, (příp. další látky), hrany: reagují spolu

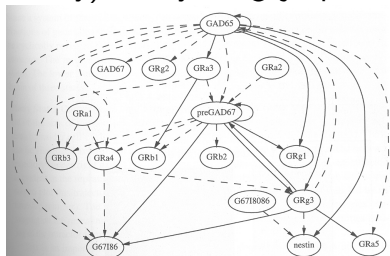
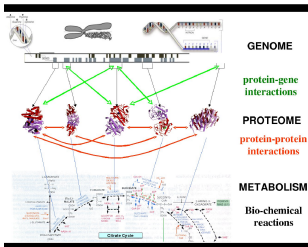
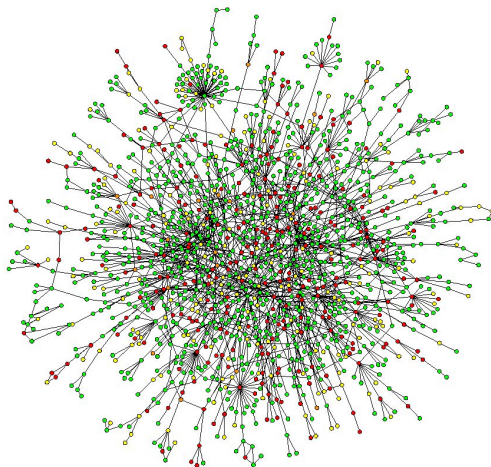


Figure 5.3
Gene interaction diagram for the GABA signaling family inferred from developmental gene expression data (spinal cord and hippocampus data). Solid lines correspond to positive interactions, broken lines suggest inhibitory relationships (D'haeseleer et al., 1999).



Potravní řetězce

uzly: zvířata, hrany: pokud jedno žere druhé

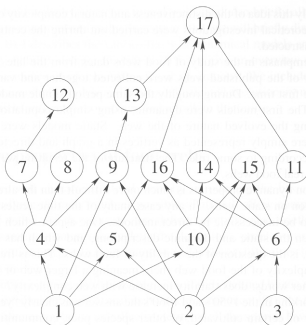
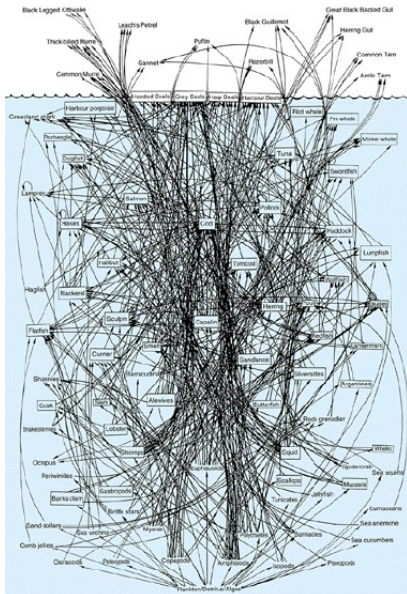
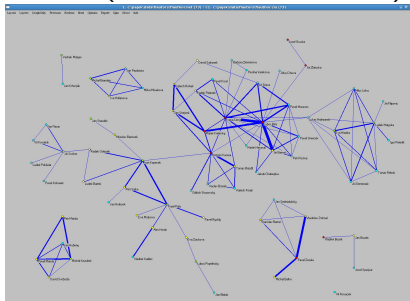


Figure 10.1: Narragansett Bay food web. 1=flagellates, diatoms; 2=particulate detritus; 3=macroalgae, eelgrass; 4=*Acartia*, other copepods; 5=sponges, clams; 6=benthic macrofauna; 7=ctenophores; 8=meroplankton, fish larvae; 9=pacific menhaden; 10=bivalves; 11=crabs, lobsters; 12=butterfish; 13=striped bass, bluefish, mackerel; 14=demersal species; 15=starfish; 16=floUNDER; 17=man. (After Yodanis 1989. *Introduction to theoretical ecology*. Harper and Row. New York.)



A complex network graph visualization. It features a large number of small, yellow circular nodes scattered across the frame. These nodes are interconnected by a dense web of red lines, representing edges. The edges are of varying thickness, with some appearing as thick red bundles, suggesting high-frequency or strong connections between certain groups of nodes. The overall shape of the network is roughly circular but with many protrusions and internal clusters. The background is a solid blue color.



Další příklady komplexních sítí

| oblast | uzly | hrany |
|-------------------------|----------------|----------------------|
| Web | stránky | odkazy |
| internet | servery | dráty |
| vědecká spolupráce | vědci | spoluautorství |
| síť herců | herci | hráli v jednom filmu |
| citační síť | vědecké články | citace |
| potravní řetězce | druhy zvířat | vztah lovec-kořist |
| síť sexuálních kontaktů | lidé | sex |
| metabolismus | chemické látky | reakce |
| lingvistika | slova | konotace, synonyma |
| telefonní hovory | telefony | volání |
| elektrické síť | transformátory | dráty |
| neuronové síť | neurony | synaptické spojení |

Grafy

- graf $G = (V, E)$
- V je množina uzlů (vrcholů)
- E je množina hran
 - orientované hrany: $E \subseteq V \times V$
 - neorientované hrany: $E \subseteq \binom{V}{2}$

- cesty, **vzdálenosti**
- **stupeň** vrcholu d_v = počet hran z vrcholu v vycházejících
(u orientovaných grafů rozlišujeme výstupní stupeň a vstupní stupeň)
- **distribuce stupňů** $P(k)$ – pravděpodobnost, že náhodně vybraný uzel má stupeň k

- **malé vzdálenosti** (vlastnost malého světa, small world phenomenon)
- **shlukování** (clustering)
- **bezškálovitost** (scale-free)
- „motivy“

Malý svět

- průměrné **nejkratší vzdálenosti** mezi uzly v komplexních sítích jsou malé
- „malý svět“ – potkáte cizího člověka a po chvíli zjistíte, že máte společné známé

0 1

- Stanley Milgram, 1967
- 60 balíčků, z Kansasu do Massachusetts
- balíčky povoleno posílat jen známým osobám (známost na úrovni křestního jména ~ tykání)
- identifikace adresáta: jméno, zaměstnání, přibližné místo bydliště
- cíl: co nejrychleji k adresátovi

-
- Stockard
CHANNING
- WILL
SMITH
- Donald
SUTHERLAND
- and Faye
DUNAWAY
- SIX**
degrees
of separation
- A chance encounter could
change their lives forever.

Shlukování

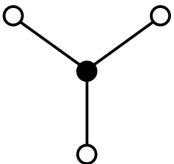
- lidé mají tendenci tvořit shluky
- znám Pepu a Frantu \Rightarrow je pravděpodobné, že Pepa zná Frantu
- nejen sociální sítě

Shlukování formálněji

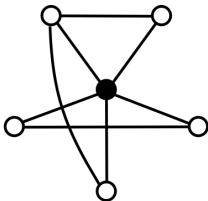
- uzel v má k_v sousedů
- e_v = počet vzájemně propojených sousedů
- **koeficient shlukování:**

$$C_v = \frac{e_v}{\binom{k_v}{2}} = \frac{2e_v}{k_v(k_v - 1)}$$

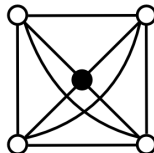
Koeficient shlukování: příklad

koeficient
shlukování
uzlu ●

$$0/3 = 0$$



$$3/10 = 0,3$$



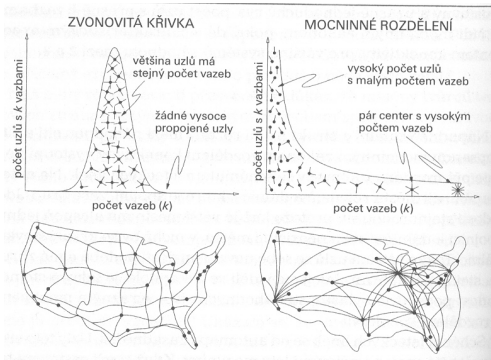
$$6/6 = 1$$

Distribuce stupňů

existuje typická hodnota, kolem které se stupeň uzlů pohybuje („škála grafu“)?

- náhodné grafy \Rightarrow ano
- komplexní sítě \Rightarrow ne

Poisson a Mocninný zákon: příklad



A.-L. Barabási: V pavučině sítí

Distribuce stupňů formálněji

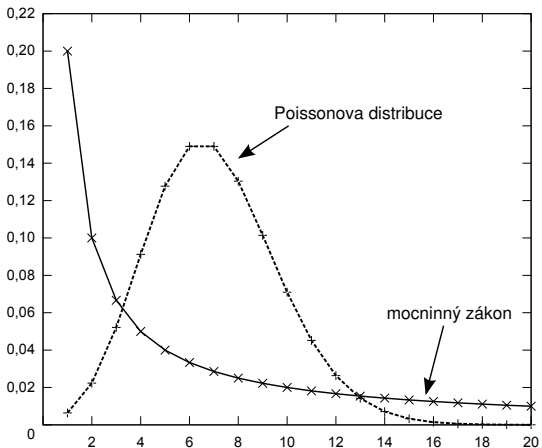
- Poissonova distribuce (pro velké $\lambda \sim$ normální distribuce)

$$P(n) = \lambda^n e^{-\lambda} / n!$$

- Mocninný zákon

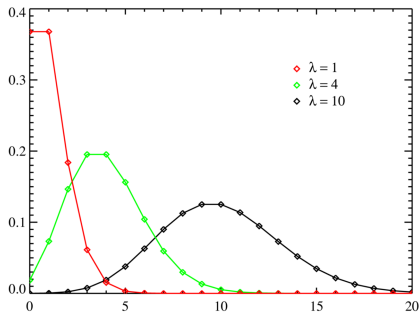
$$P(n) \sim n^{-\gamma}$$

Poissonova distribuce, mocninný zákon

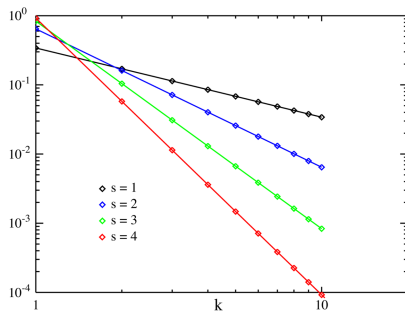


Poissonova distribuce, mocninný zákon

Poissonova distribuce



mocninný zákon



Wikipedia

Příklady mocninného zákona

- rozdělení bohatství
- velikost meteoritů, záplav, požárů, zemětřesení, ...
- frekvence použití písmen, slov v jazyce; noty v hudebních skladbách
- jména v populaci
- velikost měst
- management: zákon 80-20 (produkce – zaměstnanci, rozhodnutí – čas porady)

to zavání přítomností pozitivních zpětných vazeb ... dokážete je pojmenovat?

Příklad: Hamlet

The, 1101; And, 898; To, 726; Of, 657; I, 561; You, 544; My, 508; A, 498; In, 414; It, 414; That, 389; Is, 334; Not, 315; This, 296; His, 292; But, 265; With, 257; For, 247; Your, 242; Me, 235; As, 228; Be, 226; Lord, 218; He, 216; What, 203; So, 197; Him, 189; Have, 179; Will, 169; Do, 150; No, 143; We, 140; Are, 131; On, 125; O, 121; Our, 119; By, 116; Shall, 114; If, 113; Or, 112; All, 110; Good, 109; Come, 104; Thou, 103; Now, 97; From, 95; More, 95; They, 95; Let, 94; How, 88; Thy, 87; Her, 86; At, 84; Was, 83; Most, 82; Like, 80; Would, 80; Hamlet, 78; Well, 78; There, 76; Know, 74; Sir, 74; Them, 74; May, 71; Tis, 71; Go, 70; Us, 69; King, 67; Love, 66; Did, 65; Very, 64; Speak, 63; Which, 63; Hath, 62; Then, 62; Why, 62; Must, 61; Thee, 59; Give, 58; Should, 58; An, 57;

Mocninný zákon v komplexních sítích

















komplexní síť: pár hodně propojených uzlů, většina uzlů má malé propojení

- webové stránky
- citační síť
- sociální síť

bezškálovitost (scale-free) – neexistuje typická hodnota (škála)

Motivy

- podgrafy vyskytující se daleko častěji než v náhodném grafu
- různé motivy pro různé typy sítí
- většina komplexních sítí má nějaké motivy
- další specifikum: korelace mezi stupni sousedních vrcholů

| Network | Nodes | Edges | N_{real} | $N_{\text{rand}} \pm \text{SD}$ | Z score | N_{real} | $N_{\text{rand}} \pm \text{SD}$ | Z score | N_{real} | $N_{\text{rand}} \pm \text{SD}$ | Z score |
|---|---------|--------|---|---------------------------------|---------------------------------------|---|---------------------------------|------------------------------|---|---------------------------------|--------------------------------|
| Gene regulation (transcription) | | | | | | | | | | | |
| | | |  | | Feed-forward loop |  | | Bi-fan | | | |
| <i>E. coli</i> | 424 | 519 | 40 | 7 ± 3 | 10 | 203 | 47 ± 12 | 13 | | | |
| <i>S. cerevisiae</i> * | 685 | 1,052 | 70 | 11 ± 4 | 14 | 1812 | 300 ± 40 | 41 | | | |
| Neurons | | | | | | | | | | | |
| | | |  | | Feed-forward loop |  | | Bi-fan |  | | Bi-parallel |
| <i>C. elegans</i> † | 252 | 509 | 125 | 90 ± 10 | 3.7 | 127 | 55 ± 13 | 5.3 | 227 | 35 ± 10 | 20 |
| Food webs | | | | | | | | | | | |
| | | |  | | Three chain |  | | Bi-parallel | | | |
| Little Rock | 92 | 984 | 3219 | 3120 ± 50 | 2.1 | 7295 | 2220 ± 210 | 25 | | | |
| Ythan | 83 | 391 | 1182 | 1020 ± 20 | 7.2 | 1357 | 230 ± 50 | 23 | | | |
| St. Martin | 42 | 205 | 469 | 450 ± 10 | NS | 382 | 130 ± 20 | 12 | | | |
| Chesapeake | 31 | 67 | 80 | 82 ± 4 | NS | 26 | 5 ± 2 | 8 | | | |
| Couchella | 29 | 243 | 279 | 235 ± 12 | 3.6 | 181 | 80 ± 20 | 5 | | | |
| Skipwith | 25 | 189 | 184 | 150 ± 7 | 5.5 | 397 | 80 ± 25 | 13 | | | |
| B. Brook | 25 | 104 | 181 | 130 ± 7 | 7.4 | 267 | 30 ± 7 | 32 | | | |
| Electronic circuits (forward logic chips) | | | | | | | | | | | |
| | | |  | | Feed-forward loop |  | | Bi-fan |  | | Bi-parallel |
| s15850 | 10,383 | 14,240 | 424 | 2 ± 2 | 285 | 1040 | 1 ± 1 | 1200 | 480 | 2 ± 1 | 335 |
| s38584 | 20,717 | 34,204 | 413 | 10 ± 3 | 120 | 1739 | 6 ± 2 | 800 | 711 | 9 ± 2 | 320 |
| s38417 | 23,843 | 33,661 | 612 | 3 ± 2 | 400 | 2404 | 1 ± 1 | 2550 | 531 | 2 ± 2 | 340 |
| s9234 | 5,844 | 8,197 | 211 | 2 ± 1 | 140 | 754 | 1 ± 1 | 1050 | 209 | 1 ± 1 | 200 |
| s13207 | 8,651 | 11,831 | 403 | 2 ± 1 | 225 | 4445 | 1 ± 1 | 4950 | 264 | 2 ± 1 | 200 |
| Electronic circuits (digital fractional multipliers) | | | | | | | | | | | |
| | | |  | | Three-node feedback loop |  | | Bi-fan |  | | Four-node feedback loop |
| s208 | 122 | 189 | 10 | 1 ± 1 | 9 | 4 | 1 ± 1 | 3.8 | 5 | 1 ± 1 | 5 |
| s420 | 252 | 399 | 20 | 1 ± 1 | 18 | 10 | 1 ± 1 | 10 | 11 | 1 ± 1 | 11 |
| s838‡ | 512 | 819 | 40 | 1 ± 1 | 38 | 22 | 1 ± 1 | 20 | 23 | 1 ± 1 | 25 |
| World Wide Web | | | | | | | | | | | |
| | | |  | | Feedback with two mutual dyads |  | | Fully connected triad |  | | Uplinked mutual dyad |
| nd.edu§ | 325,729 | 1.46e6 | 1.1e5 | 2e3 ± 1e2 | 800 | 6.8e6 | 5e4 ± 4e2 | 15,000 | 1.2e6 | 1e4 ± 2e2 | 5000 |

Váhy hran

hrany různě důležité

váhy hran:

- internet: množství přenesených dat mezi počítači
- sociální sítě: četnost sociálních kontaktů
- proteiny: frekvence reakcí

váhy hran mají také distribuci podle mocninného zákona

Význam slabých hran

- silné hrany tvoří shluky
- slabé hrany propojují tyto shluky
- význam např. při shánění práce

Vlastnosti sítí – výzkum

| | network | type | n | m | z | ℓ | α | $C^{(1)}$ | $C^{(2)}$ | r | Ref(s). |
|---------------|-----------------------|------------|-------------|---------------|--------|--------|----------|-----------|-----------|--------|----------|
| social | film actors | undirected | 449 913 | 25 516 482 | 113.43 | 3.48 | 2.3 | 0.20 | 0.78 | 0.208 | 20, 416 |
| | company directors | undirected | 7 673 | 55 392 | 14.44 | 4.60 | – | 0.59 | 0.88 | 0.276 | 105, 323 |
| | math coauthorship | undirected | 253 339 | 496 489 | 3.92 | 7.57 | – | 0.15 | 0.34 | 0.120 | 107, 182 |
| | physics coauthorship | undirected | 52 909 | 245 300 | 9.27 | 6.19 | – | 0.45 | 0.56 | 0.363 | 311, 313 |
| | biology coauthorship | undirected | 1 520 251 | 11 803 064 | 15.53 | 4.92 | – | 0.088 | 0.60 | 0.127 | 311, 313 |
| | telephone call graph | undirected | 47 000 000 | 80 000 000 | 3.16 | | 2.1 | | | | 8, 9 |
| | email messages | directed | 59 912 | 86 300 | 1.44 | 4.95 | 1.5/2.0 | | 0.16 | | 136 |
| | email address books | directed | 16 881 | 57 029 | 3.38 | 5.22 | – | 0.17 | 0.13 | 0.092 | 321 |
| | student relationships | undirected | 573 | 477 | 1.66 | 16.01 | – | 0.005 | 0.001 | –0.029 | 45 |
| | sexual contacts | undirected | 2 810 | | | | 3.2 | | | | 265, 266 |
| information | WWW nd.edu | directed | 269 504 | 1 497 135 | 5.55 | 11.27 | 2.1/2.4 | 0.11 | 0.29 | –0.067 | 14, 34 |
| | WWW Altavista | directed | 203 549 046 | 2 130 000 000 | 10.46 | 16.18 | 2.1/2.7 | | | | 74 |
| | citation network | directed | 783 339 | 6 716 198 | 8.57 | | 3.0/– | | | | 351 |
| | Roget's Thesaurus | directed | 1 022 | 5 103 | 4.99 | 4.87 | – | 0.13 | 0.15 | 0.157 | 244 |
| | word co-occurrence | undirected | 460 902 | 17 000 000 | 70.13 | | 2.7 | | 0.44 | | 119, 157 |
| technological | Internet | undirected | 10 697 | 31 992 | 5.98 | 3.31 | 2.5 | 0.035 | 0.39 | –0.189 | 86, 148 |
| | power grid | undirected | 4 941 | 6 594 | 2.67 | 18.99 | – | 0.10 | 0.080 | –0.003 | 416 |
| | train routes | undirected | 587 | 19 603 | 66.79 | 2.16 | – | | 0.69 | –0.033 | 366 |
| | software packages | directed | 1 439 | 1 723 | 1.20 | 2.42 | 1.6/1.4 | 0.070 | 0.082 | –0.016 | 318 |
| | software classes | directed | 1 377 | 2 213 | 1.61 | 1.51 | – | 0.033 | 0.012 | –0.119 | 395 |
| | electronic circuits | undirected | 24 097 | 53 248 | 4.34 | 11.05 | 3.0 | 0.010 | 0.030 | –0.154 | 155 |
| | peer-to-peer network | undirected | 880 | 1 296 | 1.47 | 4.28 | 2.1 | 0.012 | 0.011 | –0.366 | 6, 354 |
| biological | metabolic network | undirected | 765 | 3 686 | 9.64 | 2.56 | 2.2 | 0.090 | 0.67 | –0.240 | 214 |
| | protein interactions | undirected | 2 115 | 2 240 | 2.12 | 6.80 | 2.4 | 0.072 | 0.071 | –0.156 | 212 |
| | marine food web | directed | 135 | 598 | 4.43 | 2.05 | – | 0.16 | 0.23 | –0.263 | 204 |
| | freshwater food web | directed | 92 | 997 | 10.84 | 1.90 | – | 0.20 | 0.087 | –0.326 | 272 |
| | neural network | directed | 307 | 2 359 | 7.68 | 3.97 | – | 0.18 | 0.28 | –0.226 | 416, 421 |

Analýza sociálních sítí

social network analysis

- studováno dlouho – donedávna však data pouze v malém (dotazníky)
- nyní data ve velkém (mobily, e-maily, Facebook, ...)
- analýzy: metriky centrality, detekce shluků
- komerční využití:
 - mobilní operátoři a nabídky zákazníkům
 - doporučující algoritmy

Míry centrality

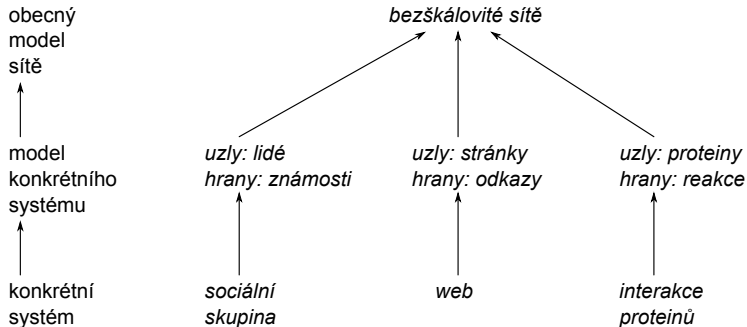
Kdo je klíčovou osobou ve skupině? Co jsou centrální uzly v grafu?

- degree centrality \sim stupeň vrcholu
- closeness centrality \sim jak moc uprostřed, průměrná vzdálenost k ostatním vrcholům
- betweenness centrality \sim jak moc propojuje ostatní, kolik nejkratších cest vede přes vrchol
- hubs and authorities
- a další . . .

Modely komplexních sítí

- komplexní sítě mají **typické vlastnosti**
- dokážeme tyto vlastnosti **modelovat** na abstraktní úrovni?

Úrovně abstrakce



Modely komplexních sítí

- náhodné grafy (Erdős-Renyi model)
- grafy malého světa (small-world graphs, Watts-Strogatz model)
- bezškálovité sítě (scale-free networks, Barabási-Albert model)

modely jednoduché, umožňují simulaci i částečné analytické řešení

Náhodné grafy

Erdős-Renyi model:

- množina vrcholů V , počet hran m
- z množiny potenciálních hran $\binom{V}{2}$ vybereme náhodně m hran

Alternativní definice (zhruba ekvivalentní):

- množina vrcholů V , pravděpodobnost p
- pro každou dvojici vrcholů vložíme hranu s pravděpodobností p

Zajímavé výsledky

- „téměř všechny grafy mají vlastnost Q “ =
pravděpodobnost se blíží k 1 (v limitě pro $n \rightarrow \infty$)
- pro hodně vlastností **fázový přechod**:
 - grafy s pravděpodobností hran $p \Rightarrow$ téměř všechny mají danou vlastnost nebo ji nemají (např. souvislost)
 - skokový přechod
- Demo NetLogo – velikost největší komponenty

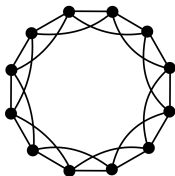
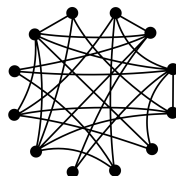
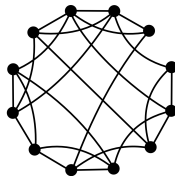
Vlastnosti

- průměrná délka cesty: $\sim \log n$ (tj. splňují požadavek malého světa)
- distribuce stupňů: **Poissonova distribuce**
- shlukování: průměrný shlukovací koeficient $C \sim p \sim \frac{m}{n}$, výrazně **méně** než u reálných komplexních sítí

Grafy malého světa

(Small-world graphs, Watts-Strogatz model)

- 1 **Pravidelná inicializace:** vezmeme N vrcholů, uspořádáme je do kruhu a každý spojíme s K sousedy ($K/2$ na každé straně).
- 2 **Náhodné předrátování:** s pravděpodobností p každou hranu nahradíme jinou, náhodnou hranou.

 $p = 0$  $p = 1$

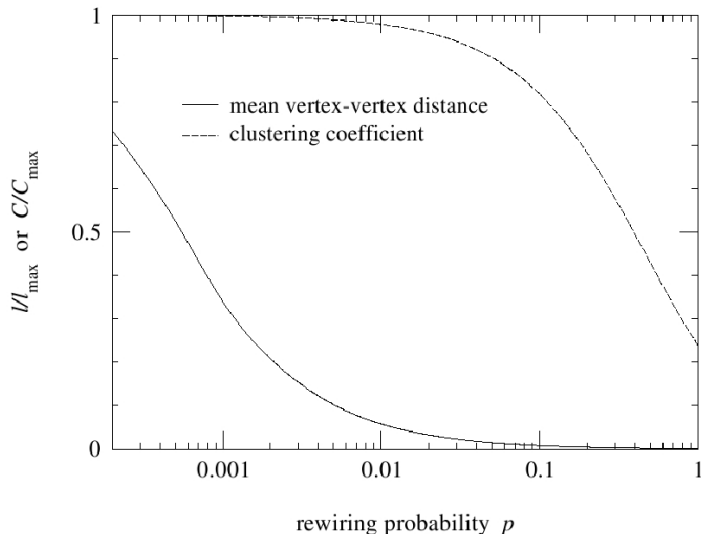
rostoucí míra náhody

Demo NetLogo

Vlastnosti

- průměrná délka cesty $\sim \log N$ (pro vhodné p , přesná charakteristika složitá)
- shlukování: pro $p = 0$ máme $C = \frac{3(K-2)}{4(K-1)}$, pro větší p trochu menší, ale stále **dosti velké** (reálné)
- distribuce stupňů \sim Poissonova distribuce (přesná charakterizace složitá), **jiná** než u reálných komplexních sítí

Mezi řádem a náhodou



Bezškálovité sítě

(scale-free networks, Barabási-Albert model)

- 1 začít s malým množstvím vrcholů a hran
- 2 postupně přidávat vrcholy, nově přidaný vrchol je spojen k hranami
- 3 **upřednostněné připojení** (preferential attachment):
pravděpodobnost, že bude vrchol vybrán je úměrná jeho aktuálnímu stupni

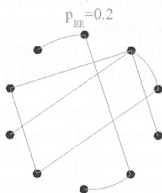
$$\Pi(k_i) = \frac{k_i}{\sum k_j}$$

Demo NetLogo

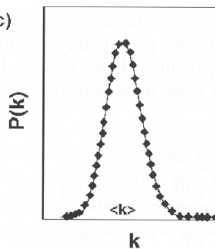
Vlastnosti

- průměrná délka cesty: $\sim \log N$
- distribuce stupňů: **mocninný zákon** (pro základní model s fixním $\gamma = 3$)
- shlukování: větší než u náhodných grafů, ale klesá s velikostí grafu (na rozdíl od Watts-Strogatz modelu), je **menší** než pro reálné sítě

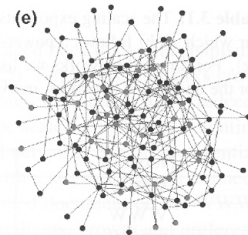
(a)



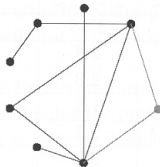
(c)



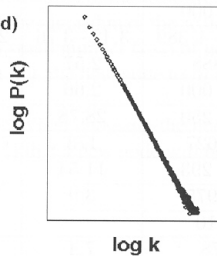
(e)



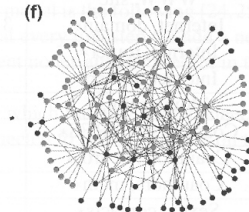
(b)



(d)



(f)



Poznámky

- proti předchozím dvěma modelům je zde důraz na **vznik** (růst) sítí – žádaná struktura vzniká jako vedlejší produkt
- upřednostněné připojení = **pozitivní zpětná vazba**
- důležitý postupný růst i upřednostněné připojení

Další modely rostoucích sítí

- nelineární $\Pi(k)$ (upřednostněné připojení)
- počáteční atraktivnost
- urychlený růst
- stárnutí, způsobilost (fitness)
- rušení, přesměrování hran

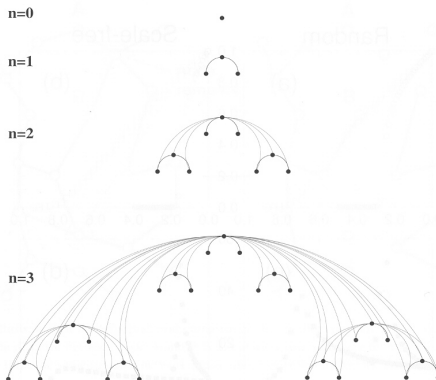
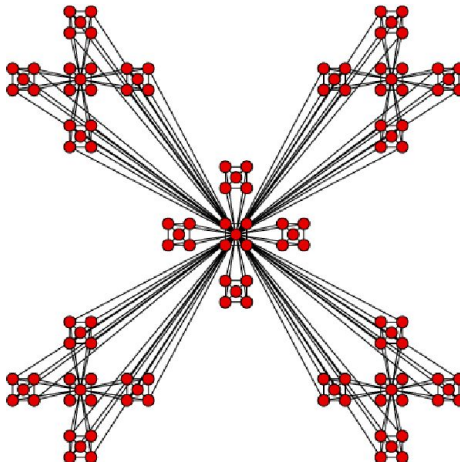


Figure 3.6: Construction of the deterministic scale-free network, showing the first four steps of the iterative process. After [42].

Deterministický model bezškálovité sítě II

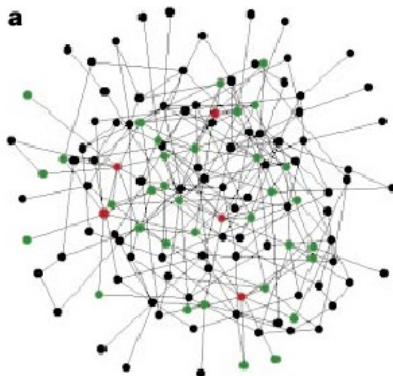


K čemu to je?

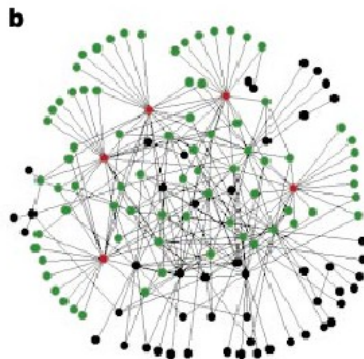
- komplexní sítě mají zajímavé vlastnosti
- máme modely, které tyto vlastnosti (do určité míry) reprodukuje
- no a co?
- můžeme to nějak využít?

100

Role klíčových uzlů

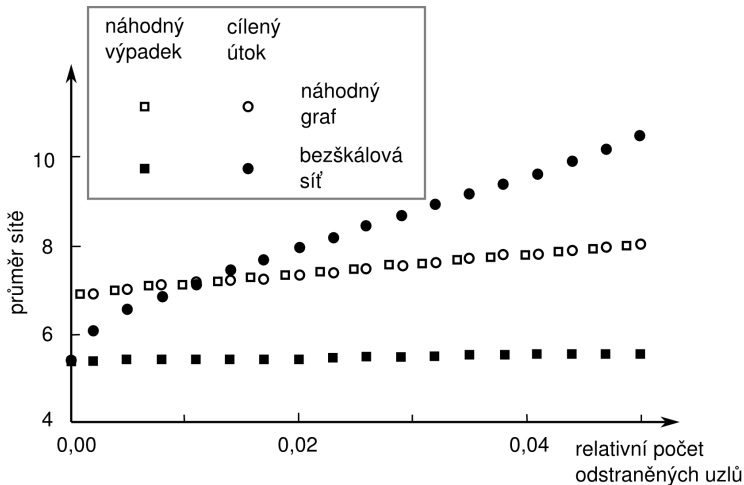


Exponential



Scale-free

Odolnost proti chybám a útokům



100

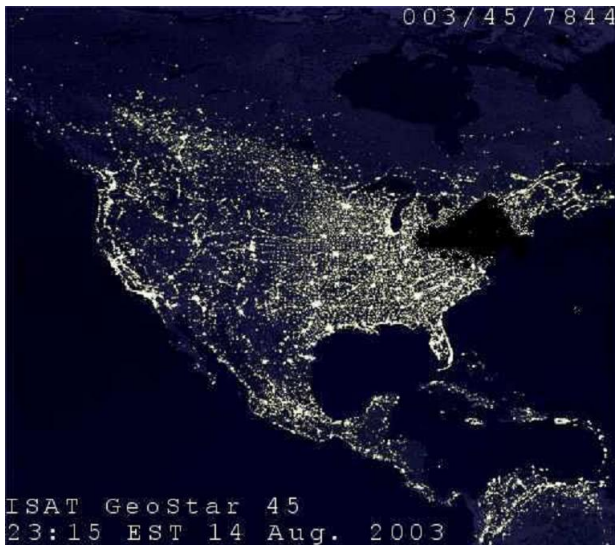
- vyšší odolnost proti chybám
- náchylnější proti útokům – „Achilova pata komplexních sítí“

Příklady

Bezškálovité síťe s uvedenými vlastnostmi (odolnost proti chybám, náchylnost k útokům):

- komunikační sítě (Internet, www)
- ekonomické sítě (a např. teroristický útok na NY)
- proteiny – funkčnost vysoce propojených proteinů je životně důležitá

- změna v síti může vyvolávat další změny
- např. elektrická energie v elektrické síti, energie v potravních řetězcích
- tok ovlivňuje funkčnost sítě
- jaká je robustnost sítě?
- jak souvisí s topologií sítě?



1

- narušení sítě může vést k neočekávaným důsledkům (vlivem zpětných vazeb)
- elektřina: výpadek celé sítě vlivem kumulace zátěže
- potravní řetězce: vyhubení predátora vedoucí k poklesu kořisti

1 9 9 9

- Jaký je vliv stability/robustnosti a složitosti sítě?
- Jaký vliv na stabilitu ekosystému má složitost potravního řetězce (a potažmo biodiverzita)?
- Proč jsou potravní řetězce krátké?
- různé výsledky pro sítě modelované náhodně a sítě modelované realističtěji

Šíření epidemií

- šíření počítačových virů po Internetu
- HIV po sexuální síti
- šíření náboženství, informací v sociální síti
- šíření nových technologií (na základě sociální sítě)

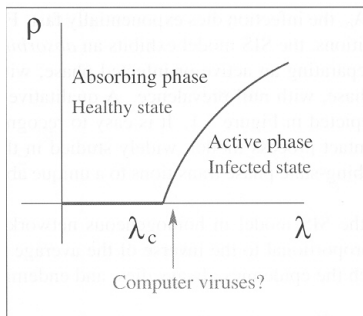
(již jsme viděli: přednáška systémové modelování, cvičení, SIR, SIS, SIRS)

- léky
- antiviry
- cenzura, inkvizice
- reklama

Epidemie v homogenním prostředí

V „homogenním“ prostředí (de facto náhodný graf):

- **kritická hranice**
 - infekčnost menší \Rightarrow epidemie se nešíří
 - infekčnost větší \Rightarrow epidemie se výrazně šíří
- **uniformní imunizace**

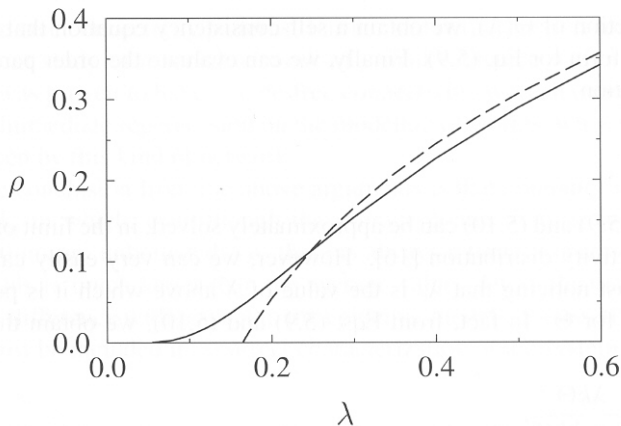


Epidemie v bezškálovitých sítích

- **neexistuje kritická hranice**
- nemoc s velmi malou infekčností se může rozšířit – díky uzlům s vysokým stupněm
- uniformní imunizace je poměrně neúčinná
- **cílená imunizace** zasahující hlavně uzly s vysokým stupněm však může být velmi účinná

Praktické poučení: např. pro boj s AIDS

Epidemie v bezškálovitých sítích



- vlastnost „malého světa“ – mezi většinou uzlů **existují** krátké cesty
- Jak tyto cesty najít?
- Milnerův experiment:
 - nejen, že existuje krátký řetězec známostí
 - účastníci experimentu jej byli schopni najít **bez znalosti celého grafu**, tj. jen za použití **lokálních informací** (srovnej ABM)

100



[Return to top](#)

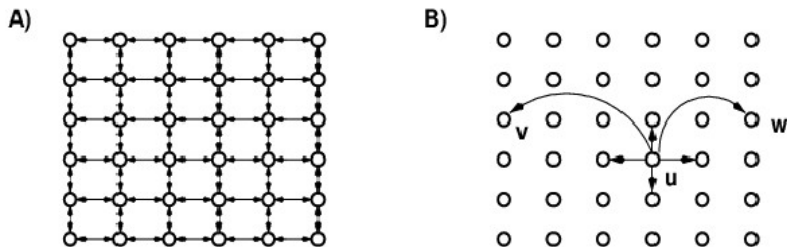
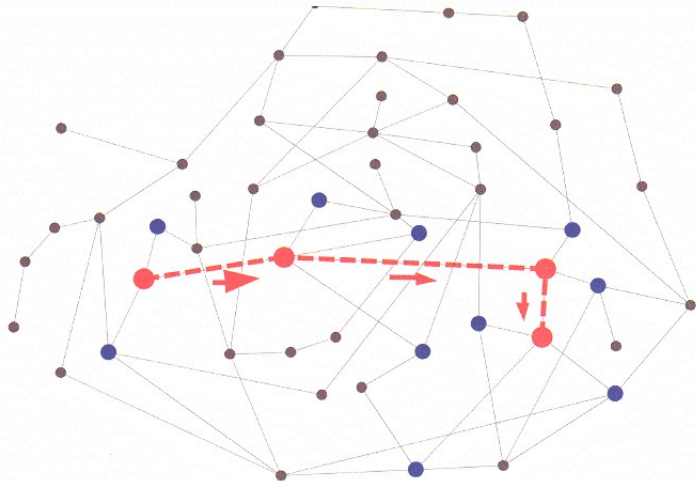
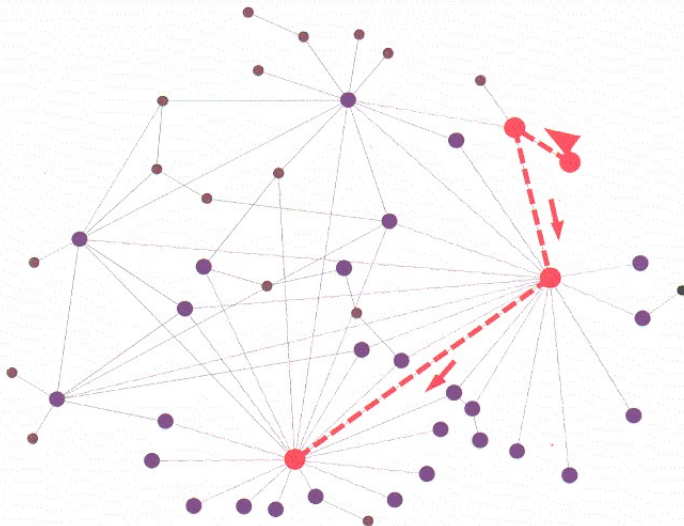


Figure 1: (A) A two-dimensional grid network with $n = 6$, $p = 1$, and $q = 0$. (B) The contacts of a node u with $p = 1$ and $q = 2$. v and w are the two long-range contacts.

Hledání s využitím náhodné procházky

- velký a neznámý graf \Rightarrow náhodná procházka
- **náhodná procházka** (random walk) = vždy vybírá další uzel pro navštívení čistě náhodně
- bezškálovité grafy: cíleně preferujeme uzly s vyšším stupněm
- výsledky simulace: lepší pokrytí než čistá náhodná procházka
- aplikace: Gnutella (peer-to-peer filesharing system)





Dynamika spolupráce v síti

- **dilema vězně** - dříve studováno v homogenním prostředí (každý s každým nebo pravidelná mřížka)
- jaký je **vliv topologie** sítě na vývoj spolupráce?
- pozorování:
 - **shlukování podporuje rozvoj spolupráce**
 - na grafech malého světa se spolupráci daří lépe než na náhodných grafech

Další procesy na sítích

- buněčné automaty na sítích
- synchronizace
- formování názorů
- iterované hry

Shrnutí

- **příklady** komplexních sítí
- **společné vlastnosti**: krátké cesty, shlukování, bezškálovitost
- **abstraktní modely**: náhodné grafy, malý svět, bezškálovité sítě
- **procesy na sítích**: útoky, výpadky, epidemie, šíření informací, spolupráce, hledání
- chování modelů studováno pomocí simulace