Topologie Internetu

Pavel Troubil

19. listopadu 2013

Přehled prezentace

- Motivace
- Náhodné grafy
- Hierarchie
- Power law
- HOT model
- dK-řady

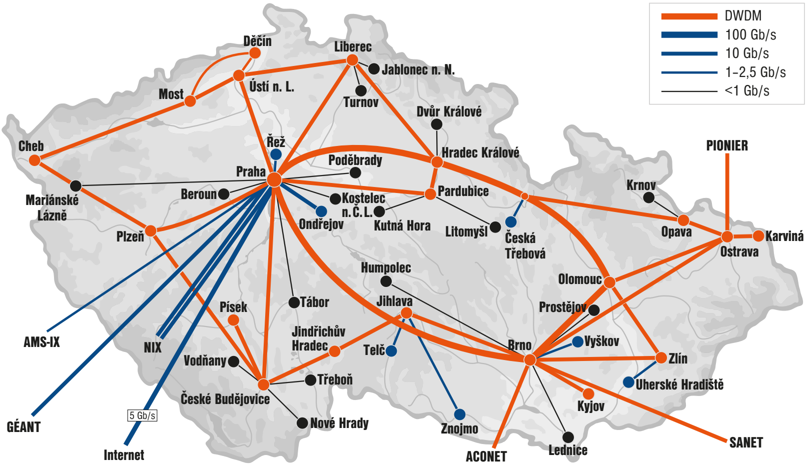
Co víme o podobě Internetu

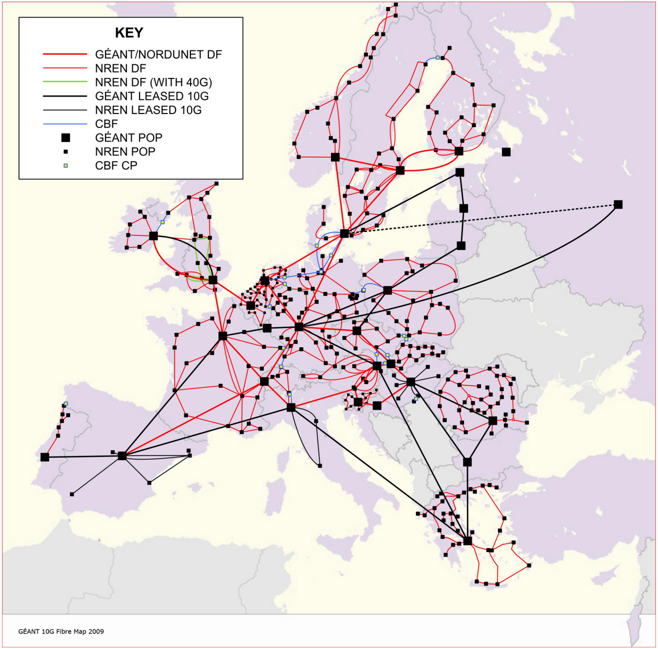
Kdy se spojují uzly v Internetu?

- Uvnitř autonomních jednotek: dle potřeb správců
- Mezi autonomními jednotkami: dle vzájemné domluvy bez centrální autority
  - za úplatu (připojení k ISP, mezi menším a větším ISP)
  - vzájemně výhodné (výměna dat, sdílení kapacit, atd.)

Dostupné informace

- Žádná centrální autorita neschvaluje a neeviduje budování sítí
- Provozovatelé často nechtějí podobu své sítě zveřejnit
  - Bezpečnostní důvody
  - Ochrana know-how
  - Flexibilita konfigurace
- Existují výjimky (např. NRENs – sítě výzkumných institucí)


DWDM
100 Gb/s
10 Gb/s
1–2,5 Gb/s
<1 Gb/s
Děčín
Liberec
Jablonec n. N.
Most
Ústí n. L.
Turnov
Dvůr Králové
Cheb
Řež
Hradec Králové
Poděbrady
Praha
Pardubice
Beroun
Kostelec n. Č. L.
Mariánské Lázně
Ondřejov
Kutná Hora
Litomyšl
Česká Třebová
Plzeň
PIONIER
Krnov
Opava
Ostrava
Karviná
Humpolec
Olomouc
Prostějov
Písek
Tábor
Jihlava
AMS-IX
NIX
Jindřichův Hradec
Telč
Brno
Vyškov
Zlín
Vodňany
Třeboň
Uherské Hradiště
České Budějovice
Kyjov
5 Gb/s
GÉANT
Nové Hrady
Znojmo
Internet
ACONET
Lednice
SANET


KEY
GÉANT/NORDUNET DF
NREN DF
NREN DF (WITH 40G)
GÉANT LEASED 10G
NREN LEASED 10G
CBF
GÉANT POP
NREN POP
CBF CP
GÉANT 10G Fibre Map 2009

Modely topologie Internetu

Popis Internetu jako grafu

- Uzly
  - Jednotlivá zařízení, routery, autonomní systémy
- Propojení na L1–L3 ISO OSI
  - Ohodnocení kapacitou, latencí, jitterem, velikostí bufferů, ...

Motivace

- Ověřování výkonu a funkčnosti protokolů
- Šíření červů, botnetů
- Návrhy obranných mechanismů
- Metody plánování zdrojů

Metody výzkumu topologie Internetu

Měření skutečné topologie

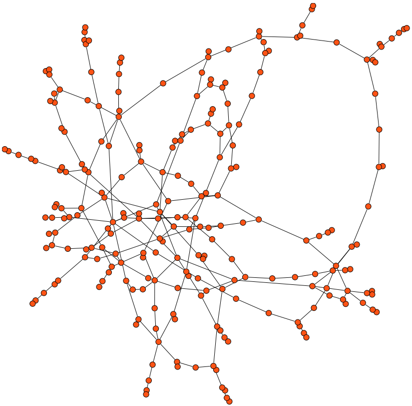
- Analýza traceroute, BGP
- Projekty Rocketfuel, Skitter, Archipelago
- Měřící uzly, aktivní vzájemná komunikace

Teoretická práce

- Hledání charakteristických vlastností a jevů v naměřených datech
- Návrh algoritmů pro generování náhodných sítí s nalezenými charakteristikami

Erdős–Rényi model

- Obecný model náhodných grafů, bez přizpůsobení sítím
- Model $G(n, p)$
  - n – pevný počet vrcholů
  - Vrcholy jsou náhodně spojovány, každá dvojice nezávisle na sobě
  - p – pravděpodobnost vzniku každé hrany
- Průměrně $\binom{n}{2}p$ hran
- Všechny hrany stejně pravděpodobné – nerealistické
  - Častěji se spojují blízké uzly nebo uzly podobné kapacity a významu



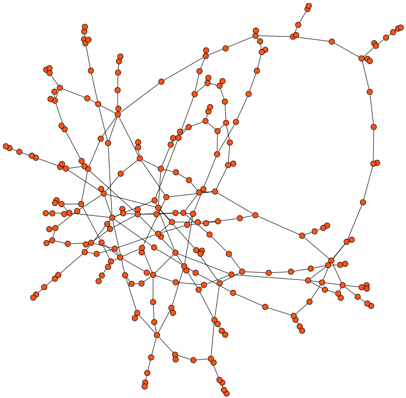
Waxmanův model

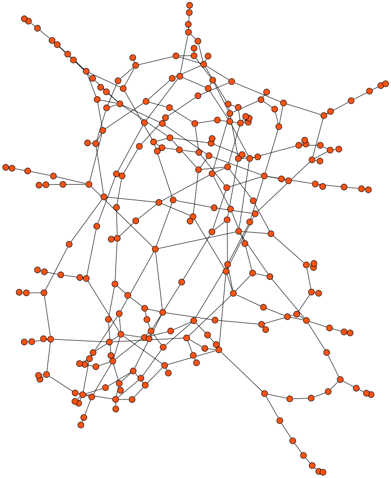
- První model náhodného generování grafu s přihlédnutím k síti
- Oproti obecnému modelu není vznik všech hran stejně pravděpodobný

Algoritmus

- Vygeneruj obdélníkový prostor
- Náhodně rozmísti vrcholy do tohoto prostoru (rovnoměrné, normální či Poissonovo rozložení)
- Pro každou dvojici nezávisle rozhodni o hraně
- Pravděpodobnost vzniku hrany je závislá na euklidovské vzdálenosti mezi vrcholy
- $p(u,v) = \beta e^{\frac{-d(u,v)}{\alpha L}}$, $\alpha, \beta \in [0,1)$
  - $p(u,v)$ – pravděpodobnost vzniku hrany mezi vrcholy u, v
  - $d(u,v)$ – vzdálenost mezi vrcholy u, v
  - α – poměr počtů krátkých/dlouhých hran
  - β – počet hran
  - L – maximální možná vzdálenost mezi uzly

Erdős–Rényi vs. Waxman





Model Transit-Stub

Kritika Waxmanova modelu

- Grafy se vizuálně nepodobají reálným sítím
  - Uzly nemají žádnou hierarchii
  - Chybí obvyklá páteřní síť
  - Objevují se nelogické linky na dlouhé vzdálenosti
- Grafy nejsou spojité
  - Používá se největší komponenta

Zavádí tři stupně hierarchie

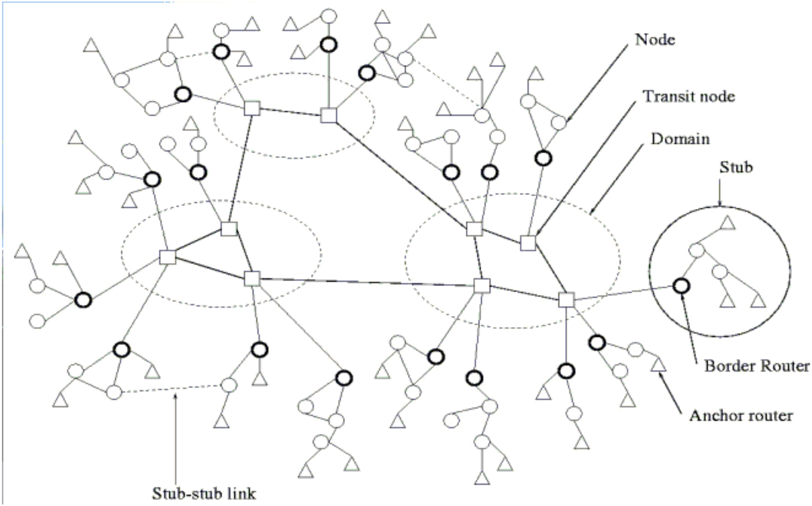
- Tranzitní (Transit) AS
- Koncové (Stub) AS
- Lokální sítě

Transit-Stub algoritmus

- Hierarchicky spouští dřívější algoritmy, obvykle Waxmanův
- Také generuje vrcholy do obdélníkového prostoru
- Postupuje od nejvyšší úrovně dolů, pro každý prvek obdélníkový podregion
- Vždy generuje souvislé grafy

1. Vytvoř tranzitní AS (vrcholy) a hrany mezi nimi
2. Každý vrchol nahraď náhodným souvislým grafem (páteř tranzitního AS)
3. Pro každý vrchol (síťový prvek v tranzitním AS) vygeneruj několik koncových AS
4. Ke koncovým AS připoj lokální sítě s topologií hvězdy
5. Náhodně přidej několik hran spojujících koncové AS, nebo koncový a transitní AS

Transit-Stub algoritmus

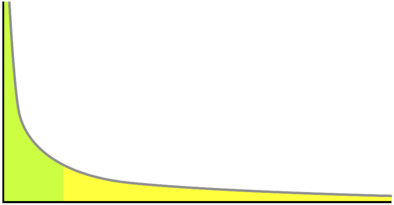


Power law

- Statistické označení pro vztah dvou veličin, kdy závislá proměnná roste či klesá s mocninou nezávislé proměnné

Power law

- $f(x) \approx ax^k$
- Obvykle $1,5 \leq k \leq 4$



Reálné příklady v přirodě i vytvořené člověkem

- Síla zemětřesení
- Velikost kráterů na Měsíci
- Frekvence slov
- Oběti válek

Power law v Internetu – bezškálové sítě

- Stupeň vrcholu vs. frekvence
  - d_v – stupeň vrcholu
  - f_v – frekvence vrcholů stupně d_v
  - Vrcholy vysokého stupně jsou velmi výjimečné. Frekvence vrcholů roste s klesajícím stupněm

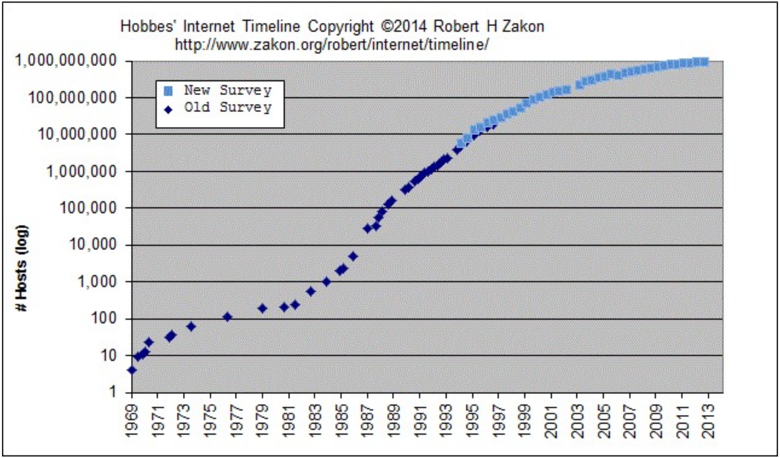
$$f_v \approx (-d_v)^{2,2}$$

- Počet hopů vs. počet dvojic vrcholů v nejvýše této vzdálenosti
  - $P(h)$ – počet dvojic vrcholů ve vzdálenosti nejvýše h (měřeno počtem hopů, tj. hran na cestě)
  - $P(1)$ – počet hran v grafu
  - Počet dvojic vrcholů, které jsou vzájemně dosažitelné v h hopech, roste s h

$$P(h) \approx h^{4,7}$$

- Všechny pozdější generátory dodržují exponenciální vztah stupně a frekvence vrcholu

Počet uzlů připojených k Internetu



Model Barabási–Albert

Zohledňuje dva aspekty reálných sítí

- Síť od svého vzniku stále roste
- Preference připojení k vrcholům vyššího stupně

Algoritmus

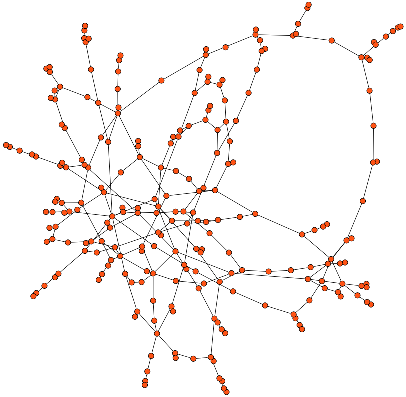
- Vytvoř m_0 vrcholů, žádné hrany
- Dokud nemá síť požadovanou velikost
  - Přidej 1 vrchol
  - Připoj ho hranou k $m \leq m_0$ vrcholům

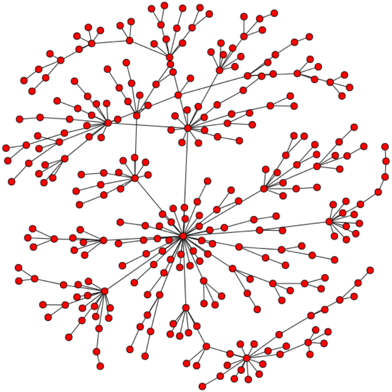
- Pravděpodobnost připojení je přímo úměrná stupni vrcholu

$$p(u, v) = \frac{d_v}{\sum_{w \in V} d_w}$$

- Přirozeně vytváří souvislé bezškálové grafy, $f_v \approx (-d_v)^{2,9}$

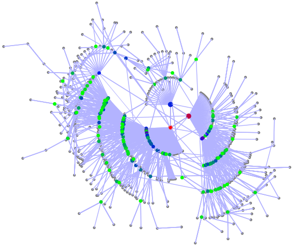
Srovnání Erdős–Rényi a Barabási-Albert



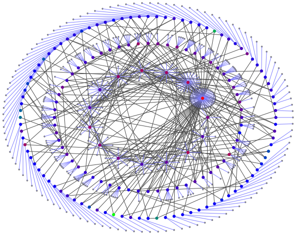


Kritika bezškálových sítí

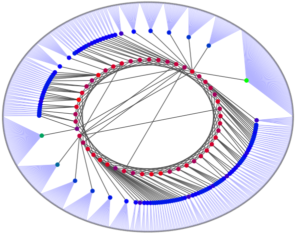
Zachování distribuce (posloupnost) stupňů není dostačující



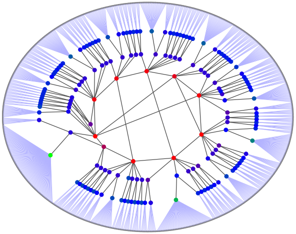
Barabási–Albert



GRG graf



HOT

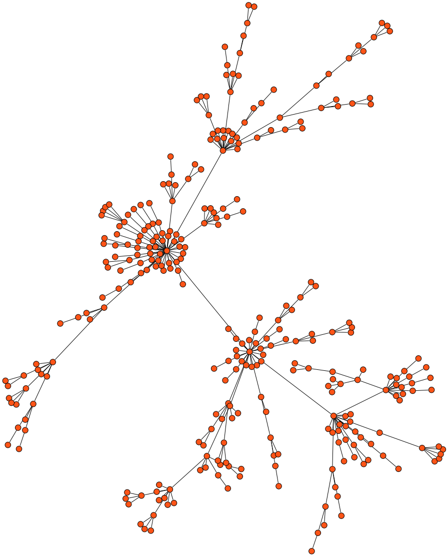


Skutečná síť

Kritika bezškálových sítí

Vznik hubů

- Kritické uzly sítě, kterými prochází většina provozu. Tvoří úzké hrdlo.
- Spojují síť dohromady, jejich výpadek vede k zásadnímu omezení konektivity.



L(g) metrika

$$l(g) = \sum_{(i,j) \in E(g)} d_i d_j$$

- Uvažujme jednu posloupnost stupňů $(d_1, d_2, \dots, d_n)$
- Množina grafů G, všechny s touto posloupností stupňů

$$l_{max} = \max\{l(g) : g \in G\}$$

$$l_{min} = \min\{l(g) : g \in G\}$$

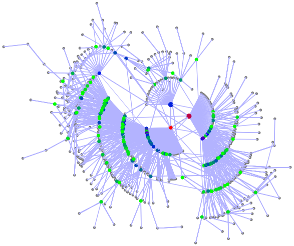
- Normalizovaná metrika:

$$L(g) = (l(g) - l_{min})/(l_{max} - l_{min})$$

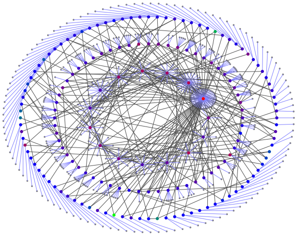
$$L(g) \in [0, 1]$$

- Vyšší $L(g) \Leftrightarrow$ vrcholy vysokých stupňů spojeny

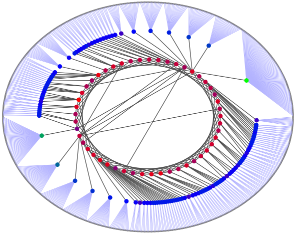
L(g) konkrétně



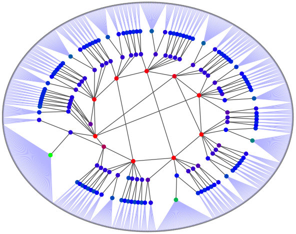
Barabási–Albert: vysoká



GRG graf: nižší

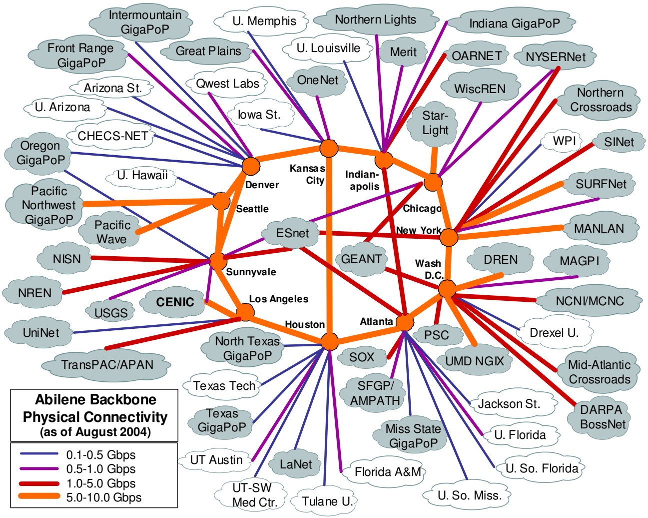


HOT: nízká



Skutečná síť: nízká

Schéma páteřní sítě Abilene



Přístup First-Principle

Jak správci staví sítě?

- Technologická omezení
  - Routery dostupné na trhu
  - Kompromis mezi celkovou propustností a stupněm vrcholu
  - Se stupněm neklesá jen propustnost pro každé připojení, ale propustnost celková
- Ekonomická omezení
  - Provoz fyzických linek je drahý
  - Snaha o maximální agregaci do linek vyšších kapacit co nejblíže koncovým uzlům
  - Páteř tvoří relativně málo dlouhých linek vysokých kapacit
- HOT - Heuristicky Optimální Topologie
  - Obvyklá představa provozovatelů o dobré topologii sítě

Vznik HOT grafu

Přepojení grafu z Barabási-Albert modelu

- Výběr 50 centrálních uzlů nižšího stupně do jádra
- Jejich sousedi vyšších stupňů jakožto brány
- Redistribuce hran mezi branami a jádrem (rovnoměrná distribuce kapacity mezi brány)

Jak tyto vlastnosti popsat matematicky?

dK-rozdělení

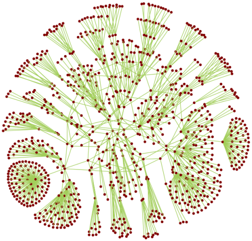
dK-rozdělení – pravděpodobnostní rozdělení na podgrafech velikosti *d*

- $0K$ – průměrný stupeň vrcholu
- $1K$ – rozdělení stupňů vrcholu
- $2K$ – pravděpodobnost spojení vrcholů o daných stupních
- $3K$ – rozdělení podgrafů o 3 vrcholech

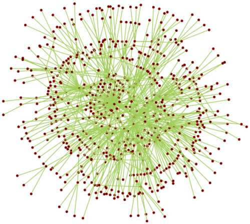
dK-grafy

- množina grafů se stejným *dK*-rozdělením jako vstupní graf
- $3K(g) \subseteq 2K(g) \subseteq 1K(g) \subseteq 0K(g)$
- nK – identický graf

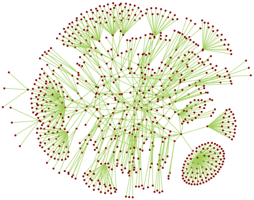
Vstup vs. dK - grafy



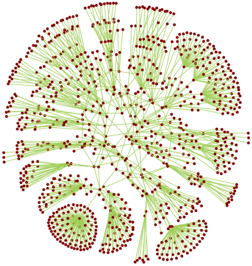
Vstup



1K



2K

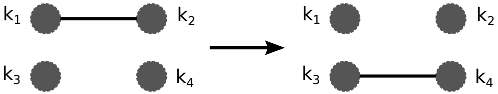


3K

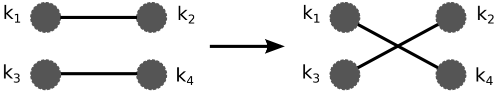
Generování *dK*-grafů

Přepojování hran v existujícím grafu požadovaných vlastností

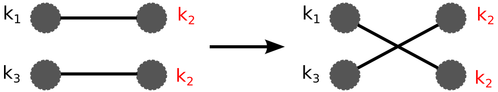
- $0K$: zachování počtů hran, přesun hrany mezi libovolnými dvěma vrcholy



- $1K$: zachování stupňů, výměna koncových vrcholů mezi dvěma hranami



- $2K$: výměna jednoho koncových vrcholů stejného stupně mezi dvěma hranami



- k_i značí stupeň příslušného vrcholu
- Opakovaný náhodný výběr přepojení, která nezachovávají isomorfismus

Shrnutí vývoje

Obecné náhodné grafy

$\Downarrow$

Pravděpodobnost hrany závislá na vzdálenosti vrcholů

$\Downarrow$

Zavedení hierarchie

$\Downarrow$

Power law

$\Downarrow$

Principy růstu

$\Downarrow$

dK-rozdělení

Zajímavé články

David Alderson, Lun Li, Walter Willinger, and John C. Doyle.
Understanding internet topology: principles, models, and validation.
IEEE/ACM Transactions on Networking, 13:1205–1218, December 2005.

Albert-László Barabási and Réka Albert.
Emergence of Scaling in Random Networks.
Science, 286(5439):509–512, 1999.

John C. Doyle, David L. Alderson, Lun Li, Steven Low, Matthew Roughan, Stanislav Shalunov, Reiko Tanaka, and Walter Willinger.
The "robust yet fragile"nature of the Internet.
Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 102(41):14497–14502, October 2005.

Michalis Faloutsos, Petros Faloutsos, and Christos Faloutsos.
On power-law relationships of the internet topology.
SIGCOMM Computer Communication Review, 29:251–262, August 1999.

Lun Li, David Alderson, Walter Willinger, and John Doyle.
A first-principles approach to understanding the internet's router-level topology.
SIGCOMM Computer Communication Review, 34:3–14, August 2004.

Priya Mahadevan, Dmitri Krioukov, Kevin Fall, and Amin Vahdat.
Systematic topology analysis and generation using degree correlations.
SIGCOMM Computer Communication Review, 36:135–146, August 2006.

Bernard M. Waxman.
Routing of multipoint connections.
IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 6(9):1617–1622, August 1988.