

УДК 004.942

ДИНАМІКА РОСТУ ІНТЕРНЕТУ ТА ЙОГО КОРЕЛЯЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ

Наталія Іванушак¹, Володимир Пасічник²

¹*Чернівецький національний університет ім. Ю.Федьковича*

²*Національний університет "Львівська політехніка"*

Вступ

Інтернет (англ. Internet, від Interconnected Networks - об'єднані мережі) – глобальна телекомунікаційна мережа інформаційних та обчислювальних ресурсів. Він складається з багатьох тисяч корпоративних, наукових, державних і домашніх комп'ютерних мереж. Об'єднання мереж різної архітектури і топології стало можливим завдяки протоколу IP (англ. Internet Protocol) і принципу маршрутизації пакетів даних.

За останні кілька років була розгорнута величезна діяльність наукового співтовариства присвячена дослідженню функцій і роботи Інтернету, його транспортної статистики, навігації, інформаційного пошуку та ін. Проте найцікавішими є роботи, які намагаються змоделювати динаміку росту Інтернету на основі емпіричних досліджень.

Оригінальна робота [1], в якій показаний неоднорідний степеневий розподіл Інтернету, викликала лавину наукових праць по структурній архітектурі Інтернету, включаючи ієрархічну організацію [2], фрактальні властивості [3], циклічну структуру [4] і т.д.

Інтернет включає в себе основну частину - центральне ядро та периферійні області, які з'єднані з центральним ядром. Кожен вузол характеризується ступенем, тобто кількістю зв'язків, які входять в нього. Фактично, ступінь являє собою мінімальну локальну інформацію. Базуючись тільки на цій інформації, неможливо розпізнати чи належить вузол до центральної частини,

чи розміщений в периферійному положенні. «Розклад ядра» (k-core decomposition) [5] став ефективним інструментом для виділення центральної частини великомасштабних мереж і інтенсивно використовується для того, щоб проаналізувати різні мережі, особливо з гетерогенним степеневим розподілом.

Вчені [6,7] розглядають Інтернет не з точки зору www-сайтів і їх числового збільшення і розширення, а з точки зору автономних систем (AS). Автономні системи являють собою самодостатні області, які здатні існувати без впливу на них зовнішніх факторів. Університетська мережа, Інтернет-провайдер або велика корпоративна мережа – все це можна визначити як AS.

1 Динамічні і кореляційні властивості Інтернету

В статті [6] зосереджується увага на динамічних властивостях Інтернету, в ній прослідковується розвиток реальних Інтернет-карт з 1997 до 2000, зібраних Національною Лабораторією Прикладного Дослідження Мереж (NLANR). Розглядаються властивості кореляції з'єднання вузлів, а також поведінка з часом властивостей, пов'язаних з динамікою росту нових вузлів. Аналіз показує динамічну поведінку при різних режимах росту в залежності від віку вузла і можливості з'єднання. Зокрема, проект NLANR збирає дані з листопада 1997, і це подає топологічну і динамічну інформацію про послідовну підмножину Інтернету. Карта 1 листопада 1997 містить 3180 AS, в той час як виміри грудня 1999 показали 6374 AS.

Розглядаючи Інтернет як динамічну мережу, важливо розрізнити, чи досяг він стаціонарного стану, середні властивості якого – незалежність у часі. Аналізується поведінка в часі декількох середніх значень, таких як кількість з'єднань $\langle k \rangle$, коефіцієнт кластеризації $\langle C \rangle$ і середня мінімальна відстань шляху мережі $\langle d \rangle$. Перші два значення (табл. 1) показують дуже повільну тенденцію зростання з часом, в той час як середня мінімальна відстань шляху повільно зменшується з часом.

Таблиця 1

Середні значення кількості з'єднань, коефіцієнту кластеризації, мінімальної відстані шляху мережі на протязі трьох років

Рік	1997	1998	1999
$\langle k \rangle$	3,47(4)	3,62(5)	3,82(6)
$\langle C \rangle$	0,18(1)	0,21(2)	0,24(1)
$\langle d \rangle$	3,77(1)	3,76(2)	3,72(1)

Більш чітка характеристика топологічних властивостей мережі дається розподілом з'єднань, $P(k)$. На рис. 1 зображена імовірність $P(k)$, що в даного вузла є k зв'язків з іншими вузлами.

Розподіл для знімків Інтернету в різний час дав чіткий прояв степеневому закону

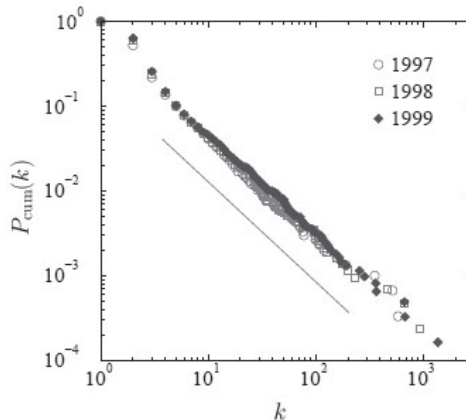


Рисунок 1 – Розподіл з'єднань для знімків Інтернету 1997-1999 рр. Поведінка степеневому закону характеризується нахилом $-1,2$, який приводить до з'єднання з показником експоненти $\gamma=2,2$.

$$P(k) \sim k^{-\gamma} \text{ з } \gamma=2,2 \pm 0,1. \quad (1)$$

Зменшення розподілу пояснюється максимальною кількістю з'єднань системи і пов'язано з повним розміром Інтернет-карти. Показник степеневому закону γ не залежить від часу, що вказує на те, що топологічні властивості Інтернету спрямувались до чіткого постійного стану.

Перший крок в більш детальній характеристиці Інтернету стосується дослідження кореляцій з'єднань. Цей фактор найкраще представляється умовною імовірністю $P_c(k'|k)$, яка виражає зв'язок вузла з кількістю з'єднань k з вузлом з кількістю з'єднань k' . Якщо ця умовна імовірність не залежить від k , тоді маємо топологію без будь-якої кореляції між з'єднаннями вузлів. В цьому випадку, $P_c(k'|k) = P_c(k') \sim k^{-\gamma} P(k')$, що означає, що будь-який зв'язок вказує на вузли з імовірністю, пропорційною їх з'єднанням. Навпаки, явна залежність від k являється наслідком нетривіальних кореляцій між з'єднаннями вузлів і можливої присутності ієрархічної структури в топології мережі.

Щоб відслідкувати Інтернет-динаміку зосереджується увага на доповненні нових вузлів і зв'язків в карти. В діапазоні трьох років відслідковувалося число нових l_{new} зв'язків, які з'являються між недавно введеним вузлом і уже існуючими вузлами. Також контролюється поява зв'язків l_{old} між уже існуючими вузлами. З таблиці 2 видно, що найбільший вклад в ріст здійснюється появою зв'язків між уже існуючими вузлами. Інтернет-карта характеризується нетривіальними кореляціями з'єднань. На розвиток Інтернету можуть впливати безліч інших факторів, таких як ієрархія вузлів, обмеження ресурсів і реальне географічне положення вузлів.

2 Експоненціальний ріст Інтернету

В роботі [7] зібрані дані маршрутизації з грудня 2001 до грудня 2006 з піврічними інтервалами. Отже, в наявності є повні

11 AS-рівнів в Інтернет-графах. AS-граф не являється простим знімком Інтернету, а є результатом злиття десяти знімків, однорідно розподілених в часі. AS-граф може дати більш точну картину Інтернету, ніж один його єдиний знімок. Розмір AS-рівня Інтернету росте дуже швидко, фактично, він підпорядкований знаменитому закону Мура: $N(t) \sim 10^{0.0283t} \sim e^{0.0652t}$. Мур представив у вигляді графіка ріст продуктивності запам'ятовуючих мікросхем і встановив закономірність: нові моделі мікросхем розроблялись через більш-менш однакові періоди (18-24 місяці) після появи їх попередників, а ємність їх при цьому зростала кожний раз приблизно вдвічі. Якщо така тенденція продовжиться, - вважає Мур, - то потужність обчислювальних пристроїв експоненціально зросте на протязі відносно короткого проміжку часу.

Сьогодні група китайських учених [7] довела, що Інтернет також росте згідно з законом Мура. Слід відмітити, що $\lambda=0,0652$ – коефіцієнт росту і Δt – період, за час якого розмір подвоюється, $\Delta t = \frac{1}{\lambda} \ln 2 \approx 10.64$. На протязі часу приблизно півроку прогнозується, що розмір AS-рівня Інтернет-топології буде подвоюватися через кожні 5,32 року. Число ребер теж росте в експоненціальній формі. Дійсно, воно масштабується як $E \sim N^\gamma$, де $\gamma=1,11 \pm 0,04$. За короткий проміжок часу ця залежність може бути добре апроксимована лінійною функцією (рис.2).

Насамкінець, число з'єднань у Всесвітній Павутині росте значно швидше, ніж $E \sim N^{1.29}$ [8], показуючи ефект прискореного росту.

3 Суть методу «розкладу k-ядра»

Розкриття підсилюючої тенденції центральної частини Інтернету має велике значення, так як центральні вузли фактично керують його глобальними функціями. Застосовується метод «k-розкладу ядра», щоб виділити центральну частину, де k-ядро визначається фрактальним видаленням всіх вузлів, степінь яких менший за k до тих пір, поки степінь всіх решти вузлів не буде

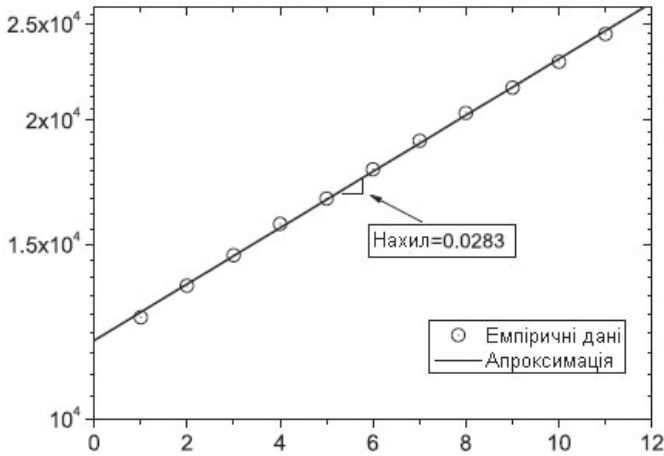


Рисунок 2 – Ріст числа вузлів з часом. Вісь у подана в логарифмічному масштабі. Часові мітки від 1 до 11 відповідають часу з грудня 2001 до грудня 2006 з шестимісячними інтервалами.

більшим або рівним k . k називають індексом ядра. Ілюстрацію «розкладу ядра» показано на рис.3. Заданий граф, 0-ядрений являється безпосередньо самим графом, а 1-ядрений – підграфом

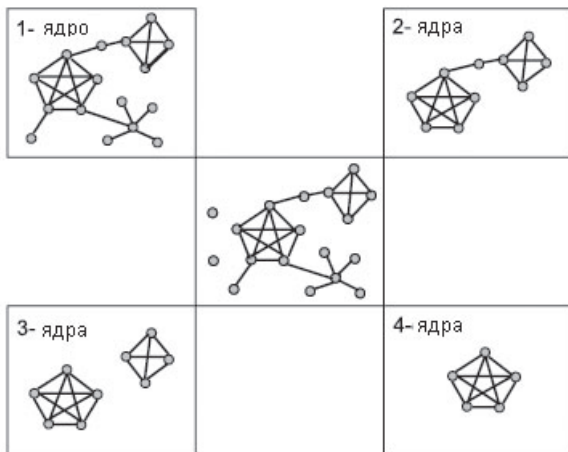


Рисунок 3 – Ілюстрація «розкладу ядра»

без усіх ізольованих вузлів. Вузол степеня більшого або рівного k , можливо, не з'являється в k -ядрі, так як деякі з його сусідів могли бути раніше видалені.

Розміри k -ядер з великим k відносно стійкі, порівняно з ростом повної Інтернет-карти, і найбільш високий показник k_{\max} також стійкий. Ці результати припускають, що центральною частиною і периферією Інтернету керують різні еволюційні механізми. Фактично, більшість нових вузлів і ребер, що сприяють «вибуху» Інтернету, з'являються на периферії.

Висновки

1. В моделях, запропонованих дослідниками, кожний вузол мережі представлений як автономна система. Зв'язок між двома незалежними AS, в дійсності, представлений фізичним (оптоволокну, провідники) та комерційним (контракт, угода про співпрацю) з'єднанням.
2. Щоб визначити, де знаходиться «ядро» Інтернету, яке являється його найголовнішою складовою, дослідники застосували метод, який називається «розклад ядра» (*k-core decomposition*), тобто всі вузли мережі зі значенням коефіцієнта нижче k були видалені з віртуальної моделі мережі. Отрималось ядро з дуже невеликою кількістю вузлів мережі, що залишилися – з центральною частиною з'єднуються менш, ніж 0,3% наявних вузлів.
3. Ядро Інтернету і його периферійні системи підвладні неоднаковим еволюційним механізмам. В той час, як центр мережі стабільний в своєму розвитку, більшість нових з'єднань з'являються на достатньому віддалені. Такий результат протирічить попереднім дослідженням, які доводили, що максимальне число з'єднань з коефіцієнтом k збільшується з ростом Інтернету в цілому.
4. Вже створена велика кількість моделей, які передбачають ріст глобальної мережі в майбутньому. І всі вони

припускають, що центральна частина Інтернету росте разом з його периферією, будучи залежними від одних і тих же механізмів. І відбувається все це з великою швидкістю. Дослідження [7] довели, що максимальний степінь (кількість підключень) і розмір центрального ядра мережі залишаються однаковими – увесь ріст дає периферія. Ці результати кардинально протирічать попереднім роботам на цю тему і їх можна вважати поворотними в моделюванні глобальної мережі.

5. Дослідження також довели, що мережа Інтернет розподілена більш нерівномірно, ніж вважалося раніше. Хоча кількість з'єднань з великими вузлами мережі достатньо велика, результати наглядно показали, що з'єднань між дрібними та середніми вузлами набагато більше.

Література

- [1] Faloutsos M, Faloutsos P and Faloutsos C 1999 Comput. Commun. Rev..
- [2] Ravasz E and Barabasi A-L 2003 Phys. Rev.
- [3] Caldarelli G, Marchetti R and Pietronero L 2000 Europhys. Lett. 52 386.
- [4] Bianconi G, Caldarelli G and Capocci A 2005 Phys. Rev. E 71 066116.
- [5] Pittel B, Spencer J and Wormald N 1996 J. Combin. Theory 67 111.
- [6] R Pastor-Satorras, A Vazquez, A Vespignani arXiv:cond-mat/0105161v2.
- [7] Guo-Qing Zhang, Guo-Qiang Zhang, Qing-Feng Yang, Su-Qi Cheng and Tao Zhou 2008 New J. Phys. 10 123027.
- [8] Broder A, Kumar R, Moghoul F, Raghavan P, Rajagopalan S, Stata R, Tomkins A and Wiener J 2000 Comput.Netw. 33 309.