

Tadeusz CZACHÓRSKI, Joanna DOMAŃSKA, Arkadiusz SOCHAN  
Instytut Informatyki Teoretycznej i Stosowanej PAN

## SAMOPODOBNY CHARAKTER NATEŻENIA RUCHU W SIECIACH KOMPUTEROWYCH

**Streszczenie.** Artykuł przedstawia analizę nateżenia ruchu pakietów w sieci Ethernet oraz ruchu ramek MPEG-2 w sieci ATM pod kątem występowania cechy zwanej samopodobieństwem. Zamieszczono krótką charakterystykę procesów samopodobnych oraz wnioski wypływające z samopodobnej natury ruchu w sieciach komputerowych.

## SELF-SIMILARITY OF COMPUTER NETWORK TRAFFIC

**Summary.** In the paper, we present an analysis of packet traffic in Ethernet and MPEG-2 frames traffic over ATM. We consider the self-similar character of packet streams and give a brief characteristics of self-similar processes. In conclusion some consequences of self-similar traffic nature are discussed.

### 1. Wstęp

Badania przeprowadzane w ostatnich latach wykazały, że ruch sieciowy zachowuje się inaczej aniżeli dotychczas sądzono. Ruch taki charakteryzowano zwykle krótkoterminowymi zależnościami, natomiast analiza przeprowadzanych pomiarów wykazała, że cechują go zależności długoterminowe. Duża liczba źródeł ruchu sieciowego generuje ruch wykazujący w dużej skali czasu cechę samopodobieństwa. Cechę tę można zaobserwować na różnych poziomach modelu warstwowego sieci komputerowych, jak również przy różnych strukturach sieciowych.

W niniejszym artykule przedstawiono analizę pod kątem występowania cechy samopodobieństwa:

- ruchu pakietów w sieci Ethernet (na podstawie pomiarów udostępnianych przez Laboratorium w Bellcore),
- ruchu ramek MPEG-2 (na podstawie pomiarów dokonanych w Laboratorium Komputerowych Systemów Multimedialnych w IITiS PAN).

Układ niniejszego artykułu jest następujący: w sekcji 2 zawarto bliższą charakterystykę procesów samopodobnych, sekcja 3 zawiera analizę ruchu sieciowego pod kątem jego samopodobieństwa, w sekcji 4 opisano wnioski wypływające z samopodobnej natury ruchu w sieciach komputerowych.

## 2. Podstawy procesów samopodobnych

Termin „samopodobieństwo” jest używany w statystyce od około 30 lat. Został wprowadzony przez B. Mandelbrota [10], który używał go do opisu pewnych zachowań w dziedzinie geofizyki i hydrologii. W przypadku opisu ruchu sieciowego termin ten został wprowadzony w ostatnim dziesięcioleciu i oznacza bardzo podobne zachowanie się procesu dla różnych skal czasu.

Samopodobieństwo procesu stochastycznego jest zdefiniowane następująco [2]:

*Proces stochastyczny  $X_t$  jest samopodobny z parametrem samopodobieństwa  $H$ , jeżeli dla dodatniego czynnika  $g$  przeskalowany proces  $g^{-H}X_{gt}$  ma ten sam rozkład co oryginalny proces  $X_t$ .*

Pojęcie samopodobieństwa oznacza więc faktycznie formę niezmienności procesu w odniesieniu do zmian skali czasu – proces oryginalny i proces przeskalowany są statystycznie nierozróżnialne.

W przypadku zwyczajnych ruchów Browna, jeżeli czas został przeskalowany przez 2, należy przeskalować amplitudę przez  $\sqrt{2}$ . Przeskalowując amplitudę przez inny czynnik (np. przez 1 lub 2), zmieniamy własności statystyczne procesu. Tego typu ruch Browna jest więc ograniczony, dlatego też Mandelbrot wprowadził ułamkowy ruch Browna, dla którego jest możliwe skalowanie amplitudy przez wartość pomiędzy 1 a 2. Dla małych wartości czynnika skalującego (ok. 1) wykres staje się bardziej nierówny aniżeli w przypadku klasycznych ruchów Browna, a dla dużych wartości czynnika skalującego (ok. 2) – bardziej gładki. Zwykle nie mówimy o samym czynniku skalującym jako o liczbie, lecz o wykładniku potęgi liczby 2. Dla klasycznych ruchów Browna wykładnik ten wynosi dokładnie  $\frac{1}{2}$  ( $2^{\frac{1}{2}} = \sqrt{2}$ ). Jest on zwykle nazywany wykładnikiem Hursta i oznaczany przez

$H$ . Hurst był hydrologiem pracującym wspólnie z Mandelbrotem nad własnościami wahań poziomu rzek. Zakresem wartości wykładnika Hursta jest przedział od 0 (odpowiada bardzo nierównej krzywej losowej – proces przestaje być ciągły) do 1 (odpowiada krzywej bardzo wygładzonej – proces deterministyczny). Zatem zakres wykładnika Hursta pokrywa wszystkie możliwe procesy stacjonarne. Istnieje ścisły związek pomiędzy wykładnikiem Hursta a wymiarem fraktalnym danego procesu [8]. Dodatkowo istnieje ścisła zależność pomiędzy autokorelacją procesu a wykładnikiem Hursta. Autokorelacja określa, w jaki sposób bieżący stan procesu zależy od jego historii. O procesach, dla których  $H \neq 0.5$ , mówimy, że występują w nich zależności długoterminowe, a wartość  $H$  określa „długość pamięci”.

Różnicę pomiędzy procesem o krótkoterminowych zależnościach a procesem o zależnościach długoterminowych (samopodobnym) można ująć następująco [3]. W poniższych zależnościach wykorzystano zaagregowany proces  $X_k^{(m)}$ :

$$X_k^{(m)} = \frac{1}{m}(X_{km-m+1} + \dots + X_{km}), \text{ gdzie } k \geq 1,$$

który jest średnią procesu  $X_t$  w przedziale  $m$  ( $k \geq 1$ ) oraz widmo procesu, przez które należy rozumieć trasformatę Fouriera z funkcji autokorelacji.

- Dla procesu o krótkoterminowych zależnościach:
  - $\sum_{\tau=0}^{\infty} cov(X_t, X_{t+\tau})$  jest zbieżna,
  - widmo w 0 jest skończone,
  - dla dużych  $m$ ,  $var(X_k^{(m)})$  jest asymptotą  $\frac{var(X)}{m}$ ,
  - proces  $X_k^{(m)}$  przy  $m \rightarrow \infty$  dąży do czystego szumu drugiego rzędu;
- Dla procesu o długoterminowych zależnościach:
  - $\sum_{\tau=0}^{\infty} cov(X_t, X_{t+\tau})$  jest rozbieżna,
  - widmo w 0 jest nieskończone,
  - dla dużych  $m$ ,  $var(X_k^{(m)})$  jest asymptotą  $var(X)m^{-\beta}$ ,
  - proces  $X_k^{(m)}$  przy  $m \rightarrow \infty$  nie dąży do czystego szumu drugiego rzędu.

Istnieje kilka metod często używanych do sprawdzania, czy dany proces jest samopodobny. Najbardziej intuicyjną metodą jest tzw. test wizualny. Jak wiadomo, samopodobieństwo jest związane z pojęciem statystycznej niezmienności poprzez skale czasu, co oznacza, że proces samopodobny ma te same własności dla dużych i małych skali czasu.

Tak więc najprostszym testem wykrywającym samopodobieństwo jest prześledzenie zmierzzonego lub symulowanego ruchu w różnych skalach czasowych. Rozważamy więc proces  $mX_k^{(m)}$  (w przypadku ruchu sieciowego – liczbę pakietów w oknie czasowym o długości  $m$ ) względem czasu  $m$ . Rysując wykresy dla różnych  $m$  można obserwować zachowanie procesu poprzez skale czasu. Mnożnik pomiędzy różnymi jednostkami czasu z reguły ustala się na równy 10.

Innym sposobem scharakteryzowania ruchu samopodobnego jest szacowanie tzw. zagregowanego wskaźnika dyspersji (IDC – ang. index of dispersion) oraz zagregowanego współczynnika zmienności (CV – ang. coefficient of variation) procesu [14].

Wskaźnik dyspersji IDC wyraża się następująco:

$$IDC(m) = \frac{Var(mX_k^{(m)})}{E(mX_k^{(m)})}$$

W przypadku ruchu sieciowego jest to więc iloraz wariancji liczby pakietów przybyłych w przedziale czasowym o długości  $m$  i średniej liczby pakietów w  $m$ . Dla procesów samopodobnych  $IDC(m)$  wzrasta monotonicznie poprzez skale czasu. Cechy takiej nie wykazuje proces o zależnościach krótkoterminowych. Dla tego typu procesu  $IDC(m)$  jest zbieżny poprzez skale czasu do stałej wartości.

Współczynnik zmienności CV wyraża się następująco:

$$CV(m) = \frac{\sqrt{Var(mX_k^{(m)})}}{E(mX_k^{(m)})}$$

W przypadku ruchu sieciowego jest to więc iloraz odchylenia standardowego liczby pakietów przybyłych w przedziale czasowym o długości  $m$  i średniej liczby pakietów w  $m$ . Dla procesów samopodobnych współczynnik zmienności jest dużo większy od 1 dla małych odstępów czasu.

Stopień samopodobieństwa procesu najlepiej charakteryzuje współczynnik Hursta. Można go oszacować różnymi metodami. Jedną z nich jest analiza wariancji procesu zagregowanego  $X_k^{(m)}$  [2]. Znaczącą cechą procesów samopodobnych jest to, że wariancja procesu zagregowanego opada wolniej aniżeli  $\frac{1}{m}$ . Wariancja takiego procesu jest równa:

$$Var(X_k^{(m)}) = \sigma^2 m^{-\beta},$$

gdzie  $0 < \beta < 1$ , a  $\sigma^2$  jest wariancją procesu dla  $m = 1$ . Szacując  $\beta$  można określić parametr Hursta, ponieważ wartość  $\beta$  jest ściśle powiązana z wykładnikiem Hursta poprzez zależność:

$$H = 1 - \frac{\beta}{2},$$

gdzie  $\beta$  jest nachyleniem wykresu  $\log_{10} \frac{\text{var}(X_k^{(m)})}{\sigma^2}$  do  $\log_{10}(m)$ .

Istnieją również inne metody szacowania parametru Hursta, np. metody oparte na periodogramach. Jednakże dla potrzeb niniejszego opracowania współczynnik Hursta będzie szacowany metodą wariancji.

### 3. Pomiary rzeczywistego ruchu sieciowego

Pomiary ruchu sieciowego były przeprowadzane już od dawna. Poniżej przytoczone zostaną tylko te najbardziej znane.

W 1980 roku J. Shoch i J. Hupp [16] mierzyli rzeczywistą wydajność sieci Ethernet (120 połączonych ze sobą stacji roboczych). Pomiary obejmowały okres jednego dnia. W przypadku sieci Ethernet stosunkowo łatwe jest dokonywanie tzw. biernych pomiarów, tzn. wydzielona stacja robocza może obserwować ruch sieciowy za pomocą własnego interfejsu ustawionego w tryb odczytu i w ten sposób zbierać pakiety przechodzące przez sieć bez zakłócania ruchu w sieci. Z pomocą specjalnie stworzonego oprogramowania mierzono między innymi: obciążenie sieci, rozkład długości pakietów, rozkład czasów pomiędzy nadejściami pakietów, jak również wydajność sieci przy dużym obciążeniu.

W 1990 roku R. Gusella również przeprowadzał pomiary w sieci Ethernet [7]. Mierzył między innymi czasy nadejść kolejnych pakietów. Zaproponował użycie wskaźnika dyspersji IDC (omówionego w części 2) do scharakteryzowania natężenia ruchu pakietów, cechującego się „wybuchowością”.

Pomiary przeprowadzane w Bellcore różnią się od wcześniejszych badań ruchu w sieci Ethernet przede wszystkim dokładnością pomiaru. Badacze z Bellcore zbudowali specjalny sprzęt pomiarowy, który umożliwiał mierzenie czasu nadejścia pakietu z bardzo wysoką dokładnością – rzędu  $20 \mu\text{s}$ , przy bardzo małej liczbie traconych pakietów. Dla porównania R. Gusella osiągnął dokładność rzędu  $100 \mu\text{s}$ , co stanowi istotną różnicę, gdyż przy sieci Ethernet pracującej z przepustowością  $10 \text{ Mb/s}$  czas trwania pakietu zmienia się od  $51 \mu\text{s}$  do  $1.2 \text{ ms}$ . Należy również dodać, że pomiary w Bellcore obejmowały okres kilku lat, podczas gdy poprzednie badania nie więcej niż 1 dzień. Pomiary w Bellcore nie dotyczyły, jak poprzednio, ruchu w ogólności – dzięki adresom źródła i przeznaczenia filtrowano ruch, aby otrzymać tylko jeden typ pakietów, np. zewnętrzne w stosunku do Bellcore. Gdyby nie stosowano takiej filtracji, pliki z danymi stałyby się ogromne, co ograniczyłoby ich analizę. Można zadać pytanie dlaczego pomiary badaczy z Bellcore są wykorzystywane praktycznie do dnia dzisiejszego, skoro, jak pisano wcześniej,

miar czasu przyścia pakietu w sieci Ethernet nie jest dużym problemem. Pomimo że sam pomiar nie jest trudny, problemem jest późniejsza obróbka danych. Komputerem wykonującym pomiary może być stacja robocza lub specjalny sprzęt przeznaczony do tego zadania. Jeżeli taki komputer wykonuje inne zadania podczas pomiarów, to wszystkie pakiety przychodzące w tym czasie będą tracone. I to jest właśnie główna przyczyna niemożności dokonywania pomiarów bez strat. Można tutaj wyróżnić dwa podejścia: analiza „na bieżąco” (ang. on-the-fly) oraz analiza retrospektywna. W pierwszym przypadku przetwarzanie danych jest dokonywane w tym samym czasie co pomiar. W tym przypadku można zmniejszyć liczbę traconych pakietów jedynie przez wykorzystanie systemu wieloprocesorowego. Jeżeli komputer wykorzystywany do pomiarów posiada tylko jeden procesor, polecaną metodą jest analiza retrospektywna – dane zapisywane są na dysk i nie ma obliczeń podczas pomiarów. Wadą tej metody jest to, że w przypadku długiego czasu obliczeń pamięć musi być okresowo opróżniana (chowana na dysk). Powoduje to dużo strat, gdyż operacje dyskowe są wolne.

System monitorujący zbierający dane o pakietach w Laboratorium Bellcore został zaprojektowany w taki sposób, aby osoby analizujące ruch sieciowy nie musiały podejmować wcześniejszych decyzji dotyczących sposobu analizy ruchu. Należało jedynie podać, jaki fragment każdego pakietu ma być zapamiętywany, a system był w stanie kolekcjonować pakiety (do późniejszej analizy) nieprzerwanie przez bardzo długi okres czasu. Dokładniejszy opis badań ruchu w sieci Ethernet przeprowadzanych w Bellcore można znaleźć w [18]. W poniższej sekcji (patrz 3.1) przedstawiona zostanie analiza danych udostępnianych w Internecie przez badaczy z Bellcore, potwierdzająca samopodobny charakter ruchu pakietów w sieci Ethernet.

Od czasu opublikowania przez badaczy z Bellcore słynnego artykułu [18] opisującego samopodobny charakter natężenia ruchu pakietów w sieci Ethernet przeprowadzono wiele badań mających na celu wykrycie samopodobieństwa na innych poziomach modelu warstwowego sieci komputerowych. Udowodniono, że cechą samopodobieństwa wykazuje nie tylko ruch pakietów w sieci Ethernet, ale również ruch na poziomie warstwy aplikacji (np. ftp [12], telnet [12], WWW [4]). Dotyczy to również różnych struktur sieciowych – nie tylko LAN, ale np. WAN [5], [12]. Samopodobieństwo wykryto również podczas analizy przesyłu sekwencji ruchomych obrazów generowanych przez kodery obrazów ruchomych [6], [15]. W sekcji 3.2 przedstawiono analizę strumienia ramek zakodowanych w systemie MPEG-2 (na podstawie pomiarów dokonanych w Laboratorium Komputerowych Systemów Multimedialnych w IITiS PAN).

### 3.1. Analiza ruchu pakietów w sieci Ethernet (Laboratorium w Bellcore)

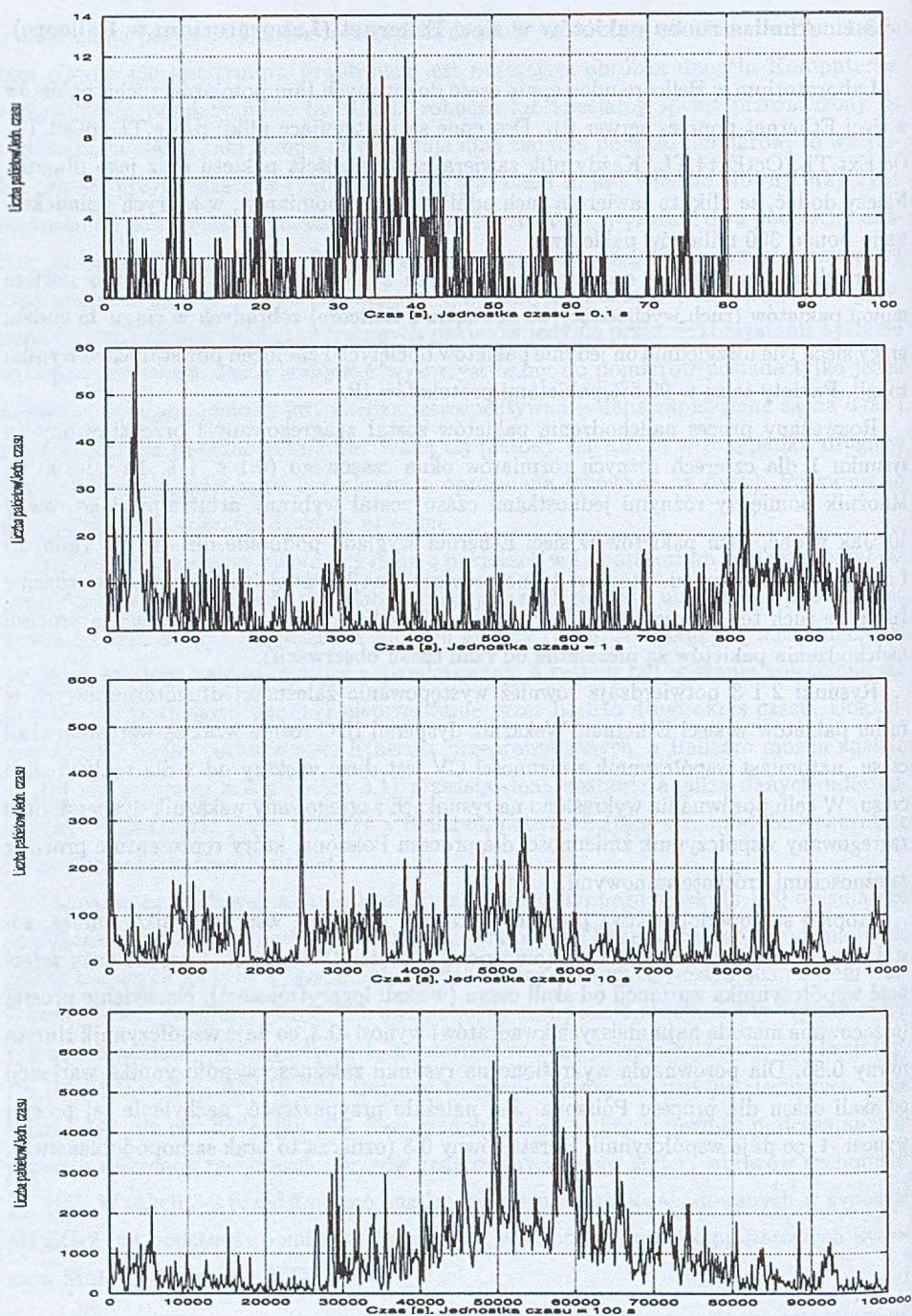
Laboratorium w Bellcore udostępnia część dokonanych tam pomiarów ruchu pakietów w sieci Ethernet poprzez serwer ftp. Dostępne są następujące pliki: pAug.TL, pOct.TL, OctExt.TL, OctExt4.TL. Każdy plik zawiera czas nadejścia pakietu oraz jego długość. Należy dodać, że pliki te zawierają ruch odfiltrowany z pomiarów, w których poindeksowano ponad 300 milionów pakietów.

Przedstawiona analiza oparta jest na danych z pliku OctExt.TL. Plik ten zawiera milion pakietów (ruch wychodzący na zewnątrz z Bellcore) zebranych w ciągu 35 godzin pracy sieci. Nie uwzględnia on jedynie pakietów obciążonych i zakłóceń powstałych w wyniku kolizji. Pakiety te są w 99.5% pakietami protokołów IP.

Rozważany proces nadchodzenia pakietów został zaagregowany i przedstawiony na rysunku 1 dla czterech różnych rozmiarów okna czasowego (0.1 s, 1 s, 10 s i 100 s). Mnożnik pomiędzy różnymi jednostkami czasu został wybrany arbitralnie jako równy 10. Jak widać, ruch pakietów w sieci Ethernet wygląda podobnie dla dużych (min, h) i małych (s) skal czasu. Stanowi to najprostsze i najbardziej intuicyjne potwierdzenie faktu, że ruch ten jest samopodobny w kilku skalach czasu (cechy statystyczne procesu nadchodzenia pakietów są niezależne od skali czasu obserwacji).

Rysunki 2 i 3 potwierdzają również występowanie zależności długoterminowych w ruchu pakietów w sieci Ethernet. Wskaźnik dyspersji IDC rośnie wraz ze wzrostem skali czasu, natomiast współczynnik zmienności CV jest dużo większy od 1 dla małych skali czasu. W celu porównania wykreślono na rysunkach zagregowany wskaźnik dyspersji oraz zagregowany współczynnik zmienności dla procesu Poissona, który reprezentuje proces z zależnościami krótkoterminowymi.

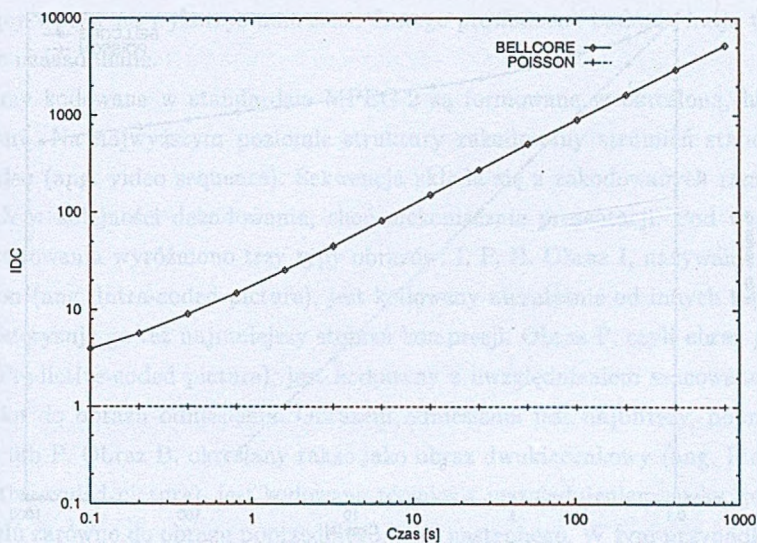
Stopień samopodobieństwa procesu, wyrażony wartością współczynnika Hursta, został wyznaczony metodą wariancji (omówioną w części 2). Rysunek 4 przedstawia zależność współczynnika wariancji od skali czasu (w skali logarytmicznej). Nachylenie prostej (oszacowane metodą najmniejszych kwadratów) wynosi -0.3, co daje współczynnik Hursta równy 0.85. Dla porównania wykreślono na rysunku zależność współczynnika wariancji od skali czasu dla procesu Poissona. Jak należało przypuszczać, nachylenie tej prostej wynosi -1, co daje współczynnik Hursta równy 0.5 (oznacza to brak samopodobieństwa).



Rys. 1. Liczba pakietów na jednostkę czasu dla 4 skali czasu (OctExt.TL)

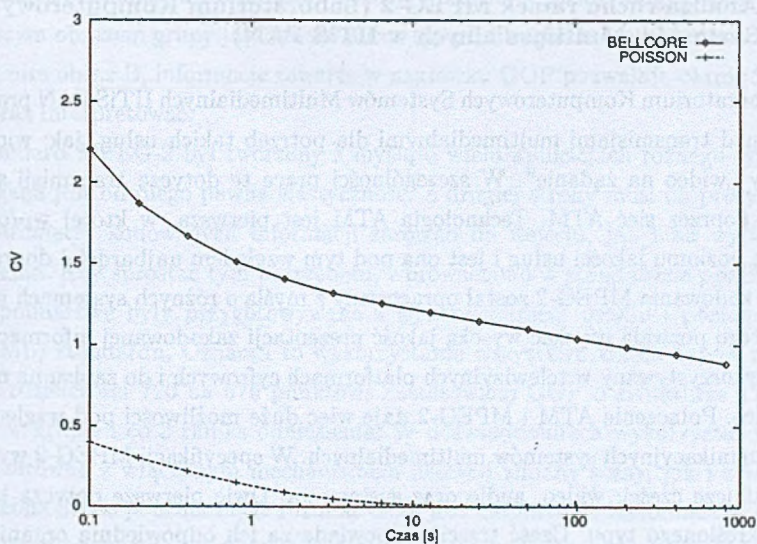
Fig. 1. Packets per time unit over 4 time scales (OctExt.TL)





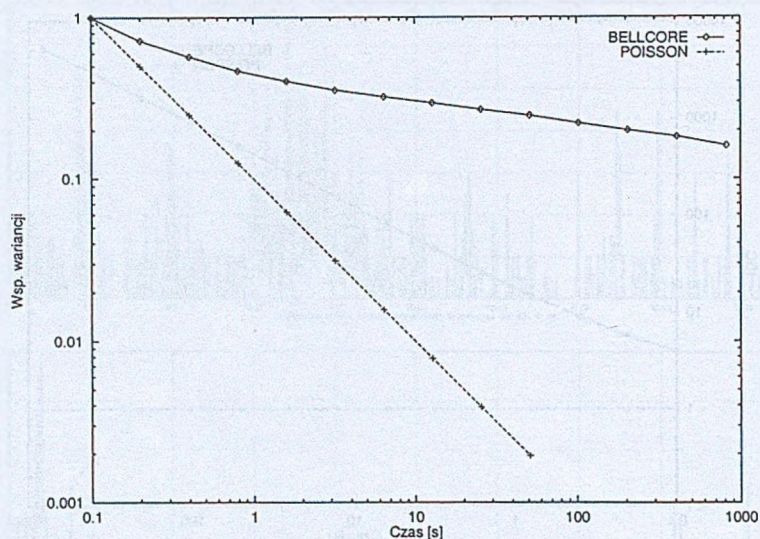
Rys. 2. Wskaźnik dyspersji(OctExt.TL)

Fig. 2. Index of dispersion (OctExt.TL)



Rys. 3. Współczynnik zmienności(OctExt.TL)

Fig. 3. Coefficient of variation (OctExt.TL)



Rys. 4. Zależność współczynnika wariancji od czasu – skala log-log (OctExt.TL)  
 Fig. 4. "Variance-time" plot – log-log scale (OctExt.TL)

### 3.2. Analiza ruchu ramek MPEG-2 (Laboratorium Komputerowych Systemów Multimedialnych w IITiS PAN)

W Laboratorium Komputerowych Systemów Multimedialnych IITiS PAN prowadzone są prace nad transmisjami multimedialnymi dla potrzeb takich usług, jak: wideokonferencje czy „video na żądanie”. W szczególności prace te dotyczą transmisji strumieni MPEG-2 poprzez sieć ATM. Technologia ATM jest pierwszą, w której wprowadzono gwarancję poziomu jakości usług i jest ona pod tym względem najbardziej dopracowana. Standard kodowania MPEG-2 został opracowany z myślą o różnych systemach telewizyjnych, dlatego pozwala uzyskać wysoką jakość prezentacji zakodowanej informacji. Obecnie jest wykorzystywany w telewizyjnych platformach cyfrowych i do zapisu na nośnikach DVD-Video. Połączenie ATM i MPEG-2 daje więc duże możliwości pod względem tworzenia komunikacyjnych systemów multimedialnych. W specyfikacji MPEG-2 wyróżniono trzy zasadnicze części: video, audio oraz systemową. Dwie pierwsze dotyczą kompresji danych określonego typu. Część trzecia odpowiada za ich odpowiednią organizację. W prowadzonych badaniach skoncentrowano się przede wszystkim na transmisji strumieni video z uwagi na ich duże, a zarazem zmienne w czasie natężenie. Taki charakter natężenia pozwala założyć, że w ich przypadku zmiana parametrów transmisji będzie miała

znaczący wpływ na wykorzystanie sieci, dlatego prowadzone badania mają także ekonomiczne uzasadnienie.

Filmy kodowane w standardzie MPEG-2 są formowane w określoną, hierarchiczną strukturę. Na najwyższym poziomie struktury zakodowany strumień stanowi sekwencję wideo (ang. video sequence). Sekwencja składa się z zakodowanych ramek, umieszczonych w kolejności dekodowania, choć niekoniecznie prezentacji. Pod względem metody kodowania wyróżniono trzy typy obrazów: I, P, B. Obraz I, nazywany także intra-obrazem (ang. Intra-coded picture), jest kodowany niezależnie od innych typów obrazu. Charakteryzuje go też najmniejszy stopień kompresji. Obraz P, czyli obraz predykcyjny (ang. Predictive-coded picture), jest kodowany z uwzględnieniem szacowanego ruchu w stosunku do obrazu odniesienia. Obrazem odniesienia jest najbliższy, poprzedni obraz typu I lub P. Obraz B, określane także jako obraz dwukierunkowy (ang. Bidirectionally predictive-coded picture), jest kodowany również z uwzględnieniem ruchu, jednak w odniesieniu zarówno do obrazu poprzedniego, jak i następnego. W tym przypadku obrazami odniesienia są najbliższe obrazy typu I lub P. Obrazy B osiągają zwykle największy stopień kompresji. Ze stosowania obrazów B wynika inna kolejność obrazów podczas ich dekodowania niż podczas ich prezentacji. Ponadto w celu usprawnienia swobodnego dostępu części sekwencji wprowadzono łączenie obrazów w grupy (ang. Group of Picture). Pierwszym obrazem grupy jest zawsze obraz typu I. Drugim może być obraz P lub B. Jeśli jest nim obraz B, informacje zawarte w nagłówku GOP pozwalają określić, jak należy ten obraz interpretować.

Standard MPEG-2 był tworzony z myślą o wielu aplikacjach różnego typu. Dlatego wymagana jest od niego pewna elastyczność. Z drugiej strony musi on precyzyjnie określać parametry kodowanych informacji zarówno na wejściu, jak i na wyjściu procesu kodowania. Aby sprostać tym potrzebom, wprowadzono w standardzie profile i poziomy. Dane pomiarowe były przygotowywane z wykorzystaniem profilu i poziomu głównego (MP@ML) standardu. Oznacza to wykorzystanie wszystkich trzech typów ramek (I, P, B) i rozdzielczości 720 na 576 punktów. Zastosowano GOP o strukturze 12:3, czyli 12 ramek w grupie i co 3 ramka odniesienia. W doświadczeniach wykorzystano strumienie wideo zarówno z włączonym mechanizmem detekcji zmiany sceny, jak i z wyłączonym. Wyłączona detekcja oznacza, że rozmiar GOP jest niezmienny. Natomiast włączenie tego mechanizmu powoduje, że podczas kodowania nowej sceny rozpoczynany jest nowy GOP.

W trakcie eksperymentów przesyłano strumienie wideo poprzez kanał zestawiony w ramach kategorii usługi CBR sieci ATM. Ponieważ materiał poddany kodowaniu pochodził z systemu telewizyjnego PAL, oznacza to, że w ciągu sekundy powinno być przesłanych

25 ramek obrazu. Z tego w prosty sposób wynika, że w celu zachowania jakości prezentacji (płynności odtwarzania filmu) kolejne obrazy powinny być wyświetlane co 40 milisekund. Ten odstęp został więc zachowany przy wysyłaniu kolejnych obrazów poprzez sieć do odbiorcy. Po stronie odbiorcy rejestrowane są czasy przybycia kolejnych ramek obrazu z dokładnością do  $10^{-6}$ s oraz ich rozmiary. W transmisjach zastosowano pakiety o stałym rozmiarze 376 bajtów, które były przesyłane z wykorzystaniem warstwy adaptacyjnej AAL5 sieci ATM.

Rozważany strumień ramek został dla potrzeb analizy pod kątem występowania cechy samopodobieństwa zaagregowany na poziomie GOP. Poniżej przedstawiono wyniki uzyskane dla dwóch strumieni ramek MPEG-2 o następujących parametrach:

- 1) kodowanie CBR, natężenie 4 Mb/s, włączona detekcja sceny (oznaczany umownie CBR),
- 2) kodowanie VBR, natężenie 4 Mb/s, wyłączona detekcja sceny (oznaczany umownie VBR).

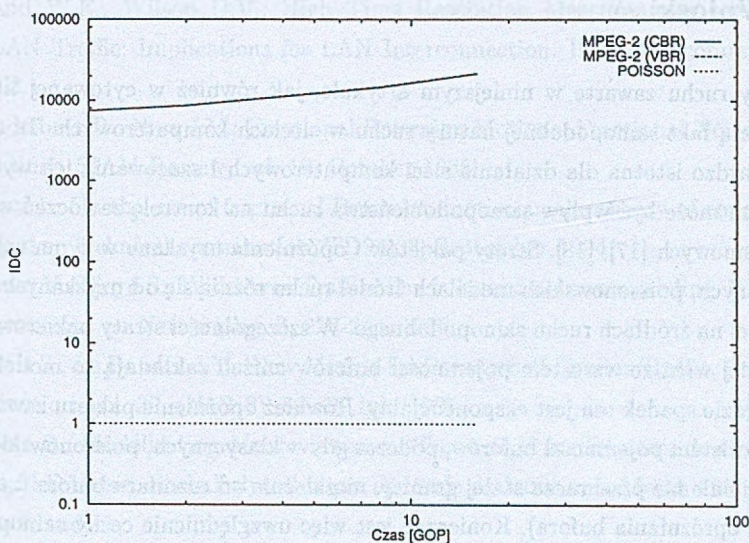
Rysunek 5 potwierdza występowanie zależności długoterminowych w strumieniu ramek MPEG-2 (niezależnie od sposobu kodowania oraz od wł./wyl. detekcji sceny). Zagregowany wskaźnik dyspersji IDC strumieni ramek rośnie wraz ze wzrostem skali czasu, natomiast wykreślony dla porównania zagregowany wskaźnik dyspersji dla procesu Poissona, który reprezentuje proces z zależnościami krótkoterminowymi, nie wykazuje wzrostu.

Stopień samopodobieństwa strumieni ramek, wyrażony wartością współczynnika Hursta, został wyznaczony metodą wariancji (omówioną w części 2). Rysunek 6 przedstawia zależność współczynnika wariancji od skali czasu (w skali logarytmicznej). Nachylenie prostych (oszacowane metodą najmniejszych kwadratów) wynosi odpowiednio:

- $-0.652$  dla strumienia CBR, co daje współczynnik Hursta równy  $0.674$ ,
- $-0.647$  dla strumienia VBR, co daje współczynnik Hursta równy  $0.676$ .

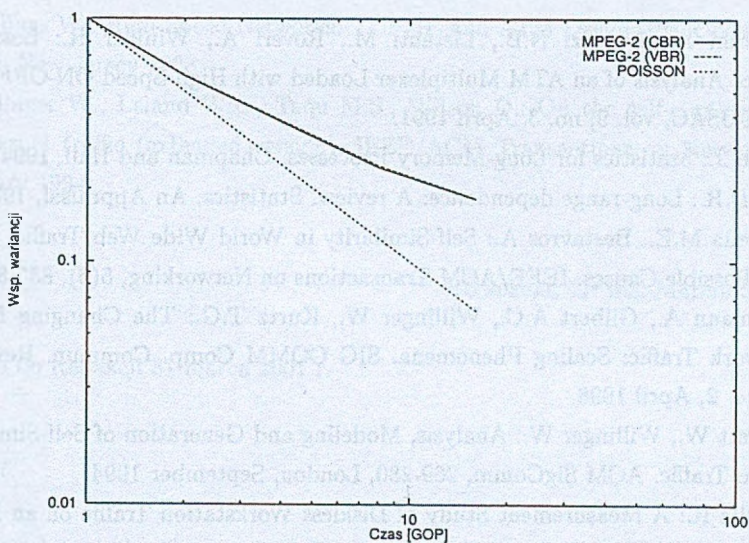
Dla porównania wykreślono na rysunku zależność współczynnika wariancji od skali czasu dla procesu Poissona.

Uzyskane wyniki stanowią potwierdzenie faktu, że strumień ramek (rozważany na poziomie GOP) zakodowanych w standardzie MPEG-2 jest samopodobny w kilku skalach czasu. Cecha ta jest niezależna od sposobu kodowania, jak i od włączania detekcji sceny (mogą one zmieniać wartość współczynnik Hursta, ale nie mają wpływu na sam fakt występowania samopodobieństwa).



Rys. 5. Wskaźnik dyspersji (MPEG-2)

Fig. 5. Index of dispersion (MPEG-2)



Rys. 6. Zależność współczynnika wariancji od czasu – skala log-log (MPEG-2)

Fig. 6. "Variance-time" plot – log-log scale (MPEG-2)/

## 4. Wnioski

Analizy ruchu zawarte w niniejszym artykule, jak również w cytowanej literaturze potwierdzają fakt samopodobnej natury ruchu w sieciach komputerowych. Ta cecha ruchu jest bardzo istotna dla działania sieci komputerowych i szacowania ich wydajności. Przykładem może być wpływ samopodobieństwa ruchu na kontrolę zatłoczeń w sieciach szerokopasmowych [17], [18]. Straty pakietów i opóźnienia uzyskane w symulacji opartej na klasycznych, poissonowskich modelach źródeł ruchu różnią się od uzyskanych w symulacji opartej na źródłach ruchu samopodobnego. W szczególności straty pakietów opadają dużo wolniej wraz ze wzrostem pojemności buforów aniżeli zakładają to modele poissonowskie, gdzie spadek ten jest eksponencjalny. Również opóźnienie pakietu zawsze rośnie wraz ze wzrostem pojemności buforów, podczas gdy w klasycznych, poissonowskich modelach opóźnienie nie przekracza stałej granicy, niezależnie od rozmiaru bufora (ze względu na sposób opróżniania bufora). Konieczne jest więc uwzględnienie cechy samopodobieństwa w modelach źródeł ruchu sieciowego [1], [8], [11], [13], [18].

## LITERATURA

1. Baiocchi A., Melazzi N.B., Listanti M., Roveri A., Winkler R.: Loss Performance Analysis of an ATM Multiplexer Loaded with High-Speed ON-OFF Sources. *IEEE-JSAC*, vol. 9, no. 3, April 1991.
2. Beran J.: *Statistics for Long-Memory Processes*. Chapman and Hall, 1994.
3. Cox D.R.: *Long-range dependence: A review*. *Statistics: An Appraisal*, 1984.
4. Crovella M.E., Bestavros A.: Self-Similarity in World Wide Web Traffic: Evidence and Possible Causes. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 5(6), 835-846, 1997.
5. Feldmann A., Gilbert A.C., Willinger W., Kurtz T.G.: The Changing Nature of Network Traffic: Scaling Phenomena. *SIG COMM Comp. Commun. Review*, vol. 28, no. 2, April 1998.
6. Garrett W., Willinger W.: Analysis, Modeling and Generation of Self-Similar VBR Video Traffic. *ACM SigComm*, 269-280, London, September 1994.
7. Gusella R.: A Measurement Study of Diskless Workstation Traffic on an Ethernet. *IEEE Transactions on Communications*, vol. 38, September 1990.
8. Jędrus S.: Modelowanie natężenia ruchu pakietów w sieciach komputerowych z wykorzystaniem miar multifrakalnych. Praca doktorska, IITiS PAN, Gliwice 1999.

9. Leland W.E., Wilson D.V.: High Time Resolution Measurements and Analysis of LAN Traffic: Implications for LAN Interconnection. IEEE Infocomm'91, paper 11D.3.1.
10. Mandelbrot B., Ness J.V.: Fractional Brownian Motions, Fractional Noises and Applications. SIAM Review, vol. 10, October 1968.
11. Norros I.: On the use of fractional Brownian motion in the theory of connectionless networks. Technical contribution, TD94-33, September 1994.
12. Paxson V., Floyd S.: Wide Area Traffic: The failure of poisson modeling. IEEE/ACM Transactions on Networking, 3, 226-244, 1995.
13. Robert S., Le Boudec J.Y.: New Models for Pseudo Self-Similar Traffic. Performance Evaluation, vol. 30, (No 1-2): 57-68, July 1997.
14. Robert S.: Modélisation Markovienne du Trafic dans les Réseaux de Communication. PhD thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, March 1996, No 1479, Switzerland.
15. Rose O.: Statistical properties of MPEG video traffic and their impact on traffic modelling in ATM systems. Universite of Wuerzburg, report No. 101, February 1995.
16. Shoch J., Hupp J.: Measured Performance of an Ethernet Local Network, Communications of the ACM, vol. 23, 711-721, December 1980.
17. Stallings W.: High-Speed Networks: TCP/IP and ATM Design Principles, Prentice Hall, New Jersey 1998.
18. Willinger W., Leland W.E., Taqu M.S., Wilson D.: On the self-similar nature of Ethernet traffic (extended version). IEEE/ACM Transactions on Networking, February 1994.

Recenzent: Dr inż. Marcin Skowronek

Wpłynęło do Redakcji 31 marca 2001 r.

## Abstract

Statistical analysis of network traffic performed during last years proves that it is different than it was earlier assumed. The traffic was usually described by short-terms dependencies. However, the analysis of measurements shows that the traffic has also

long-terms dependencies and has self-similar character. It is observed on various protocol layers and in different network structures. A term „self-similar process” means that the change of time scale does not influence the process. The original process and the scaled process are statistically the same. In the paper, we present an analysis of packet traffic from self-similarity point of view. We study an Ethernet traffic (using data from the Bellcore Laboratory) and MPEG-2 over ATM (using data from the Multimedia Computer Systems Laboratory in IITiS PAN). There are several methods used to check if a process is self-similar. The easiest one is named visual test (fig. 1). The other one is estimation of aggregated index of dispersion (fig. 2, fig. 5) or aggregated coefficient of variation (fig. 3). The one most frequently used is estimation of the Hurst parameter. This parameter belongs to the interval  $(0, 1)$ ; for non-self-similar processes is equal to  $0,5$ . The parameter can be estimated by various methods, among others by variation method (fig. 4, fig. 6). The traffic analyses, presented here and in the cited papers, inform us of the self-similar nature of traffic streams in computer networks. It is the very important feature for computer networks performance and their efficiency analysis.