Metode de măsurare a lărgimii de bandă disponibile, pentru conexiuni în rețele pe fir

***Ing. Vasile PETRICĂ*[1]**

Rezumat. *În rețelele de comunicații de date, lărgimea de bandă disponibilă a conexiunilor este importantă pentru transferul rapid al datelor, furnizarea serviciilor de bandă largă către utilizatori și funcționarea diferitelor aplicații. Lărgimea de bandă disponibilă împreună cu rata de pierdere a pachetelor pot crea o imagine asupra performanțelor conexiunii la un moment dat. Metodele de măsurare a lărgimii de bandă disponibile se bazează pe două modele: PRM (Probe Rate Model) și PGM (Probe Gap Model), care utilizează una dintre tehnicile: PPD (Packet Pair Dispersion), PTD (Packet Train Dispersion), VPS (Variable Packet Size) sau SLoPS (Self Loading Periodic Stream), sau o combinație între acestea. Articolul prezintă două metode de măsurare corespunzătoare celor două modele existente.*

Cuvinte cheie: *lărgime de bandă disponibilă, măsurare, rețele pe fir.*

Abstract. *In data communication networks, path available bandwidth is important for fast data transfer, providing broadband services to users and the operation of various applications. Available bandwidth and packet loss rate can create a picture of the path performance at a time. Available bandwidth test methods is based on two models: PRM (Probe Rate Model) and PGM (Probe Gap Model), using one of the techniques: PPD (Packet Pair Dispersion), PTD (Packet Train Dispersion), VPS (Variable Packet Size) or SLoPS (Self Loading Periodic Stream), or a combination thereof. The article presents two measurement methods corresponding to this two existing models.*

Keywords*: available bandwidth, measurement, wired networks.*

1. INTRODUCERE

Lărgimea de bandă disponibilă este o mărime dinamică ce indică cantitatea de date care poate fi transmisă pe o conexiune în condițiile de trafic existente la un moment dat. Cunoașterea valorii acestui parametru este esențială pentru controlul calității serviciilor QoS, rutarea traficului în rețea și identificarea segmentul conexiunii ce limitează viteza de trafic.

Lărgimea de bandă disponibilă împreună cu rata de pierdere a pachetelor pot crea o imagine asupra performanțelor conexiunilor. În Internet, deoarece resursele rețelei sunt accesate de multiple aplicații și utilizatori, este vital a se asigura diferite niveluri de calitate, deci diferite lărgimi de bandă disponibilă, pentru diferite aplicații. Contractul de furnizare a serviciului SLA (*Service Level Agreement*) dintre furnizor și client definește serviciul în termeni de lărgime de bandă disponibilă la utilizator.

În funcție de traficul existent în rețea unele segmente ale conexiunilor pot fi congestionate în

[1] Institutul Național de Studii şi Cercetări pentru Comunicații – I.N.S.C.C, Bucureşti.

timp ce altele pot fi slab încărcate, motiv pentru care trebuie în primul rând identificate segmentele congestionate și apoi estimate lărgimile de bandă disponibile. Pentru a crește performanțele rețelei, viteza pe segmentele identificate poate fi crescută corespunzător în perioadele de trafic mai intens.

Lărgimile de bandă importante pentru funcționarea unei conexiuni de date sunt: capacitatea conexiunii, capacitatea segmentelor de conexiune, lărgimea de bandă disponibilă a segmentelor de conexiune și lărgimea de bandă disponibilă a conexiunii.

În general o conexiune pentru transferul datelor este alcătuită dintr-o secvență de *n* segmente de conexiune, notate *L*1, *L*2, … *Ln*, ce fac legătura între sursă și destinație. În figura 1 sunt prezentate capacitatea conexiunii (*C*) și lărgimea de bandă disponibilă (*A*) pentru o conexiune formată din 3 segmente.

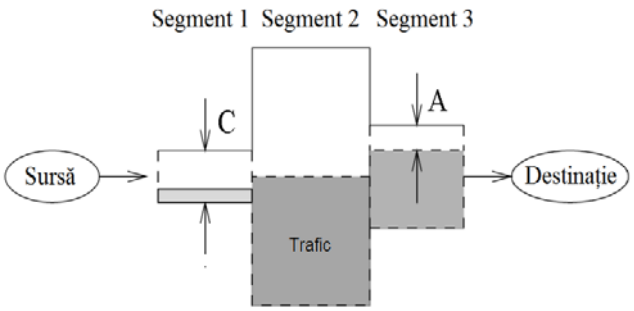

Fig. 1. Capacitatea conexiunii și lărgimea de bandă disponibilă.

Segmentul de conexiune reprezintă mediul de transmisie dintre două noduri, nodul putând fi un switch, un router sau o centrală, ce au capacitatea de comutare sau rutare.

Capacitatea unui segment de conexiune, notată *Ci*, este definită ca rata maximă de transfer a datelor, la nivel IP, de la un capăt la celălalt al segmentului de conexiune. Capacitatea conexiunii, notată *C*, este definită ca rata maximă de transfer a datelor, la nivel IP, de la un capăt la celălalt al conexiunii, adică de la sursa S la destinația D:

$$C = min\ Ci \qquad (1)$$

Două tipuri de segmente ale unei conexiuni sunt importante: segmentul cu cea mai mică capacitate din conexiune, denumit *segmentul îngust* și segmentul cu cea mai mică lărgimea de bandă disponibilă din conexiune, denumit *segment încărcat*.

Lărgimea de bandă disponibilă ABWi a unui segment de conexiune Li este dată de acea parte din capacitatea segmentului Ci care este neutilizată pe o anumită perioadă de timp T:

$$ABWi(t,T) = \frac{1}{T}\int_{t}^{t+T}\left(Ci - \lambda i(t)\right)\mathrm{d}t \qquad (2)$$

unde $\lambda_i(t)$ este traficul pe segmentul de conexiune.

Dacă considerăm că segmentul *Li* transmite un număr de *CiUi* biți într-un interval de timp *T*, atunci *Ui* este rata de utilizare a segmentului pe perioada *T*, unde $0 \le Ui \le 1$. Lărgimea de bandă disponibilă a segmentului de conexiune *Li*, este dată de relația:

$$ABWi = Ci\ (1 - Ui) \qquad (3)$$

Lărgimea de bandă disponibilă *ABW* a unei conexiuni, într-un interval de timp *T*, este dată de valoarea minimă a lărgimilor de bandă disponibilă a segmentelor *Li* ce compun conexiunea.

$$ABW = min\left\{C_i\left(1 - Ui\right)\right\} = min\ \{ABW_i\} \qquad (4)$$

2. TEHNICI ȘI MODELE DE MĂSURARE A LĂRGIMII DE BANDĂ DISPONIBILE A CONEXIUNILOR

În general soluțiile de bandă largă pot fi clasificate în două grupuri: tehnologii pe linii fixe sau tehnologii wireless. Soluțiile pe linii fixe se bazează pe o rețea fizică ce oferă conexiunea pe fir între

client și furnizorul de serviciu. Tehnologiile pe fir sunt:

- HFC (*Hybrid Fiber Coax*): Hibrid Fibră optică – Cablu coaxial;
- linii de abonat digitale (xDSL);
- linii de putere de bandă largă BPL (*Broadband Power Line*).

Tehnicile de măsurare a lărgimii de bandă pot fi împărțite în două clase: tehnici ce utilizează echipamente de test la ambele capete ale conexiunii, DE (*Double End-host*) și tehnici în care echipamentul de test este conectat la un singur capăt al conexiunii, SE (*Single End-host*). Tehnicile DE sunt în general mai precise decât cele SE.

Pe de altă parte tehnicile de măsurare a lărgimii de bandă sunt de două tipuri: pasive, prin măsurarea traficului existent în conexiune fără a perturba rețeaua și active, prin injectarea în conexiune a pachetelor suplimentare de test și măsurarea acestora.

În ultimul timp au fost dezvoltate și propuse noi metode de măsurare a lărgimii de bandă disponibile a conexiunilor fixe de date, bazate pe diferite tehnici active sau combinații ale acestora. Cele 4 tipuri de tehnici active utilizate sunt:

– tehnica pachetelor pereche **PPD** (*Packet Pair Dispersion*): în care sursa transmite multiple perechi de pachete către receptor iar acesta măsoară dispersia în timp a perechilor de pachete și calculează lărgimea de bandă disponibilă a conexiunii;

– tehnica trenului de pachete **PTD** (*Packet Train Dispersion*): în care sursa transmite un tren de pachete către receptor iar acesta măsoară dispersia în timp a trenului de pachete și calculează lărgimea de bandă disponibilă a conexiunii;

– tehnica pachetelor de mărimi variabile **VPS** (*Variable Packet Size*): în care sursa transmite multiple pachete de mărimi variabile. Se utilizează câmpul TTL (*Time To Live*) din antetul IP pentru a forța pachetele de date să expire la un anumit nod. Sursa utilizează mesajele de eroare ICMP (*Internet Control Message Protocol*) de la routere, pentru a măsura întârzierea până la acel router. Astfel se poate măsura lărgimea de bandă disponibilă a fiecărui segment de conexiune;

– tehnica încărcării conexiunii **SLoPS** (*Self Loading Periodic Stream*): în care sursa transmite o serie de trenuri de pachete de mărimi egale la o anumită rată. În funcție de tendința întârzierii șirului, sursa variază rata de transmisie până când aceasta se apropie foarte mult de lărgimea de bandă disponibilă a conexiunii. Dacă rata *R* este mai mare decât lărgimea de bandă disponibilă a conexiunii, șirul va crea o supraîncărcare de scurtă durată ce va conduce la o creștere a întârzierii pachetelor de test.

Există două modele pe baza cărora au fost dezvoltate metode de măsurare a lărgimii de bandă disponibile a unei conexiuni de date: modelul PRM (*Probe Rate Model*) și modelul PGM (*Probe Gap Model*).

Modelul PRM utilizează tehnicile SLoPS și PTD bazându-se pe observația că un tren de pachete de test emis la o rată mai mică decât lărgimea de bandă disponibilă va fi recepționat la aceeași rată (în medie). Când rata semnalului de test emis depășește lărgimea de bandă disponibilă, rata semnalului recepționat va fi mai mică decât rata semnalului emis și pachetele de test vor avea tendința să stea la cozile de așteptare, rezultând o tendință de creștere bruscă a întârzierii. Lărgimea de bandă disponibilă poate fi estimată prin observarea ratei de emitere la care apare această creștere bruscă a întârzierii.

Modelul PGM constă în determinarea relației dintre dispersia perechilor de pachete (tehnica PPD) sau a trenului de pachete (tehnica PTD) și rata

traficului de interferență la segmentul încărcat al conexiunii. Perechile de pachete se emit la un interval de timp g_I (*gap Initial*) și se măsoară la receptor intervalul de timp dintre pachete g_O (*gap Output*), valoarea intervalului g_O fiind o funcție de rata C_T a traficului și de capacitatea C a conexiunii, considerată cunoscută. Se calculează lărgimea de banda disponibilă (ABW) ca diferența dintre capacitatea conexiunii C și rata traficului C_T.

În continuare vor fi descrise 2 metode de măsurare a lărgimii de bandă disponibile a conexiunilor în rețele pe fir, corespunzătoare celor 2 modele.

3. METODA PATHLOAD

Metoda Pathload este o metodă activă ce utilizează modelul PRM (*Probe Rate Model*) și tehnicile SLoPS (*Self Loading Periodic Stream*) și VPS (*Variable Packet Size*) pentru măsurarea lărgimii de bandă disponibile a conexiunilor de date.

Sursa semnalelor de test emite seturi de câte 12 trenuri de pachete, fiecare tren fiind format din 100 pachete distanțate la intervale de timp de 0,1 ms, mărimea pachetelor fiind variată de la un tren la altul între 96 bytes și Smax. Rata de bit pe durata unui tren rămâne constantă.

Pentru fiecare tren receptorul măsoară întârzierile pachetelor $\{D_1, D_2, \ldots D_{100}\}$ și comandă schimbarea ratei de bit de la un tren de pachete la următorul, folosind un algoritm de căutare binară, până când rata de bit converge către lărgimea de bandă disponibilă. Algoritmul este iterativ și necesită cooperarea atât a sursei cât și a receptorului. Conexiunea TCP dintre cele două capete ale conexiunii este utilizată pentru controlul canalului, prin care se transferă mesaje referitoare la caracteristicile fiecărui tren, abandonarea măsurării sau sfârșitul procesului de măsurare.

Întârzierea pachetelor de test are o tendință de creștere când rata R a trenului de pachete atinge valoarea lărgimii de bandă disponibile (ABW).

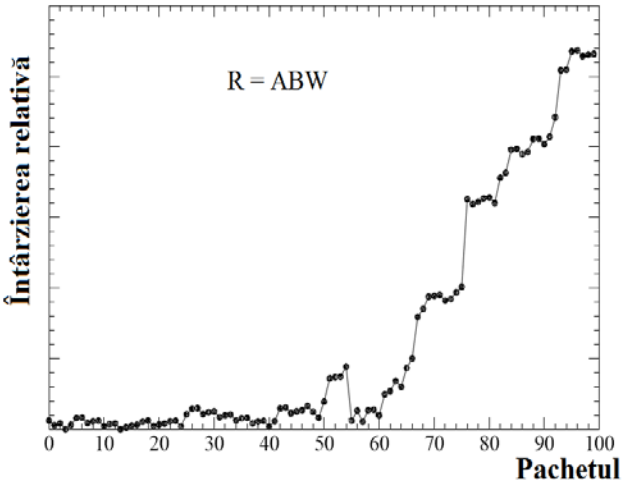

Fig. 2. Variația întârzierii pachetelor unui tren pentru $R = ABW$.

Un algoritm foarte important pentru metoda Pathload este cel utilizat pentru detecția ratei de transmisie R pentru care apare o creștere bruscă a întârzierii pachetelor la receptor. Ca un pas inițial, se împart întârzierile $\{D_1, D_2, \ldots D_N\}$ ale celor N pachete ale unui tren în $G = \sqrt{N}$ grupuri de câte G măsurări consecutive. Pentru fiecare grup i de G valori ale întârzierii se calculează media $\vec{D}_i$ a grupului și apoi se analizează setul de valori $\{\vec{D}_i, i = 1 \ldots G\}$ care este mult mai robust la erori.

Pathload utilizează testele PCT (*Pairwise Comparison Test*) și PDT (*Pairwise Difference Test*) pentru a verifica dacă șirul de rezultate prezintă o tendință de creștere rapidă.

Testul de comparare PCT utilizează relația:

$$PCT = \frac{\sum_{i=2}^{G} I\left(\overline{D_i} > \overline{D_{i-1}}\right)}{G-1} \qquad (5)$$

unde $I(X) = 1$ pentru $\vec{D}_i > \overrightarrow{D_{i-1}}$ și $I(X) = 0$ în rest.

PCT măsoară raportul dintre întârzierile consecutive, $0 \le PCT \le 1$. Dacă întârzierile sunt independente

valoarea așteptată pentru PCT este 0,5. Dacă apare un trend puternic de creștere a întârzierilor, *PCT* se apropie de valoarea 1. Testul *PCT* indică următoarele rezultate:

– apariția trendului de creștere, dacă $PCT > 0{,}66$;
– lipsa trendului de creștere, dacă $PCT < 0{,}54$;
– trend ambiguu, pentru alte valori.

Testul de comparare PDT utilizează relația:

$$PDT = \frac{\overline{D_G} - \overline{D_1}}{\sum_{i=2}^{G} \left| \overline{D_i} - \overline{D_{i-1}} \right|} \qquad (6)$$

PDT măsoară cât de puternică este variația întârzierii relativ la variația întârzierii pe durata trenului, $-1 \le PDT \le 1$. Dacă întârzierile sunt independente valoarea așteptată pentru PDT este 0. Dacă apare un trend puternic de creștere a întârzierilor, PDT se apropie de valoarea 1. Testul PDT indică următoarele rezultate:

– apariția trendului de creștere, dacă $PDT > 0{,}55$;
– lipsa trendului de creștere, dacă $PDT < 0{,}45$;
– trend ambiguu, pentru alte valori.

După recepția fiecărui tren de pachete de test, receptorul determină rata pierderii pachetelor, iar dacă aceasta are o valoare mai mare de 3 procente (> 3%) trenul este marcat ca pierdut. Dacă mai multe trenuri dintr-un set sunt marcate ca pierdute atunci receptorul va informa sursa că setul este abandonat. Dacă rata pierderii pachetelor pentru un tren are o valoare mai mare de 10 procente (> 10%) setul de trenuri este imediat abandonat.

Dacă unul dintre cele două teste indică „trend de creștere” în timp ce celălalt indică „trend de creștere” sau „trend ambiguu”, se consideră „trend de creștere” și trenul este considerat de Tip-I. Dacă unul dintre cele două teste indică „lipsa trendului de creștere” în timp ce celălalt indică „lipsa trendului de creștere” sau „trend ambiguu” se consideră că nu există trend de creștere și trenul este considerat de Tip-N. Dacă ambele teste indică „trend ambiguu” sau unul indică „trend de creștere” și celălalt „lipsa trendului de creștere”, rezultatele nu sunt luate în considerare.

Dacă cel puțin 70% dintre cele 12 trenuri de pachete sunt de Tip-I se consideră că rata de transmisie *R* este mai mare decât lărgimea de bandă disponibilă ABW ($R > ABW$). Similar, dacă cel puțin 70% dintre cele 12 trenuri de pachete sunt de Tip-N se consideră că rata de transmisie *R* este mai mică decât lărgimea de bandă disponibilă *ABW* ($R < ABW$).

Dacă numărul de trenuri de Tip-I este aproximativ egal cu numărul de trenuri de Tip-N se consideră că rata de transmisie *R* este aproximativ egală cu lărgimea de bandă disponibilă *ABW* ($R \cong ABW$). În acest caz, dacă din procedura de reglare a ratei de emisie a pachetelor rezultă că diferența între rata de emisie a următorului set de trenuri $R(s + 1)$ și rata de emisie a ultimului set de trenuri $R(s)$ este mai mică decât o valoare ω stabilită de utilizatorul sistemului de test ca rezoluție a măsurării, atunci procesul de măsurare se va încheia.

Deoarece Pathload se bazează pe un algoritm iterativ, este greu a se anticipa cât timp va dura o măsurare. De exemplu în cazul utilizării valorilor implicite ale parametrilor metodei, pentru o conexiune cu o lărgime de bandă disponibilă *ABW* = 100 Mbit/s și intervalele de pauză între trenuri Δ = 100ms, metoda Pathload realizează 15-18 iterații și are nevoie de mai puțin de 22 secunde pentru a produce o estimare finală. Pentru o conexiune cu o lărgime de bandă disponibilă *ABW* = 10 Mbit/s, metoda are nevoie de 10 seturi de câte 12 trenuri de pachete de test, durata unei estimări fiind de aproximativ 12 secunde.

Durata măsurării crește pe măsură ce mărimea absolută a lărgimii de bandă disponibilă ABW și/sau lățimea regiunii de incertitudine cresc, sau dacă valoarea ω este mică.

Pathload nu raportează o singură valoare estimată pentru lărgimea de bandă disponibilă ci un interval de valori determinat de cel puțin 10 valori estimate. Centrul acestui interval este lărgimea medie de bandă disponibilă în timpul măsurătorilor, iar intervalul estimează variația parametrului în timpul măsurărilor.

Metoda Pathload oprește măsurările atunci când lărgimea de bandă disponibilă este mai mică decât aproximativ 10% din capacitatea conexiunii, deoarece Pathload conține un mecanism de detecția a pachetelor pierdute care întrerupe măsurarea în momentul în care se pierd mai mult de 10% din numărul pachetelor. Se indică apoi utilizatorului sistemului de test faptul că legătura cu stația distantă a fost întreruptă.

4. METODA IGI (*INITIAL GAP INCREASING*)

Metoda IGI (*Initial Gap Increasing*) începe prin trimiterea pachetelor de test cu mărimea de 700 bytes decalate la intervale mici și egale de timp g_I (la sursă) și măsoară la receptor intervalele de timp dintre pachete g_O (*gap Output*), valorile obținute fiind mai mari decât g_I datorită traficului CT existent (figura 3).

Intervalul g_B este timpul de transmisie a pachetului de test măsurat la receptor. Valoarea intervalului g_O este o funcție de rata C_T a traficului CT și de capacitatea C a segmentului îngust al conexiunii.

Crescând valoarea intervalului de timp inițial g_I , de la o anumită valoare media valorilor g_O la ieșire începe să se apropie de valoarea g_I. Continuând creșterea intervalului de timp inițial g_I se constată că la un moment dat acesta devine aproximativ egal cu g_O la receptor și rămâne în această relație chiar dacă se crește în continuare valoarea g_I .

Cea mai mică (prima în procesul de măsurare) valoare g_I pentru care $g_I \cong g_O$ determină valoarea lărgimii de bandă disponibile a conexiunii la acel moment de timp, după cum se arată în exemplul din figura 4.

Acest punct de inflexiune este căutat de algoritmul metodei IGI, pentru care se rețin valorile g_I, g_O și g_B.

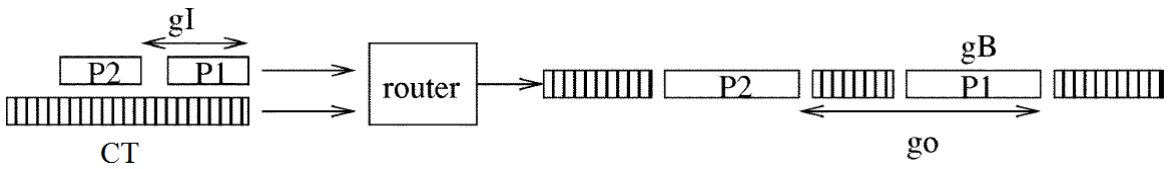

Fig. 3. Intercalarea traficului între pachetele de test.

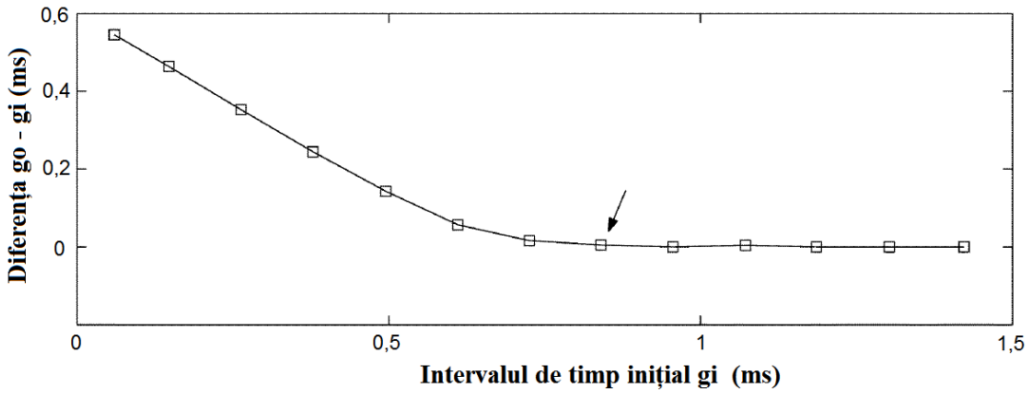

Fig. 4. Apariția punctului de inflexiune pentru care $g_I \cong g_O$.

Experimentele realizate cu trenuri alcătuite din 256 pachete și mărimea pachetelor de 750 B au arătat că intervalul de timp inițial g_I = 0,022 ms este valoarea maximă pentru măsurarea unor lărgimi de bandă disponibile în jurul valorii de 10 Mbit/s și g_I = 2 μs pentru măsurarea unor lărgimi de bandă disponibile în jurul valorii de 100 Mbit/s.

Lungimea trenurilor de pachete are un impact important asupra algoritmilor IGI deoarece influențează numărul de pachete transmise și durata testării. Ținând cont de aceste considerente, metoda IGI utilizează implicit trenuri cu lungimea optimă N = 60 pachete, ce este potrivită pentru Internet. Pentru această lungime a trenurilor, în cele mai multe cazuri sunt necesare mai puțin de F = 10 trenuri de pachete pentru convergența metodei și determinarea lărgimii de bandă disponibilă a conexiunii (*ABW*).

Valoarea lărgimii de bandă disponibile a conexiunii (*ABW*) se obține prin scăderea ratei traficului C_T din capacitatea C a conexiunii. Capacitatea conexiunii poate fi măsurată utilizând metodele Pathrate, Nettimer, Tailgating, Pathchar sau altele. De notat faptul că erorile de măsurare a capacității conexiunii afectează acuratețea de estimare a lărgimi de bandă disponibile.

Rata C_T a traficului de interferență este o funcție de valoarea intervalului de timp inițial g_I, de valoarea intervalului g_O , de timpul de transmisie a pachetului de test măsurat la receptor g_B,, și de capacitatea C a conexiunii.

$$C_T = \frac{(g_O - g_B)C}{g_I} \tag{7}$$

În final lărgimea de bandă disponibilă este estimată folosind formula:

$$ABW = C - C_T = \frac{S}{g_I} + C\left(1 - \frac{g_0}{g_I}\right) \tag{8}$$

unde S = 700 bytes este mărimea pachetelor. Se observă că pe lângă eroarea de măsurare a capacității conexiunii C, valoarea lărgimii de bandă disponibilă este influențată și de erorile de măsurare a intervalului de timp dintre pachete la receptor g_O și de generare a intervalului de timp inițial g_I .

Metoda IGI nu răspunde în mod corespunzător la variația traficului de interferență și în cele mai multe cazuri supraestimează lărgimea de bandă disponibilă. Erorile de măsurare a capacității conexiunii afectează acuratețea de estimare a lărgimi de bandă disponibile deoarece valoarea capacității este prezentă în relația de calcul a lărgimi de bandă disponibile.

Acronime

ABW	Available BandWidth
CT	Cross Traffic
DE	Double End-host
ICMP	Internet Control Message Protocol
IGI	Initial Gap Increasing
PCT	Pairwise Comparison Test
PDT	Pairwise Difference Test
PGM	Probe Gap Model
PPD	Packet Pair Dispersion
PRM	Probe Rate Model
PTD	Packet Train Dispersion
QoS	Quality of Service
SE	Single End-host
SLoPS	Self-Loading Periodic Stream
TCP	Transmission Control Protocol
VPS	Variable Packet Size

Bibliografie

[1] **Ahmed Ait Ali, Fabien Michaut** și **Francis Lepage:** *End-to-End Available Bandwidth Measurement Tools: A Comparative Evaluation of Performances*. CRAN, UMR-CNRS 7039, 2006

[2] **Ashok Singh Sairam** și **Gautam Barua:** *Survey of Bandwidth Estimation Techniques*. 2010.

[3] **Jacob Strauss, Dina Katabi** și **Frans Kaashoek:** *A Measurement Study of Available Bandwidth Estimation Tools*. Mit Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory, IMC 03, 27-29 Oct. 2003, Miami Beach, Florida, USA.

[4] ETSI TS 101 909 (2006): *Digital Broadband Cable Access to the Public Telecommunications Network; IP Multimedia Time Critical Services.*

[5] ITU-T Rec. G.1030 (2005): *Estimating end-to-end performance in IP networks for data applications.*

[6] ITU-T Rec. Y.1541 (2006): *Network performance objectives for IP-based services.*

[7] **Manish Jain** și **C. Dovrolis:** *End-to-End Available Bandwidth: Measurement, Methodology, Dynamics, and Relations with TCP Throughput.* SIGCOMM 02, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 2002.

[8] **Manish Jain** și **C. Dovrolis:** *Pathload: a measurement tool for end-to-end available bandwidth.* University CISUD, USA, 2002.

[9] **Ningning Hu** și **Peter Steenkiste:** *Evaluation and Characterization of Available Bandwidth Probing Techniques.* IEEE Journal, Vol. 21, NO. 6, 2003.

[10] **T.G. Sultanov** și **A.M. Sukhov:** *Simulation technique for available bandwidth estimation.* arXIV: 1007.3341v1 [cs.NI] 20 Jul 2010.