

## JEDAN VEK TEORIJE TELEKOMUNIKACIONOG SAOBRAĆAJA

Miodrag Bakmaz, Bojan Bakmaz  
Saobraćajni fakultet u Beogradu

**Sadržaj:** *U ovom radu su navedeni neki bazični rezultati Teorije telekomunikacionog saobraćaja, discipline koja se intenzivno razvijala proteklih sto godina, prateći razvoj telekomunikacionih mreža. Više od pola veka proteklo je u podršci mrežama sa komutacijom kanala, pri čemu su mnogi eksplicitno rešeni modeli omogućili razvoj i danas respektivnih metoda saobraćajnog inženjeringa. Razvoj računarskih mreža doveo je problem saobraćaja na paketski nivo i do intenzivnog interesovanja za modele sa čekanjem. Analizom saobraćaja lokalnih mreža, kao i Internet saobraćaja, uočena je zavisnost u širem opsegu, odnosno svojstvo "sebi-sličnosti". Aktuelni modeli bežičnih mreža, koji kvantifikuju kvalitet servisa u vazdušnom interfejsu, odražavaju interakciju mobilnosti, saobraćajnih karakteristika i bežičnog medijuma.*

**Ključne reči:** *Internet saobraćaj, mobilnost, vazdušni interfejs, Erlang*

### 1. Uvod

Teorija telekomunikacionog saobraćaja (telegrafika), kao savremena naučna disciplina, u kontinuitetu je, od početka prošlog veka, gradila fundamentalnu podlogu, na kojoj su se, vodeći računa o prirodi saobraćaja, prihvatljivim i praktičnim optimizacionim modelima, rezultatima merenja i simulacije, formirale metodologije saobraćajnog inženjeringa za potrebe predikcije i planiranja telekomunikacionih resursa, kao i obezbeđivanja pouzdanih servisa po prihvatljivoj ceni. Za začetnika discipline smatra se danski istraživač A. K. Erlang, koji je publikovao svoj prvi rad sa primenom teorije verovatnoće u rešavanju problema telefonskog saobraćaja 1909. godine, dokazujući puasonovsku prirodu raspodele telefonskih poziva i saobraćaja [1]. Tih godina bilo je nekoliko pokušaja da se poznatim matematičkim aparatom ozakoni ponašanje korisnika telefonske mreže [2]. Tek 1917. godine objavljen je najznačajniji Erlangov rad iz oblasti Teorije telefonskog saobraćaja u kojem su izvedene Prva Erlangova formula (Prva EF, Formula gubitaka, B formula, EBF) i Druga EF (Formula čekanja, C formula, ECF). Značajna je i Treća EF (Interkoneksiona formula, D formula, EDF), objavljena 1920. godine, dok je rad publikovan 1922. godine.

U periodu do Drugog svetskog rata objavljeno je više značajnijih radova iz ove oblasti, čiji su autori i danas prepoznatljiva imena a iz njihovog broja i opusa nije se moglo naslutiti sve ono što se dešavalo u drugoj polovini veka. Pedesetih godina nastupila je modernizacija telekomunikacionih mreža, za čije je projektovanje i optimizaciju razvijeno veliki broj modela i metoda, u čijoj je osnovi korišćenje alternativnih puteva i fenomen prelivnog saobraćaja [3, 6, 7, 9]. Veći broj udžbeničke literature posvetio se sveobuhvatnom sagledavanju ostvarenih teorijskih rezultata [4, 5]. Princip mreža sa komutacijom kanala prenet je i na mobilne sisteme, do GSM, a kulminirao je rešenjima za adaptivno dinamičko rutiranje [12].

Sedamdesete godine prošlog veka karakteriše tehnološki zaokret ka računarskim mrežama i principu paketske komutacije. Matematičku podršku obezbeđuje teorija redova čekanja, a razvija se i teorija mreža sa čekanjem [8]. Ovaj period je takođe pod dominacijom Erlangovog principa statističke ravnoteže, odnosno markovskih procesa. Knjige i kursevi sa ovom tematikom i danas su standardni na specijalizovanim studijama [18]. Metode saobraćajnog inženjeringa za potrebe razvoja savremenih mreža (ATM, BISDN, Internet, UMTS, bežične, 4G) su vrlo kompleksne, koriste osim Teorije modela sa čekanjem i mnoge druge matematičke discipline (Simulaciju, Operaciona istraživanja, Teoriju grafova), a osnovno merilo saobraćajne efikasnosti, za razliku od klasičnog GoS (*Grade of Service*), postaje QoS (*Quality of Service*). Paketski i IP saobraćaj poseduju izraženo svojstvo "sebi-sličnosti" (*self-similarity*), odnosno zahteva modeliranje pomoću raspodela "dugog repa" (*long tailed*) autoregresivnih metoda, frakcionalnih procesa [10, 14, 15]. Aktuelni modeli bežičnih mreža četvrte generacije kvantifikuju kvalitet servisa u vazdušnom interfejsu i odražavaju interakciju mobilnosti, saobraćajnih karakteristika i bežičnog medijuma.



Slika 1. Nojeva barka (Edward Hicks' "Noah's Ark")

## 2. Značaj Erlangovih teorijskih radova i formula gubitaka

Kada konstatujemo da moderna teorija saobraćaja počine radovima Danca A. K. Erlanga (1878 – 1929), nužno je da spomenemo naučnike čiji rezultati datiraju od ranije, a našli su primenu kao saobraćajni modeli sve do današnjih dana. To su svakako Francuzi S. D. Poisson (1781 – 1840) i B Pascal (1623 – 1662), kao i Švajcarac J. Bernoulli (1654 – 1705). Situacije sa redovima čekanja konstatuju se i ranije, možemo reći da dosežu do biblijskih vremena (slika 1).

Teorijski radovi Erlanga otvorili su prostor za veliki broj aplikacija. Polazeći od osnovne EBF, razvijena su i široko korišćena sledeća rešenja:

- Opšta EF, koja tretira neordinarne dolazne tokove,
- Proširena EF, koja dopušta da deo neopsluženih zahteva bude ponovljen,
- Generalna EF, koja rešava problem gubitaka obnovljivih tokova (GI, *general independent, renewal*),
- Integralna EF, validna i za necelobrojne snopove,
- Palm-Jakobeusova formula (PJ), koja je u direktnoj relaciji sa EBF, a izražava verovatnoću zauzeća fiksnih kanala i gubitke u snopovima sa sekvencijalnim biranjem (gubitke prelivnog saobraćaja).
- Modifikovana PJ formula (MPJ), za slučaj nepotpuno dostupnog snopa,
- Frederiks-Hejvordova formula, pogodna za određivanje gubitaka u slučaju nepuasonovog saobraćaja, itd.

Neposredno po objavljivanju Erlangovog rada sa EBF, objavljen je i Engsetov rezultat istraživanja sistema sa konačnim brojem izvora saobraćaja, koji je takođe u Teoriji saobraćaja zauzeo zapaženo mesto. Moguće je EBF staviti u relaciju prema modelima sa konačnim brojem izvora saobraćaja, pomoću vršnog faktora, koji se definiše kao odnos varijanse i srednje vrednosti verovatnoća stanja,  $z = v/m$ . Ponuđeni saobraćaj, njegova varijansa, a samim tim i vršni faktor, razmatraju se na dovoljno velikom snopu, tako da svi ponuđeni zahtevi budu opsluženi. U Erlangovom slučaju to je snop sa beskonačnim brojem kanala, proces nailazaka je Puasonov, koji formira Čist slučajni saobraćaj tipa I (*Pure Chance Traffic Type One, PCT-I*), sa intenzitetom  $m = y = \lambda/\mu$  i  $z = 1$ .

Engsetov slučaj (Skracena binomijalna raspodela) je sistem sa ograničenim brojem izvora  $q$ . Individualni izvori imaju konstantan i jednak parametar dolaznog toka  $\alpha$ , kada su slobodni. Kada je  $i$  izvora zauzeto, ukupan dolazni proces je zavisn od stanja sistema, dolazni parametar je  $\lambda_i = (q - i)\alpha$ . Ovaj tip saobraćaja naziva se Čist slučajni saobraćaj tipa II (*Pure Chance Traffic type Two, PCT-II*). Ponuđeni saobraćaj je  $y = qa/(\mu + \alpha) = qa$ , varijansa  $v = qa(1 + a)$ . Vršni faktor je manji od jedinice,  $z = 1 - a = \mu/(\mu + \alpha) < 1$ . Skracena Paskalova (Negativna Binomijalna) raspodela takođe ima ograničen broj izvora  $q$ . Međutim, ako je u datom trenutku zauzeto  $i$  izvora, dolazni parametar je  $\lambda_i = (q + i)\alpha$ , a vršni faktor,  $z = \mu/(\mu - \alpha) > 1$ .

Puasonov proces se može dobiti iz beskonačnog broja izvora, uz ograničen ukupni dolazni parametar  $\lambda$ , a Erlangov slučaj može se razmatrati kao specijalan slučaj druga dva slučaja. Tri saobraćajna tipa, EPP (Engset – Puason – Paskal), uključuju sve vrednosti vršnog faktora,  $z > 0$  i mogu se koristiti za modeliranje saobraćaja sa dva

parametra: srednjom vrednošću  $y$  i vršnim faktorom  $z$ . Osnovi parametri za sisteme sa gubicima,  $b_t$ ,  $b_c$ ,  $b_y$ , kako je rečeno, jednaki su za Erlangov model, za Engsetov model važi  $b_t > b_c > b_y$ , dok je za slučaj Skraćene Paskalove raspodele  $b_t < b_c < b_y$ .

Za slučaj ograničenog broja izvora, PASTA osobina se zamenjuje Generalnom teoremom nailazaka, po kojoj je verovatnoća stanja sistema posmatranog od strane korisnika (prosek zahteva, *call average*) jednaka verovatnoći stanja sistema bez tog korisnika (prosek po vremenu, *time average*), što se odražava na to da je  $b_c(q) = b_t(q-1)$ . Engsetova formula se numerički proračunava pomoću rekurzivne formule za stanja sistema, ili preko broja kanala u sistemu, izvedeno na sličan način kao za EBF. Skraćena Paskalova raspodela formalno se dobija iz Engsetove raspodele odgovarajućom izmenom:  $q$  se zamenjuje sa  $-q$ , a  $\alpha$  se zamenjuje sa  $-\alpha$  [18].

Treća Erlangova formula proistekla je iz razmatranja snopa sa ograničenom dostupnošću, pri čemu je za kombinatorno homogeno povezivanje (*ideal grading*) bilo moguće posmatrati sistem preko makrostanja i definisati za neko stanje verovatnoću nailaska poziva iz grupa sa zauzetim kanalima, odnosno verovatnoću gubitaka. Značaj klasičnih nepotpuno dostupnih snopova se gubi sa uvođenjem digitalne komutacije, a sam princip može se prepoznati čak i kod savremenih ćelijskih sistema, gde se frekvencije, kao resursi, koriste po određenim pravilima. EDF, za razliku od empirijskih formula (O'Dell, MPJ), ima stabilnu teorijsku pozadinu, a moguća je i primena Frederiks-Hejvordovog (Fredericks – Hayward) principa za nepuasonov saobraćaj.

Nužno je navesti da postoji eksplicitno rešenje za gubitak u sistemu sa obnovljivim tokom (GI/M/s/s) [9]. Naglasimo da ovaj model razlikuje gubitak zahteva i gubitak po vremenu. Generalizacija klasične teorije telekomunikacionog saobraćaja vršena je pri razvoju sistema sa integrisanim servisima (ISDN i B-ISDN). Klasična višedimenzionalna EBF je primer reverzibilnog Markovog procesa, korišćenog za ove potrebe. Rezultati koje je pružala nisu zadovoljavali slučajeve raznorodnih tokova. Kaufman (i nezavisno Roberts) predložili su mnogo precizniji model, koji omogućuje proračun gubitaka za veliki broj klasa tokova. Razvijeni su konvolucionni, kao i generalizovani algoritmi za sisteme sa gubicima.

### 3. Značaj druge Erlangove formule i sistema sa čekanjem

Druga EF izražava gubitke po vremenu u sistemu sa beskonačnim redom i sa eksponencijalnom raspodelom vremena između nailazaka, kao i vremena opsluge (trajanje zahteva). Ovaj pristup je fundamentalan za dalji razvoj modela sistema sa čekanjem, jer se tehnološki razvoj telekomunikacionih i mreža za prenos podataka, od principa komutacije kanala (kola), usmerio ka paketskoj komutaciji, a do izražaja su došli problemi vezani za strategije i discipline čekanja. Razvoj raznih vidova saobraćaja (železnički, drumski, avio, vodni, poštanski), proizvodnje, upravljanja skladištima, uslužnih delatnosti i sl., zahtevao je odgovarajuću matematičku podršku, pri čemu su značajnu ulogu imali modeli sa čekanjem. Naziv Erlang-A formula vezuje se za Palmov osnovni model čekanja sa napuštanjem reda (nestrpljivi korisnici).

Za sisteme sa čekanjem moguće je definisati veći broj parametara, poput srednjeg broja zahteva u redu i sistemu, srednjeg vremena čekanja, ili boravka u sistemu,

srednje vreme u redu za one koji čekaju, raspodela vremena čekanja, verovatnoća čekanja veća od vremena  $t$  i slično.

Erlangov model sa čekanjem je toliko fleksibilan, da se od njega mogu razviti na desetine modela, posebno na bazi selekcije korisnika iz reda za čekanje u skladu sa odgovarajućim principima. Klasične discipline čekanja su:

- FCFS (*First Come - First Served*), takođe nazvan uređeni red, koji se često preferira u realnom životu, kada su korisnici ljudi sa takvim navikama. Ovaj slučaj se takođe označava kao FIFO (*First In - First Out*), što se odnosi samo na red, a ne i na ukupan sistem, pošto, ako ima više od jednog kanala, korisnik sa kratkim vremenom opsluge može preći korisnika sistema koji je pre njega došao u red.
- LCFS (*Last Come - First Served*) odgovara principu štokovanja (skladištenja). Ova disciplina se takođe označava kao LIFO (*Last In - First Out*).
- SIRO (*Service In Random Order*), kada korisnici iz reda imaju istu verovatnoću da budu izabrani za opslugu. Druga skraćenica je RS (*Random Selection*).

Prve dve discipline uzimaju u razmatranje vreme nailaska, dok treća to ne razmatra i ne zahteva neku memoriju. Kao takva, može se koristiti kod prostijih tehničkih sistema. Za sve ove discipline ukupno vreme čekanja za korisnike je isto. Discipline čekanja određuju kako je vreme čekanja raspodeljeno po individualnim korisnicima.

U programski kontrolisanim sistemima sa čekanjem moguće su mnogo komplikovanije discipline čekanja. Za računarske sisteme od interesa je redukovanje ukupnog vremena čekanja korišćenjem vremena opsluge kao kriterijuma: SJF (*Shortest Job First*), SJN (*Shortest Job Next*), SPF (*Shortest Processing time First*) su discipline koje podrazumevaju da znamo vreme opsluge unapred, što minimizira ukupno vreme čekanja za sve korisnike.

Prethodne discipline uzimaju u obzir ili vreme nailazaka, ili vreme opsluge. Kompromis između tih disciplina su sledeće discipline:

- RR (*Round Robin*), gde se korisnik opslužuje najduže za fiksirano vreme opsluge (vremenski interval ili slot). Ako opsluga nije kompletirana u toku tog intervala, korisnik se vraća u red, koji je tipa FCFS.
- PS (*Processor Sharing*), kada svi korisnici dele servisni kapacitet podjednako.
- FB (Foreground – Background) disciplina, koja pokušava da implementira SJF bez saznanja o vremenu opsluge unapred. Server nudi opslugu korisniku koji je dobio najmanji iznos servisa. Kada svi korisnici dobiju isti iznos servisa, FB postaje identičan sa PS.

Navedene discipline su dinamičke discipline čekanja, koje zavise od vremena provedenog u redu. U stvarnosti, korisnici se često dele u prioritete klase, pa razlikujemo dva tipa prioriteta: nepreventivan (HOL, *Head-Of-the-Line*) i preventivan. Menjanjem discipline čekanja (pravila po kome se za opslugu bira sledeći korisnik), često se može redukovati nagomilavanje.

U literaturi redova čekanja srećemo se sa mnogim strategijama i simbolima. Simbol GD označava proizvoljnu disciplinu čekanja (*general discipline*). Ponašanje korisnika (*Balking* – korisnici odlučuju da ne uđu u red čekanja ako je predugačak, *Reneging* – korisnici napuštaju red ako treba da čekaju predugo na opslugu, *Jockeying* – korisnici prelaze iz reda u drugi red kad zaključe da će brže stići na opslugu) takođe je subjekat za modeliranje. Modeli sa konačnim redom su kompleksniji.

Mada se Erlang značajno posvetio pronalaženju adekvatnog rešenja za model sa konstantnim vremenom usluge, to je elegantnije uspeo Kromelinu, tako da su njegove formule i dijagrami u dugom periodu korišćeni za projektovanje upravljačkih uređaja i za druge potrebe, gde je od značaja bilo to da se, pri konstantnom vremenu usluge, mogu postići povoljniji drugi parametri.

Postoji veliki broj raznih modela sa čekanjem i složenijim raspodelama toka i vremena usluge. Obično se razmatraju jednokanalni sistemi. Rešavanje sistema sa generalnom raspodelom vremena usluge, M/G/1, je mnogo kompleksnije, tako da se najčešće zadovoljavamo rezultatima koje podržava Litlova (Little) teorema i formula Polaček – Hinčina (Pollaczek-Khintchine). Slučaj generalno nezavisne raspodele dolaznog toka, GI/G/1, je od stalnog teorijskog interesa i postoji veći broj pristupa rešavanju. Osnovni parametar je koeficijent iskorišćenja, jednak saobraćaju po kanalu, odnosno prosečnom delu vremena zauzeća kanala,  $\rho = \eta = y/s = \lambda/\mu$ . Važni parametri su: srednje vreme čekanja (W), srednje vreme boravka u sistemu ( $T = 1/\mu + W$ ), srednji broj zahteva u sistemu ( $N = \lambda T$  – formula Litla), srednja dužina reda ( $L = \lambda W$ ).

Pri rešavanju opštijih sistema usluge stanje se karakteriše verovatnoćom postojanja  $i$  zahteva za stacionarno režim,  $p_i$ , odnosno delom vremena kada je u sistemu  $i$  zahteva. Može se posmatrati i verovatnoća  $r_i$ , da će zahtev pri nailasku zateći  $i$  zahteva u sistemu, kao i verovatnoća  $q_i$ , da će zahtev, po opsluzi, ostaviti u sistemu  $i$  zahteva. Za Puasonov tok ove tri verovatnoće su jednake.

U sistemima prenosa podataka govori se o transmisionim potrebama. Zadatak je da se prenese  $k$  informacionih jedinica (bita ili bajta). Kapacitet sistema  $s$  predstavlja brzinu signala podataka (bit/s). Vreme usluge takvog zadatka je  $k/s$ . Ako je parametar nailaska zahteva  $\lambda$ , iskorišćenje sistema je  $\rho = \lambda k/s$ , sa vrednošću koja ne prevazilazi jedinicu.

#### 4. Pioniri na polju Teorije telekomunikacionog saobraćaja

Od Erlanga se spisak istraživača, koji su se dokazali na polju Teorije telekomunikacionog saobraćaja (*Teletraffic theory*) i Teorije modela sa čekanjem (*Queueing theory*, Teorija masovnog opsluživanja), izuzetno uvećao i kroz razne oblasti proširio. Zato navedimo imena samo nekoliko pionira, koji su se pojavili sa svojim izuzetnim teorijskim radovima, u narednih petnaestak godina posle objavljivanja Erlangovog fundamentalnog rada. To su, sa izvorno pisanim prezimenima i godinom značajnog rada iz ove oblasti, već pomenuti T. O. Engset (Norvežanin, 1865 – 1943, prvi rad 1918) i C.D. Crommelin (Francuz, prvi rad 1932), zatim G. F. O'Dell (1920), T. C. Fry (1928), E. C. Molina (1927), F. Pollaczek (1892 – 1981, prvi rad 1930), C. Palm (Šveđanin, 1907 – 1951, prvi rad 1936), A. Kolmogorov (Rus, 1903 - 1987, prvi rad 1931), A. Khinchin (Rus, 1894 - 1959, prvi rad 1932), itd. Godine 1953. D. G. Kendall (Englez, 1918 - 2007) uveo je A/B/C tip oznake za modele sa čekanjem, kao i pojam *queueing*. Drugu polovinu dvadesetog veka karakteriše izuzetno bogat opus teorijskih radova, koji su pratili dalji razvoj mreža sa komutacijom kanala i paketa, širokopojasnih mreža, ali i razvoj kompleksnih modela za potrebe drugih vidova saobraćaja, koji su se vrlo često osvrtni ili oslanjali na Erlangove formule.

## 5. Saobraćajni modeli savremenih mreža

Saobraćajni modeli savremenih mreža mogu se razmatrati kroz dve klase opsega zavisnosti: kratku i dugu (*Short (Long) Range Dependence*, SRD, LRD). U modele zavisnosti u kratkom opsegu spadaju Markovi procesi, konvencionalne raspodele, Pareto raspodela i regresioni modeli, a karakterišu se korelacionom strukturom koja je značajna za relativno malo realizacija. Saobraćajni modeli zavisnosti u dužem opsegu imaju značajnu korelaciju za više realizacija, a najpoznatiji su modeli iz familije ARIMA (FARIMA, GARMA), frakcionalni Gausov šum (FGN), frakcionalno Braunovo kretanje (FBM), diskretno Braunovo kretanje, agregacija ON – OFF izvora visoke varijabilnosti.

Modeliranje vremenskih serija predstavlja perspektivno sredstvo za proučavanje mrežnog saobraćaja. Predikcije saobraćaja se koriste u raznim situacijama, kao što su: prognoza i planiranje saobraćaja za širi opseg zavisnosti, kontrola pristupa, alokacija dinamičnog opsega, rezervacija resursa, prognoza QoS parametara, kontrola nagomilavanja u širokopojasnim mrežama i slično.

Savremene studije, bazirane na vrlo kvalitetnom merenju podataka, ukazuju na postojanje *self similar* ("sebi sličnog") procesa, kao realističnog matematičkog sredstva, koje omogućava karakterisanje statističkog ponašanja saobraćaja u mrežama za prenos podataka (LAN, MAN, WAN), ISDN signalizacionom D kanalu, kod TCP/IP i WWW saobraćaja, u VBR kodiranim video sekvencama. Statistička analiza prikupljenih podataka pokazala je drastičnu razliku svojstava saobraćaja paketskih mreža u odnosu na postojeće klasične modele. Rezultujući saobraćaj, pri agregaciji raznih individualnih izvora i nižem mrežnom opterećenju, nije postajao "izgladeniji", kako se očekivalo, nego je odražavao svojstva *bursty* (burnog, praskavog) saobraćaja. Ova opservacija se pokazala vrlo važnom, jer je uticala na preispitivanje nekih ključnih pretpostavki koje su činjene u procesu planiranja mrežnih performansi. *Burst*-evi se mogu opisivati statistički, koristeći *self similarity*, svojstvo povezano sa fraktalnošću, odnosno pojavljivanjem istog objekta, nezavisno od skale na kojoj se vrši posmatranje.

Osnovno svojstvo *self similar* procesa je LRD (zavisnost u dugom opsegu), koja se može okarakterisati parametrom Hurst-a. Osim egzaktnog LRD procesa, zavisnosti u obliku frakcionalnog Gausovog šuma, razmatraju se i asimptotski *self similar* procesi, kao što su: "haotična mapa", *heavy tailed* ON-OF modeli, GARIMA, FARIMA. Poslednji od modela je generalno i fleksibilno rešenje, koje omogućava fitovanje za SRD i LRD autokorelacione funkcije. Napomenimo da je primena Puasonovog i drugih Markovih procesa neadekvatna kod paketskih mreža, a može se smatrati validnom za modeliranje dolaznog toka korisničkih sesija.

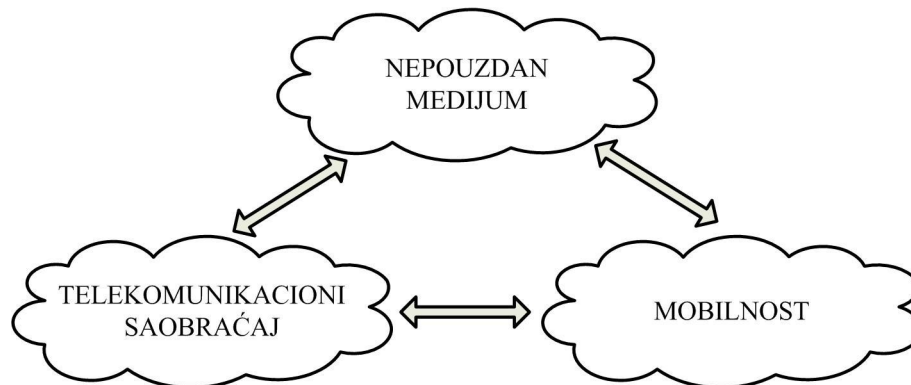
Pojam "self similar" (sebi sličan) uveo je Mandelbrot, sedamdesetih godina prošlog veka, pri opisu statističkih svojstava u raznim naučnim oblastima ("When each piece of a shape is geometrically similar to the whole, both the shape and the cascade that generate it are called *self-similar*."), dok među prve značajnije radove, koji sagledavaju taj fenomen na primeru Eternet saobraćaja, spada rad [10]. U odnosu na Puasonov proces koji, ako se posmatra na finijoj vremenskoj skali, izgleda *bursty*, a agregiran na grubljoj skali deluje izgladeno, *self similar* (fraktalni) proces, kada se agregira na grublju vremensku skalu, održava "bursty" karakter. Frakcionalna ARIMA (FARIMA) je generalizacija standardnog ARIMA procesa preko necelobrojnog parametra

diferenciranja  $d$ ,  $-0,5 < d < 0,5$ , a za predstavljanje svojstava modela stacionarnog procesa kao LRD, odnosno asimptotskog “self similar” procesa, koristi pozitivne vrednosti za  $d$ . Od posebnog značaja je veza parametra diferenciranja sa Hurst-ovim parametrom,  $H = d + 1/2$ . FARIMA proces pokriva i LRD i SRD korelacionu strukturu, s tim što postoje problemi zbog sporijeg generisanja trasa u odnosu na druge postupke. Koristi se za modeliranje VBR video saobraćaja, generisanje dolaznih tokova, simulacionu analizu modela čekanja, kao i predikciju multimedijalnog saobraćaja.

## 6. Saobraćaj bežičnih mreža

Analiza paketskog nivoa QoS u vazдушnom interfejsu je vrlo izazovan i komplikovan zadatak zbog više faktora. Bežični linkovi imaju vrlo varirajuće osobine, zbog zasenčenja, fadinga višestrukih putanja i drugih efekata. Nomadsko ponašanje korisnika uvodi druge neizvesnosti. Jedna od njih je iniciranje handover procedure između različitih oblasti pokrivanja. Uspostavljeni novi put može imati različito kašnjenje, gubitke i karakteristike opsega. Takođe, kretanje korisnika može uticati na njegovu aktivnost, odnosno na nivo zahteva i paketski nivo karakteristika generisanog saobraćaja. Potrebno je uzeti u obzir i specifične situacije, poput korišćenja nekoliko simultanih aplikacija sa VBR saobraćajem.

Komponente koje utiču na QoS u vazдушnom interfejsu mogu se predstaviti interakcijom **mobilnosti, saobraćajnih karakteristika i bežičnog medijuma** (slika 2). Mehanizam odgovoran za QoS u IP podržanim mrežama, treba da predvidi buduće stanje mreže na bazi korisničke mobilnosti i saobraćajnih parametara.



Slika 2. Komponente vazdušnog interfejsa

Monitoring realne mreže se vrši specificiranom mernom podrškom. Presudan je razvoj saobraćajnih modela za pretpostavljene tipove izvora saobraćaja. Zbog tehnologije komutacije kola, QoS obezbeđen korisnicima 2G sistema je tipično ograničen na parametre pozivnog sloja, poput blokiranja poziva, blokiranja poziva u toku handovera i sl. U potpuno IP zasnovanim mobilnim mrežama, osim sloja zahteva, razlikuju se i QoS karakteristike IP sloja, poput gubitaka paketa, kašnjenja paketa, džitera i sl.

Korisnici potpuno IP mobilne mreže ne zauzimaju konstantan opseg u toku ukupnog trajanja zauzeća, pa ovi sistemi imaju dobitak u procesu statističkog



multipleksiranja na mrežnom sloju. U tom slučaju manji broj korisnika, sa opseg-zahtevnim aplikacijama, može produkovati "usko grlo" na bežičnom linku. Saobraćajni modeli zato treba da uključe razne aplikacije na sloju zahteva i sloju paketa.

Glavna uloga modela mobilnosti je da predvidi kretanje korisnika unutar određene oblasti. Postojeći modeli potiču od 2G sistema i imaju uprošćeni saobraćajni deo, dok se pažnja usmerava na mobilnost i modeliranje kompleksnim stohastičkim procesima.

Kod saobraćajnih modela svaka aplikacija se može opisati sopstvenim karakteristikama, koje se mogu meriti iz realnih zapisa (*traces*). Trend je da se koriste generalni modeli, poput MAP (*Markovian Arrival Process*), ili BMAP (*Batch MAP*). Postoji potreba za razvojem novih integrisanih saobraćajnih modela, koji uključuju i mobilnost i saobraćajni deo. Modeli vazdušnog interfejsa uključuju atmosferske uslove, *multipath* fading i sl.

## Literatura

- [1] E. Brockmeyer, H. L. Halstrøm and A. Jensen, "The life and works of A. K. Erlang," *Transactions of the Danish Academy of Technical Sciences*, No. 2, Copenhagen 1948, pp. 277.
- [2] F. Johannsen, "Busy", *The Copenhagen Telephone Company*, Copenhagen, October 1908.
- [3] J. R. Wilkinson, "Theories for toll traffic engineering in the USA," *Bell System Technical Journal*, 1956., vol. 35, No 2, pp. 421-514.
- [4] T. L. Saaty, *Elements of Queueing theory*, McGraw-Hill, New York, 1961
- [5] R.B. Cooper, *Introduction to queueing theory*, New York 1972. 277 pp.
- [6] A. Kuczura, "The Interrupted Poisson Process as an Overflow Process," *Bell Syst. Techn. J.*, No 3, 1973.
- [7] D. L. Jagerman, "Some properties of the Erlang loss functions," *Bell Syst. Techn. J.*, 53, No 3, 1974.
- [8] L. Kleinrock, *Queueing systems*, Vol. I, *Theory*, New York 1975, 417 pp.
- [9] H. Akimaru, H. Takahashi, "An Approximate Formula for Individual Call Losses in Overflow Systems," *IEEE Trans. on Communications*, vol. Com-31, No 6, 1983, pp. 808-811.
- [10] W. E. Leland et al., "On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic (Extended Version)," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 2, no. 1, Feb. 1994, pp. 1-15.
- [11] H. Michiel, K. Laevens, "Teletraffic Engineering in a Broad-Band Era," *Proceedings of the IEEE*, vol. 85, no. 12, Dec. 1997, pp. 2007-2032.
- [12] G. Ash, *Dynamic Routing in Telecommunications Networks*, McGraw-Hill, 1998.
- [13] V. B. Iversen, B. Sanders, "Engset formulæ with continuous parameters - theory and applications," *AEU, International Journal of Electronics and Communications*, Vol. 55, 2001, pp. 3-9.
- [14] J. Roberts, "Traffic Theory and the Internet," *IEEE Commun. Magazine*, vol. 39, no. 1, Jan. 2001, pp. 94-99.
- [15] S. Floyd, V. Paxson, "Difficulties in Simulating the Internet," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, no 4, Aug. 2001, pp. 392-403.

- [16] B. Baynat et al., "Towards an Erlang-like law for the Performance Evaluation of GPRS/EDGE Networks with Finite-Length Sessions", *3rd IFIP-TC6 Networking Conference*, Athens, Greece, May 2004.
- [17] E. W. M. Wong et al., "A novel method for modeling and analysis of distributed video on demand systems," *Proc. ICC 2005*, Seoul, Korea, May 2005.
- [18] ITU-D, Handbook: *Teletraffic Engineering*, Study Group 2, Question 16/2, Revised January 2007.
- [19] M. Bakmaz, "Analysis of a model of two overflow traffic components with different serving intensities", *International Journal Of Electronics And Communications (AEUE: Archiv fuer Elektronik und Uebertragungstechnik)*, No 1, January 2006.
- [20] M. Bakmaz, Z. Bojković, "Uticaj Erlangovih istraživanja na razvoj Teorije telekomunikacionog saobraćaja," *Telfor 07*, Beograd, Novembar, 2007.

**Abstract:** *In this work are induced some of the basic results of the Teletraffic theory, which is the discipline developed in the last hundred years, following the evaluation of the telecommunication networks. More than half a century has passed supporting the networks with circuit switching, and during that time many of the models with the explicit solution have enabled developing the traffic engineering methods which are respected even today. By the development of the computer networks the traffic problem was brought up to the packet level and also to the intensive interest for the queueing models. Analyzing the local area network traffic and the Internet traffic we noticed the long range dependence, more exactly the feature of self-similarity. Actual wireless networks models, that are qualifying the quality of service in air interface are reflecting the interaction of mobility, characteristics of the traffic and wireless medium.*

**Keywords:** *Internet traffic, mobility, air interface, Erlang*

## **THE ONE CENTURY OF TELETRAFFIC THEORY**

Miodrag Bakmaz, Bojan Bakmaz