

mgr. Andrej Vozlič  
 mgr. Janez Zvab  
 mgr. Jirij Vesan  
 ISMA - Elektrovezve  
 Ljubljana, in. a. št. 0

NASTAVLJANJE POTI PAKETOV V OMRÉŽJAH ZA PRENOS PODATKOV

PACKET ROUTING IN PACKET SWITCHING NETWORKS

Vsebina - V referatu obravnavamo problem nastavljanja poti v omrežjih za prenos podatkov. Pokažemo uporabo matematičnih metod za reševanje problema maksimalnega pretoka pri načrtovanju paketnih komutacijskih omrežij za usklajevanje kapacitet centrov in povezav. Na koncu pokažemo še uporabo rezultatov teh izračunov pri adaptivnem nastavljanju poti paketov.

ABSTRACT - In this report we consider the routing problem in the packet switching networks. We show the use of mathematical methods for solution of the maximal flow problem in networks by the design of the packet switching networks for the definition of the capacities of the packet switching centers and connections between them. At the end we show how to use these results by the adaptive packet routing.

Rešitev problema nastavljanja poti paketov v omrežjih za prenos podatkov bistveno vpliva na učinkovitost celotnega omrežja. Algoritem za nastavljanje poti mora zagotoviti čim hitrejši prenos paketov, hkrati pa ne sme priti do blokade omrežja zaradi hitro povečanega prometa. Treba je torej zagotoviti prilagujanje nastavljanja poti na prometne razmere. Ogledali si bomo, kako lahko že pri načrtovanju omrežja za prenos podatkov uporabimo določene matematične metode in rezultate teh simulacij uporabimo tudi pri izdelavi samega algoritma za nastavljanje poti.

Paketi terminala, ki prihajajo preko vmesnika M.25 v najbližji paketni komutacijski center (izvorni PNC), želimo optimalno pre-

nesti v ponorni PKC, na katerega je vezan drugi komunicirajoči terminal. Ker prenos po najkrajši poti sam po sebi ne zagotavlja tudi najkrajšega časa prenosa, smatramo za optimalen prenos v najkrajšem možnem času.

Pot nastavljamo v PKC s pomočjo glave paketa. Glede na to, kako prenašamo posamezne pakete znotraj sporočila, ločimo:

1. večpaketni prenos - vse pakete sporočila prenesemo po isti poti. Pred prenosom moramo pot vzpostaviti s pozivnim paketom ali pa je v primeru najetih linij pot permanentno vzpostavljena. Če tem moramo rešiti problem nastavitve poti za celotno sporočilo.
2. enopaketni prenos - pakete v okviru sporočila prenašamo skozi omrežje individualno. Pot vzpostavljamo v vsakem PKC pri vsakem paketu posebej s pomočjo krmilne informacije, ki jo vsebuje glava paketa. Posledica takšnega nastavljanja poti so različne zakasnitve posameznih paketov sporočila zaradi različno dolgih poti, ki so jih prepotovali, zato se sekvenca sprejemanih paketov v splošnem razlikuje od sekvence oddajanja. Pakete pravilno sestavimo v sporočilo, če vsak paket v glavi nosi sekvenčno številko.

Pri izbiri učinkovitega algoritma za nastavljanje poti je bistvena topologija omrežja. V nekaj preprostih primerih konfiguracije omrežja je tudi nastavljanje poti dovolj enostavno, kot npr. v zvezdastem, zračnem, pravokotnem, drevesnem ali popolnoma povezanem omrežju. Če imamo omrežje nepravilne konfiguracije, je izbira pravilnega algoritma mnogo težja. Algoritem za nastavljanje poti naj bi upošteval ponorni PKC za določeni paket, obremenjenost linij in možne zakasnitve, da bi paket v optimalnem času prispel do ponora in hkrati ne bi prišlo do zasičenja ali blokade celotnega omrežja. Hkrati pa je treba upoštevati, da je vsaka informacija, ki jo uporabljajo taki algoritmi, vsaj delno zastarela, da navadno nimamo ažuriranega pregleda nad celotnim omrežjem ter da zelo kompleksen algoritem sam po sebi vnaša dodatne zakasnitve v prenos podatkov. Algoritem pa mora garantirati pravilen prenos paketov tudi v primeru nepravilnega delovanja sistema ali izpada posameznih vozlišč ali linij.

Za nastavljanje poti paketov v omrežjih nepravilne konfiguracije je sicer znanih več preprostih algoritmov (slučajno nastavljanje, poplavljanje, postopek "vroči krompir" itd.), ki pa so za uspešno

delovanja paketnega omrežja prenelo učinkoviti. Kolj zapletene algoritme delimo v dve osnovni skupini, filitno in adaptivno. V obeh primerih nastavljanje poti paketov s pomočjo nastavitvenih tabel, ki jim določijo boljši v izbranih obdobjih (filitno nastavljanje poti) boljši se dinamično spreminjajo glede na prometne razmere v omrežju (adaptivno nastavljanje). Ker je vedno pomno hitro povečanje prometa v delu omrežja ali imela posebej nagnjena ali linije, je očitno, da je treba pri nastavljanju poti zagotoviti prilagujanje na trenutne prometne razmere. Osnova za dober algoritem za nastavljanje poti pa je že pravilno načrtovano omrežje. Oglejmo si, kako si pri tem lahko pomagamo z matematičnimi metodami in simulacijo.

Osnovna topologija omrežja je dana z geografskimi lokacijami paketnih komutacijskih centrov in povezavami med njimi. Pri tem upoštevamo potrebe po prenosu podatkov glede na trenutno situacijo in ocene v bodočnosti. Osnovna zahteva je, da so kapacitete centrov in povezav med njimi usklajene. Zlasti ne sme biti kritična kapaciteta PKC, saj mora ta biti sposoben komutirati ves promet paketov, ki potujejo skozenj in to znotraj dovoljenih zakasnitev. Pri usklajevanju kapacitet centrov in povezav se izkažejo za zelo uporabne matematične metode za izračun maksimalnega pretoka po omrežjih. Topološko strukturo paketnega omrežja lahko predstavimo z usmerjenim grafom, kapacitete vozlišč in povezav pa v prvem približku določimo na podlagi ocen.

Matematična formulacija problema maksimalnega pretoka je naslednja. Imejmo končen usmerjen graf  $G(V,E)$ , kjer je  $V$  množica vozlišč in  $E$  množica povezav. Povezave označujemo z urejenim parom njihovih krajišč:  $e = (u,v) \in E$ ,  $u,v \in V$ . Pri tem je  $u$  izvor,  $v$  pa ponor povezave, ki je v tem primeru torej usmerjena od  $u$  do  $v$ . Med vozlišči sta dve posebej odlikovani:  $s$  je izvor,  $t$  pa ponor omrežja. Na množici povezav imamo definirani dve nenegativni, v splošnem realni funkciji:  $c(e)$ ,  $e \in E$ , je kapaciteta povezave  $e$  in  $f(e)$ ,  $e \in E$ , je tok po povezavi  $e$ . Funkcija  $f$  mora zadoščati še naslednjima dvehu pogojema:

$$1. \quad 0 \leq f(e) \leq c(e), \quad e \in E,$$

$$2. \sum_{e \in \text{in}(u)} f(e) = \sum_{e \in \text{out}(u)} f(e), \quad u \in V, u \neq s, t,$$

kjer je  $\text{in}(u) := \{e \in E, e = (v, u)\}$   
 $\text{out}(u) := \{e \in E, e = (u, v)\}$ .

Vrednost toka ali pretok definiramo takole:

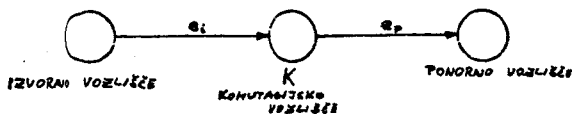
$$F := \sum_{e \in \text{out}(s)} f(e) - \sum_{e \in \text{in}(s)} f(e) =$$

$$= \sum_{e \in \text{in}(t)} f(e) - \sum_{e \in \text{out}(t)} f(e)$$

Problem maksimalnega pretoka v omrežju je torej naslednji: poiskati je treba tok z maksimalno vrednostjo. O enoličnosti rešitve v splošnem ne moremo govoriti. Izvedli smo obsežno testiranje znanih metod za reševanje tega problema in ugotovili, da se s stališča časa, potrebnega za računanje, in zahtev za računalniški spomin, najbolje obnese Dinicova metoda [2].

Problem, ki ga rešujemo na modelu paketnega omrežja, moramo seveda prevesti na problem maksimalnega pretoka, kot smo ga definirali. Pri tem uporabimo naslednje prijeme:

1. Izvorov in ponorov toka paketov je v našem omrežju seveda veliko, to so uporabniški terminali in sami PKC. Vse terminale, ki so vezani na določen PKC, priredimo kot izvore in ponore toka paketov neposredno temu PKC in jih s tem eliminiramo iz modela. Model omrežja zdaj preoblikujemo še tako, da vsak PKC razdelimo na tri dele: izvorno vozlišče, ki predstavlja vse izvore paketov v tem PKC, komutacijsko vozlišče, ki predstavlja komutacijske funkcije PKC, in ponorno vozlišče, ki predstavlja ponore paketov v tem PKC.

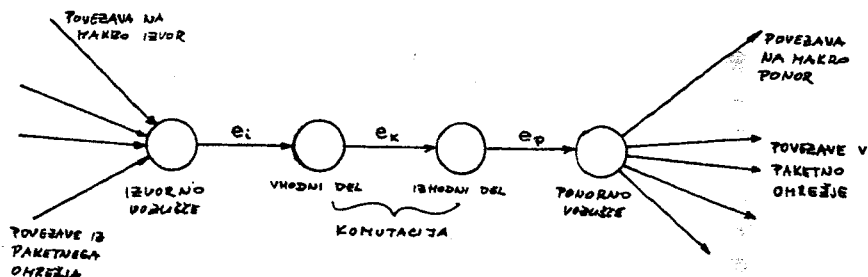


SLIKA 1.

Izvorni povezavi  $e_i$  priredimo kapaciteto, ki predstavlja zmogljivost izvirnega procesiranja paketov v PKC, kapaciteta ponorne povezave  $e_p$  pa predstavlja zmogljivost ponornega procesiranja pake-

tov. Vsa izvorna vozlišča, ki smo jih tako dobili v modelu omrežja, povežemo s povezavami neselne kapacitete na makro izvor, enako storimo z vseri ponornimi vozlišči, ki jih povežemo na makro ponor. S tem smo dobili naš običajen obraba z enim samim izvorom in ponorom.

2. Rešiti moramo še vprašanje kapacitete komutacijskega dela vozlišča. To storimo tako, da razdelimo komutacijsko vozlišče  $K$  spet na dva dela, vhodni in izhodni del, med njima pa uvedemo povezavo  $e_k$ , ki predstavlja kapaciteto komutacijskega vozlišča. Vse povezave, ki iz paketnega komutacijskega omrežja prihajajo v PKC, so vezane na izvorno vozlišče, vse povezave, ki pa iz PKC izhajajo v omrežje, so vezane na ponorno vozlišče. Tako imamo v preoblikovanem PKC končno sliko:



SLIKA 2

Tako smo dobili preoblikovan model paketnega komutacijskega omrežja, na katerem lahko uporabimo eno od metod za reševanje problema maksimalnega pretoka. Cilj teka računanja ni toliko to, da bi izračunali maksimalni pretok paketov skozi omrežje, kot ta, da bi pri tem maksimalnem pretoku za vsako povezavo dobili tok po njej  $f_{\max}(e)$ ,  $e \in E$ . Če je  $f_{\max}(e) = c(e)$ , pravimo, da je povezava kritična, saj omejuje velikost maksimalnega pretoka. Glede na način preoblikovanja modela omrežja, ki smo ga opisali, lahko na ta način ugotovimo tudi, ali je pri predvidenih kapacitetah povezav kritična tudi kapaciteta katerega PKC samega. Iz vrednosti  $f_{\max}(c)$  lahko prav tako ugotovimo, katere povezave so morda prenatno obremenjene in jim lahko kapaciteto zmanjšamo ali jih celo ukinemo, katerim pa bi bilo dobro kapaciteto povečati. Z upoštevanjem ekonomskih parametrov lahko zdaj preizkušamo drugačne variante konfiguracije omrežja in zmogljivosti PKC in povezav. To ponavljamo,

dokler ne dobimo ustrezno uravnotežena in ekonomsko upravičena rešitve.

Algoritem za nastavljanje poti paketov uporablja rezultate teh izračunov. Za vsako povezavo  $e$  v omrežju namreč vrednost  $f_{\max}(e)$  predstavlja nekakšen varnostni prag, ki pomeni garancijo, da zaradi toka  $f(e) \leq f_{\max}(e)$  nikjer v omrežju ne bo prišlo do blokade. Vsak PKC vsebuje tabele primernih poti do vseh mogočih ponornih PKC in komutira pakete po najugodnejši med njimi, tako da obremenitev povezave ostane po možnosti  $f(e) \leq f_{\max}(e)$ . Za povečanje učinkovitosti omrežja pa je pomembno, da lahko po potrebi pošljemo po povezavi tudi kaj več prometa:  $f(e) > f_{\max}(e)$ , seveda le, če je  $f_{\max}(e) < c(e)$ . S tem sicer izgubimo globalno garancijo, da ne bo prišlo do blokade omrežja, vendar pa je lahko to lokalno zelo ugodna rešitev. V ta namen moramo uvesti možnost adaptacije tabel nastavljanja poti na trenutne prometne razmere. Znanih je več načinov, kako to dosežemo:

1. Distribuirano adaptivno nastavljanje poti - sosednja vozlišča si v določenih časovnih intervalih izmenjujejo tabele zaksnitev na svojih linijah (to pomeni tabele obremenitev teh linij). Na podlagi teh podatkov in trenutnih dolžin čakalnih vrst na svojih linijah vsak PKC prilagodi svoje nastavitvene tabele. Da zmanjšamo promet kontrolnih paketov in čas preračunavanja tabel, se odločimo za izmenjavo informacij asinhrono, samo ob večjih spremembah razmer.
2. Centralizirano adaptivno nastavljanje poti - slabost distribuirano adaptivnega nastavljanja poti je počasno prilagajanje vozlišč na oddaljene spremembe v omrežju. Zato vsi PKC pošiljajo informacije o prometnih razmerah v svoji okolici nekemu centralnemu PKC, ki za vse PKC v omrežju zgradi popravljene nastavitvene tabele. Seveda to traja precej časa, tako da je vprašljiva aktualnost takih tabel, ko prispejo v PKC, kjer naj bi se uporabljale. Slaba stran tega načina je tudi možnost izpada centralnega PKC, po katerem sistem deluje le s fiksnim nastavljanjem poti.
3. Hibridno adaptivno nastavljanje poti - združuje prednosti distribuiranega in centraliziranega adaptivnega nastavljanja poti. Sosednja vozlišča si asinhrono izmenjujejo podatke kot pri distri-

buiranen nastavljanju, hkrati pa pošiljajo informacije o lokalnih prometnih razmerah tudi centralnemu PKC, ki omogoča globalno učinkovito nastavljanje poti. Izpad centralnega PKC ni tako kritičen, ker omrežje se vedno lahko deli na distribuirano adaptivnim načinom nastavljanja poti.

Seveda je objavto vprašanje kako čisto postrežbo prilagoditi nastavitvene tabele. Tu pomaga računalniška simulacija in obratno testiranje modela omrežja. Še posebno zanimivo vprašanje pa je problem rekonfiguracije omrežja ob izpadu posameznih linij ali PKC (to v bistvu pomeni tudi izpad vseh linij, ki so vozane na ta PKC). V tem primeru je potrebno v bistvu rešiti problem maksimalnega pretoka za nekoliko spremenjeno omrežje. Dodatne raziskave bodo potrebne, da bi ugotovili, ali je to možno dovolj hitro in učinkovito storiti le z nekoga centralnega mesta (PKC), ali pa se da dovolj dobra rešitev sestaviti lokalno z upoštevanjem rešitve v starem omrežju, ki jo primerno popravimo, kot zahtevajo nove razmere.

#### LITERATURA

1. J. Zvab, A. Vozlič, C. Vegan, Zasnova paketnega komutacijskega centra, zaključno poročilo raziskovalne naloge v okviru usmerjenega raziskovalnega programa Raziskovalne skupnosti Slovenije, Ljubljana, 1981.
2. A. Vozlič, Problem maksimalnega pretoka po omrežjih, magistrsko delo, Fakulteta za elektrotehniko Univerze Edvarda Kardelja, Ljubljana, 1981.
3. J. Zvab, Zasnova podatkovnega komutacijskega centra, magistrsko delo, Fakulteta za elektrotehniko Univerze Edvarda Kardelja, Ljubljana, 1979.
4. E. Lawler, Combinatorial Optimization: Networks and Matroids, Holt, Rinehart and Winston, 1976.
5. L.R. Ford, D.R. Fulkerson, Flows in Networks, Princeton Univ. Press, 1962.