

UNIVERZA V LJUBLJANI

Fakulteta za elektrotehniko

Stanislav Kovačič

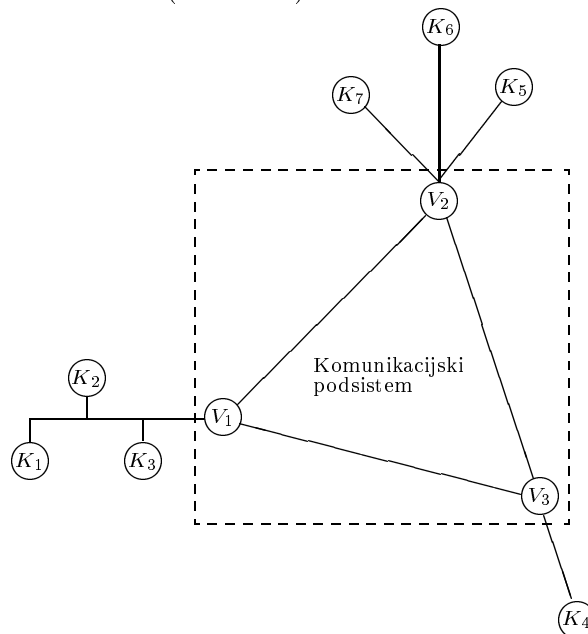
Komunikacije v avtomatiki

(študijsko gradivo)

Ljubljana, 25. oktober 2001

7 Elementi mrežnega sloja

Komunikacijska omrežja sodijo s svojim bistvom med obsežne sisteme. V sebi združujejo veliko število vmesnih in končnih vozlišč ter še več povezav. Običajno obravnavamo vmesna vozlišča ločeno od končnih vozlišč. Pravimo, da vmesna vozlišča sestavljajo *komunikacijski podstistem*, na katerega se po potrebi priključujejo končna vozlišča (slika 136).



Slika 136: Komunikacijski podstistem vmesnih vozlišč (V_1, V_2, V_3) in končna vozlišča.

Za pravilno in učinkovito delovanje komunikacijskega podсистema skrbi mrežni sloj. Temeljna naloga komunikacijskega podсистema in s tem mrežnega sloja je povezovanje krajevno porazdeljenih končnih vozlišč. Poskrbeti mora, da pridejo *paketi* od enega končnega vozlišča skozi omrežje do drugega končnega vozlišča. Za razliko od podatkovnega sloja, ki skrbi za zanesljiv prenos podatkov med sosednjimi vozlišči v omrežju, pa mora mrežni sloj zagotoviti ustrezno *prenosno pot* skozi omrežje "od konca do konca" med poljubnima končnima vozliščema v omrežju.

V nekaterih primerih ostane prenosna pot v času komuniciranja dveh oddaljenih procesov (končnih vozliščih) nespremenjena cel čas komuniciranja. Paketi gredo drug za drugim po isti prenosni poti, ki je bila določena še predno je začel dejanski prenos. Videti je, kot da sta vozlišči neposredno povezani drugo z drugim, čeprav gredo podatki preko vmesnih vozlišč. Pravimo, da med vozliščema obstaja (navidezna) *zveza*. Prenosna pot pa se lahko v času komunikacije tudi spreminja za vsak posamezni paket. Tedaj je paket samostojna podatkovna enota

in do zveze med končnima vozliščema v pravem pomenu besede sploh ne pride.

Pri določanju prenosne poti skozi omrežje sodelujejo vmesna vozlišča. Ko paket pride do takega vozlišča, ga mora le-to poslati naprej v predvideni smeri. Pravimo, da opravlja funkcijo povezovanja oziroma *usmerjanja* (ang. routing). Usmerjanje je dejavnost, ki jo opravljajo vmesna vozlišča na nivoju omrežja pri določanju prenosne poti paketov. Za opravljanje funkcije usmerjanja morajo vmesna vozlišča poznati statične in dinamične lastnosti omrežja, denimo topologijo omrežja in s tem v zvezi neposredno povezanost vozlišč, efektivno hitrost prenosa na posameznih povezavah, kvaliteto in ceno posameznih prenosnih poti, in nenazadnje, obremenjenost omrežja ali dela omrežja. Obremenjenost omrežja je odvisna od usmerjanja, torej mora biti način usmerjanja odvisen od obremenjenosti omrežja.

Naslednje pomembno vprašanje v zvezi z mrežnim slojem je *naslavljanje*. Če naj bo omrežje sposobno dostaviti paket naslovljenemu vozlišču, mora poznati njegovo lokacijo oziroma njeno priključno mesto. Uporabnik (izvor) običajno navede naslov ponora (oddaljene postaje), ki ne pove ničesar o položaju postaje v omrežju. Torej mora biti omrežje sposobno preslikati naslov vozlišča v njegov položaj.

Zadnje in ne najmanj pomembno vprašanje z mrežnim slojem pa je povezovanje omrežij med seboj v *omrežje omrežij*. Omogočati mora povezovanje ne le enakih, ampak tudi povezovanje podobnih in celo čisto različnih omrežij. To nalogo opravljajo posebna vozlišča, ki jim rečemo *prehod* (ang. Gateway).

7.1 Omrežje in storitve

Po modelu ISO OSI daje mrežni sloj storitve naslednjemu višjemu - prenosnemu sloju. S stališča prenosnega sloja je najvažnejše, da pridejo njegove podatkovne enote od oddajnega vozlišča skozi omrežje do sprejemnega vozlišča. Oddajno in sprejemno vozlišče sta končni vozlišči, ki sta vezani na komunikacijski podsistem, za katerega skrbi mrežni sloj. Torej komunikacijski podsistem nudi storitve končnim vozliščem. Zato vmesnik med prenosnim in mrežnim slojem modela ISO OSI sovpada z vmesnikom med končnimi vozlišči in omrežjem. S tem storitve mrežnega sloja v resnici definirajo vmesnik med končnimi vozlišči in komunikacijskim podsistemom, s tem pa tudi pravila, ki jih morajo končna vozlišča upoštevati.

V majhnih omrežjih je uporabnik omrežja tudi njegov lastnik. V velikih omrežjih pa lastnik, ki upravlja omrežje, praviloma ni hkrati tudi neposreden uporabnik omrežja. Tedaj je vmesnik med prenosnim in mrežnim slojem, ki je hkrati tudi vmesnik med končnim vozliščem in komunikacijskim omrežjem, tudi

vmesnik med uporabnikom in lastnikom omrežja.

Zastavlja se vprašanje, kaj mora dajalec storitve v osnovi nuditi oziroma zagotoviti uporabniku oziroma kje naj se opravlja glavna komunikacijskih dejavnosti. Za uporabnika omrežja je po eni strani najugodnejše, če mu omrežje daje možnost zanesljive komunikacije s poljubnim vozliščem v omrežju. Po drugi strani pa se visoke stopnje zanesljivosti omrežja ne da vedno upravičiti. Eden od razlogov je ta, da visoka stopnja zanesljivosti ni vedno nujna; lahko je pomembnejša pravočasna dostava. Drugi razlog pa je, da se preverjanje in nadzor nad pretokom podatkov večkrat opravlja (in s tem podvaja) tudi v končnih vozliščih.

Obstajata dve obliki storitev, ki se pojavljata tudi na drugih slojih, vendar prideta na mrežnem sloju najbolj do izraza, in sicer:

- povezana storitev in
- nepovezana storitev.

V prvem primeru je s strani dajalca storitve zagotovljeno, da gredo podatki zanesljivo, zaporedno in brez podvajanja na drugo stran, in da je jemalec storitve o tem po potrebi tudi obveščen. Pri nepovezani storitvi vtis povezanosti sprejemnika z odajnikom ne obstaja, ni zagotovljen zanesljiv prenos podatkov, možno je podvajanje ali izgubljanje podatkov, in jemalec storitve o tem praviloma ni obveščen.

7.2 ARP in RARP

Kot rečeno, je ena od nalog mrežnega sloja je preslikava mrežnega naslova postaje v njen fizični naslov. Če želi neka postaja poslati paket oddaljeni postaji, mora poznati njen omrežni naslov. Za dostavo paketa mora poskrbeti omrežje. Če naj bo omrežje zmožno dostaviti paket naslovljeni postaji, mora poznati njeno priključno mesto oziroma tako imenovani fizični naslov. Preslikava vsakega mrežnega naslova v pripadajoči fizični naslov bi bila lahko dana v obliki tabele in dana na uporabo vsem zainteresiranim v omrežju. Čeprav bi bila takšna rešitev možna, pa je neprikladna. Bolj prilagodljivo rešitev daje protokol. Ogledali si bomo kako je za to poskrbljeno v omrežju Internet, ki uporablja na nižjih slojih Ethernet.

V omrežju TCP/IP opravljata preslikavo med mrežnimi, to je IP naslovi in fizičnimi, v našem primeru Ethernet naslovi, protokola z imenom ARP (Address Resolution Protokol) in RARP (Reverse ARP). Potek preslikave bomo ponazorili na primeru.

Denimo, da želi postaja z naslovom $IP1 = 193.2.72.151$ poslati paket postaji z naslovom $193.2.72.169$. Zato od svojega linijskega sloja (gonilnika mrežne kartice) zahteva, naj pošlje okvir na ta naslov. Če naj linijski sloj pošlje okvir postaji z naslovom $IP2 = 193.2.72.169$, mora poznati njen Ethernet naslov. Ker linijski sloj Ethernet naslova zaenkrat ne pozna, pošlje ARP poizvedovalni okvir, vanj vpiše IP naslov iskane postaje in zahtevo, naj se postaja z naslovom $IP2$ odzove s svojim Ethernet naslovom $E2$. Če iskana postaja obstaja, se odzove in komunikacija med obema postajama lahko steče preko Ethernet naslovov. Postaja $IP1$ od tedaj naprej hrani Ethernet naslov postaje $IP2$ v svojem lokalnem pomnilniku, tako da kasneje poizvedovanje ni več potrebno. V bistvu je odgovor na poizvedovanje dostopen vsem postajam, na istem segmentu. Tudi ostale postaje lahko vpišejo zvezo med naslovoma $IP2$ in $E2$ v svoj pomnilnik in njihovo poizvedovanje ni potrebno. Še več. Iz poizvedovalnega okvirja je razvidna zveza med naslovoma $IP1$ in $E1$. Ker je poizvedovani okvir dosegljiv vsem postajam na segmentu, eksplicitno poizvedovanje po naslovu $E1$ ni potrebno. Ostaja še vprašanje, kako poteka iskanje fizičnega naslova za postaje, ki niso na istem segmentu. Če so segmenti povezani s ponavljalniki ali mostovi, je enako kot za iskanje postaj na istem segmentu. V primeru, da je med segmentoma usmerjevalnik ali več usmerjevalnikov, pa opravi poizvedovanje usmerjevalnik. Usmerjevalnik, ki zazna poizvedovanje po postaji, ki se ne nahaja na istem segmentu, ponovi poizvedovanje na drugem segmentu. Ko dobi odgovor na poizvedovalni okvir, javi poizvedovalni postaji namesto Ethernet naslova iskane postaje svoj lastne Ethernet naslov. Z drugimi besedami, poizvedovalni postaji se predstavi kot da je on sam iskana postaja in komunikacija z iskano postajo steče preko njega – usmerjevalnika.

7.3 Notranja zgradba mrežnega sloja

Glede na notranji ustroj mrežnega sloja obstajata dva tipa omrežij, in sicer omrežje tipa

- *navidezni tokokrog* in omrežje tipa
- *datagram*.

Z enim ali drugim tipom omrežij so možne povezane in nepovezane storitve (storitve z vzpostavitvijo zveze kot tudi brez vzpostavitve zveze). Res pa je, da je v omrežju tipa navidezni tokokrog bolj naravna storitev z vzpostavitvijo zveze, v omrežju tipa datagram pa storitev brez predhodne vzpostavitve zveze.

V omrežju tipa navidezna zveza se prenosna pot med vozliščema določi predno začne dejanski prenos podatkov. Od tedaj naprej med njima na videz obstaja direktna zveza. Ko je zveza vzpostavljena, začne prenos paketov, ki gredo

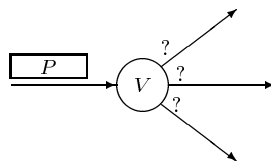
drug za drugim po isti prenosni poti, dokler obstaja za to potreba. Vmesna vozlišča na prenosni poti usmerjajo pakete iste zveze vedno v isto smer. Komunikacijo sestavljajo tri faze: vzpostavitev zveze, vzdrževanje zveze in sproščanje zveze.

Omrežje tipa datagram omogoča komunikacijo med končnimi vozlišči brez da bi kadarkoli prišlo do vzpostavitve zveze med njima. Pot prenosa se ne določi vnaprej, ampak se določa sproti za vsak posamezen paket posebej, neodvisno od ostalih paketov. Vsak paket se posebej usmerja. Funkcija usmerjevalnih vozlišč je v tem tipu omrežja bistveno drugačna.

V obeh primerih je osnovni problem usmerjanje ali določanje prenosne poti paketom. Vendar pa se le-ta v enem primeru določa na nivoju zveze, v drugem primeru pa na nivoju paketa. Problematika usmerjanja je v obeh primerih seveda različna in s tem v zvezi tudi opravljanje funkcije usmerjanja vmesnih vozlišč.

7.4 Usmerjanje

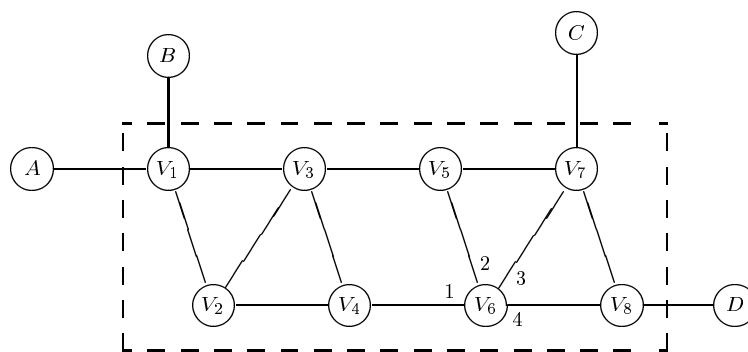
Bistvena naloga mrežnega sloja je določanje prenosne poti paketov. Paketom se določi pot po enem izmed dveh osnovnih načinov: datagram način ali navidezni tokokrog (povezava, zveza). Pri določanju prenosne poti sodelujejo vmesna vozlišča. Ko pride paket do takega vozlišča, ga mora vozlišče čimprej poslati naprej, vprašanje pa je, v kateri smeri. Pri tem se poslužuje usmerjevalnih tabel. Organizacija tabel, pa tudi način usmerjanja je bistveno odvisen od delovanja komunikacijskega podsistema - načina prenašanja paketov.



Slika 137: Osnovna naloga vmesnih vozlišč je usmerjanje paketov.

7.4.1 Datagram

V omrežju tipa datagram predstavljajo paketi na nivoju mrežnega sloja samostojne podatkovne enote, ki gredo preko vmesnih vozlišč od oddajnega do sprejemnega končnega vozlišča. Denimo, da obstaja prenos paketov med procesoma na končnih vozliščih A in D (slika 138). Ko pride denimo paket od vozlišča A do vmesnega vozlišča V_6 , ki je namenjen vozlišču D , ga mora to vozlišče poslati naprej. To pomeni, da se mora odločiti, v kateri smeri naj pošlje paket.



Slika 138: Usmerjanje v omrežju tipa datagram.

V ta namen vzdržuje usmerjevalno tabelo. Primer usmerjevalne tabele za prihodno smer 1 smo skicirali spodaj.

Končno vozlišče	Smer pošiljanja	Delež paketov
C	2	0.1
	3	0.2
	4	0.7
D	2	0.3
	3	0.5
	4	0.2

Če pride paket do vozlišča V_6 , ki je namenjen vozlišču D , ga V_6 pošlje naprej v smeri 2, 3 ali 4. Za smer se odloči tako, da je delež paketov v predvideni smeri tak, kot je zabeleženo v usmerjevalni tabeli. Pomni, da v tabeli ni zabeležena smer prihoda.

Podobna pravila kot za obravnavano vozlišče V_6 , veljajo tudi za druga vmesna vozlišča. S pomočjo usmerjevalnih tabel vozlišča uravnava odhodni promet. Usmerjevalne tabele torej določajo delež paketov, ki jih vozlišče odda v neki smeri. V našem primeru vozlišče V_6 pošilja večinski delež paketov za vozlišče D v smeri 3, manjši delež pa v smereh 2 in 4. Tako so določene glavne in alternativne prenosne poti. Tabele se ocenjujejo na osnovi prometa (dinamično) in topologije, kako pa nas za enkrat ne zanima.

7.4.2 Navidezni tokokrog

V omrežju tipa navidezni tokokrog ali navidezna zveza so oddaljeni procesi na končnih vozliščih v času komuniciranja med seboj na videz povezani. V splošnem obstaja v nekem obdobju v omrežju več navideznih povezav, vendar vsak paket v omrežju pripada samo eni taki navidezni povezavi. Paketi, ki pripadajo eni navidezni povezavi, se morajo zato razlikovati od paketov, ki pripadajo neki drugi

navidezni povezavi. To pomeni, da morajo biti paketi v takem omrežju še dodatno označeni.

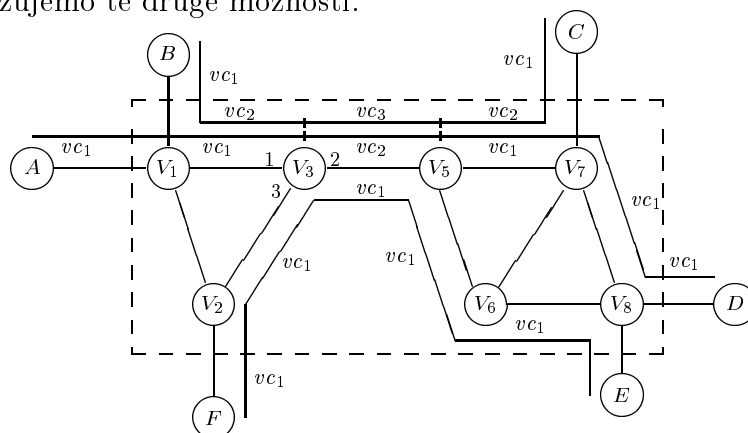
Tako kot v omrežju tipa datagram moramo tudi v omrežju tipa navidezni tokokrog med seboj razlikovati posamezne fizične povezave do vozlišča. Ker pa na isti fizični povezavi lahko sočasno obstaja več logičnih (navideznih) povezav, moramo dodatno označiti še logične povezave (glej 139).

Vsaka logična povezava, ki obstaja na neki fizični povezavi, je določena z dvema oznakama: oznako fizične povezave in oznako logične povezave. Bolj konkretno, vsak posamezen paket pripada eni fizični in eni logični povezavi. To velja za vsak paket v omrežju, tako tiste, ki pridejo do usmerjevalnega vozlišča, kot tiste, ki vozlišče zapustijo. Naloga vmesnega vozlišča je torej, da pri prehodu paketa skozi vozlišče usmeri paket na ustrezno fizično povezavo in mu zraven priredi enoznačno oznako logične povezave. Skratka, naloga vmesnega vozlišča je, da par fizične in logične povezave prihodnega paketa preslika v oznako fizične in logične oznake odhona paketa.

$$(f, v)_{prihod} \rightarrow (f, v)_{odhod}$$

V ta namen vzdržujejo ustrezno organizirane usmerjevalne tabele. Primer usmerjevalne tabele za vozlišče V_3 smo skicirali spodaj.

Zastavlja se vprašanje, zakaj ne številčimo iste navidezne povezave od začetka do konca z enako oznako. To bi bilo vsekakor možno, vendar pa ni potrebno. Dovolj je, da razlikujemo različne navidezne povezave na, ki gredo po isti fizični povezavi, za preslikavo oznak logičnih povezav pa poskrbijo usmerjevalne tabele. Ker je lažje je uporabljati različne oznake za isto logično povezavo na se poslužujemo te druge možnosti.

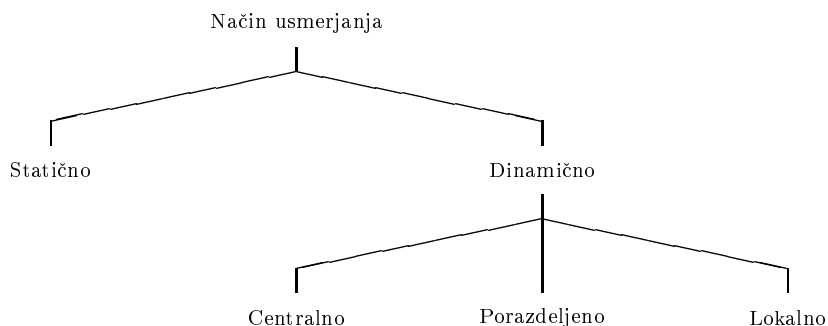


Slika 139: Omrežje tipa navidezni tokokrog. Na isti fizični povezavi sočasno obstaja več logičnih ali navideznih povezav.

Prihod		Odhod	
smer	vc	smer	vc
1	vc1	2	vc2
1	vc2	2	vc3
3	vc1	2	vc1

7.5 Algoritmi usmerjanja

Algoritme za usmerjanje delimo v dve družini. V prvo sodijo algoritmi usmerjanja, pri katerih se pravila za usmerjanje (usmerjevalne tabele) določijo enkrat za vselej in se kasneje ne spreminjajo ali pa samo izjemoma, vendar ne med samim obratovanjem omrežja. Pravilo usmerjanja se torej ne določa na osnovi ocenjevanja dejanskih razmer v omrežju. Tem algoritmom usmerjanja rečemo neadaptivni algoritmi ali tudi statični. V drugo skupino spadajo adaptivni algoritmi. Ti se prilagajajo spremembam v omrežju (spremembam v topologiji ali v prometu) in jim zato rečemo tudi dinamični. Glede na strategijo usmerjanja jih naprej delimo na centralne, lokalne, in porazdeljene. Pri centralnem načinu usmerjanja se določajo usmerjevalne tabele na osnovi globalne informacije o omrežju, ki se zbere na enem (centralnem) mestu. Centralno vozlišče skuša na osnovi informacije o celotnem omrežju priti v nekem smislu do optimalne rešitve. Na osnovi te informacije se določijo pravila usmerjanja za vsa vozlišča v omrežju, ki se po predvidenem protokolu iz centralnega vozlišča občasno distribuirajo drugim vozliščem. Lokalni algoritmi se pri usmerjanju zanašajo na informacijo, ki je prisotna v usmerjevalnem vozlišču samem. Vozlišča si eksplicitno ne izmenjujejo informacije, ki bi jo koristili za usmerjanje. V porazdeljenem ali distribuiranem načinu usmerjanja koristi usmerjevalno vozlišče e poleg svoje lastne informacije za gradnjo usmerjevalne tabele še informacijo iz neposredno sosednjih vozlišč.



Slika 140: Klasifikacija algoritmov usmerjanja.

Splošni kriteriji za snovanje in izbiro algoritmov usmerjanja se načelno ne razlikujejo od algoritmov za druge namene. Biti morajo robustni, stabilni, nepristranski in v nekem smislu optimalni.

Robustnost algoritma pomeni njegovo odpornost na okvare in v splošnem na spreminjajoče se razmere v omrežju. Z drugimi besedami to pomeni, da zaradi spremenjenih okoliščin (izpad ene ali več povezav ali dela omrežja) ne sme odpovedati celotno omrežja.

Stabilnost algoritma pomeni, da ima majhna sprememba v obratovalnih pogojih omrežja za posledico majhno spremembo v načinu usmerjanja.

Nepriustranskost algoritma usmerjanja je vedno zaželeno. To pomeni, da bi morala imeti enakovredna vozlišča imeti enakovredne pogoje.

Optimalnost zahteva, da je v danih pogojih (omejitvah) usmerjanje tako, da maksimizira (ali minimizira) izbrano kriterijsko funkcijo (npr. maksimizira prepustnost omrežja, minimizira povprečni kasnilni čas, minimizira stroške, zagotavlja zaupnost, in podobno). Največkrat nepriustranskost in optimalnost ne gresta skupaj.

7.5.1 Izolirano – lokalno usmerjanje

Pri lokalnem usmerjanju vozlišče gradi usmerjevalno tabelo na podlagi svoje (lokalne) informacije. Z drugimi vozlišči si eksplicitno ne izmenjuje informacije, ki bi jo uporabil za usmerjanje (na primer tabel ali delov tabel). Lokalna informacija, ki je lahko podlaga za usmerjanje je na primer: število aktivnih povezav preko vozlišča, dolžine čakalnih vrst v dani smeri, frekvenca prihodov, frekvenca odhodov, kapacitete direktnih povezav, in podobno.

Preprost način usmerjanja, ki ga je predlagal Baran (1964), temelji na predpostavki, da bo prepustnost omrežja velika, če bo čas bivanja paketov v vozliščih kratek. Zato se skuša usmerjevalno vozlišče vsakega prispelega paketa čimprej znebiti (ang. “Hot potato”). To doseže tako, da za določen sprejeti paket izbere odhodno smer, za katero je čas čakanja na oddajo najkrajši – izbere smer z najkrajšo čakalno vrsto. Lahko pa vzdržuje eno samo čakalno vrsto in pošlje paket, ki pride na vrsto v tisto smer, ki postane najprej prosta. Oba primera dobro poznamo iz čakalnih vrst v banki.

Naslednji način lokalnega usmerjanja temelji na povratnem učenju (ang. Backward Learning). Usmerjevalna vozlišča gradijo usmerjevalne tabele na podlagi prispelih paketov. Usmerjevalna tabela vsebuje za vsako znano vozlišče smer, v kateri naj vozlišče pošlje paket naprej in oceno kvalitete te smeri. Za omrežje na sliki 141 bi usmerjevalna tabela vozlišča V_3 lahko izgledala tako, kot je prikazano v tabeli 6(a).

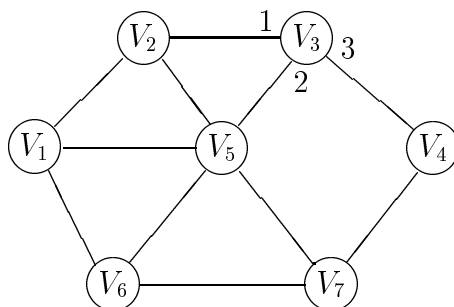
Na podlagi te vsebine tabele pošilja vozlišče V_3 pakete za vozlišče V_1 v smeri 2. Ocena smeri lahko na primer pomeni število vmesnih vozlišč na poti do danega vozlišča v predvideni smeri. Denimo, da vozlišče V_1 pošilja paket vozlišču

V_4 preko vozlišča V_3 . Zato v glavo paketa vpiše svoj naslov (V_1), naslov vozlišča V_4 ter števec prehodov skozi vozlišča, ki ga postavi na nič:

V_4	V_1	$N = 0$	Vsebina
-------	-------	---------	---------

Vsakič, ko paket prečka vozlišče, se števec poveča za ena. Naj paket pride do vozlišča V_3 iz smeri 1 in naj bo vrednost števca $N = 1$. Na primer, paket je prišel preko vozlišča V_2 , ki poveča števec na ena. Vozlišče V_3 preveri oceno, ki jo ima v usmerjevalni tabeli za vozlišče V_1 . Ker je nova ocena smeri na podlagi prispelega paketa boljša od že zabeležene, privzame novo smer in novo oceno. Obnovljena (izboljšana) vsebina tabele je prikazana v tabeli 6(b). Ko vozlišče V_3 dobi paket, ki je namenjen vozlišču V_1 , ga pošlje v smeri 1 in ne več v smeri 2.

Po določenem času vsa usmerjevalna vozlišča razpolagajo z najugodnejšimi smermi pošiljanja. Ker vozlišča popravljajo odhodne smeri vedno samo na podlagi boljše ocene, se lahko zgodi, da čez čas vsebina tabele ne odraža pravih razmer v omrežju oziroma zastara. Da se to ne zgodi, se vsebine tabel občasno na novo formirajo.



Slika 141: Primer omrežja in usmerjanje s povratnim (vzvratnim) učenjem.

Najbolj preprost način delovanja vozlišča je “usmerjanje brez usmerjanja”. Vsak prispeli paket vozlišče pošlje naprej v vse možne smeri (razen v smer, iz katere prihaja paket). Tak način imenujemo preplavljanje. Preplavljanje ustvarja veliko število podvojenih paketov. Podvojeni paketi predstavljajo dodatno breme, ki zmanjša prepustnost omrežja. Zato se preplavljanje kot edina oblika usmerjanja redko uporablja, obstaja pa kot ena od možnih alternativ. Dobra lastnost preplavljanja je, da gredo paketi do naslovljenca po več poteh. Možnost, da dosežejo cilj, se poveča. Teoretično bi prišli do naslovljenca paketi po vseh možnih poteh in potemtakem tudi po najkrajši (najhitrejši). Ko pride prvi paket uspešno do cilja, naslovljenec vse kasnejše dvojnike enostavno zavrže. Da se število podvojenih paketov zadrži v obvladljivih mejah, se vozlišča štejejo število prehodov paketa skozi vozlišča. Če števec preseže dovoljeno vrednost, se paket zavrže.

Vozlišče	Ocena smeri	Smer
V_1	3	2
V_2	0	1
V_3	-	-
V_4	0	3
V_5	2	1
V_6	3	2
V_7	2	3

(a)

Vozlišče	Ocena smeri	Smer
V_1	1	1
V_2	0	1
V_3	-	-
V_4	0	3
V_5	2	1
V_6	3	2
V_7	2	3

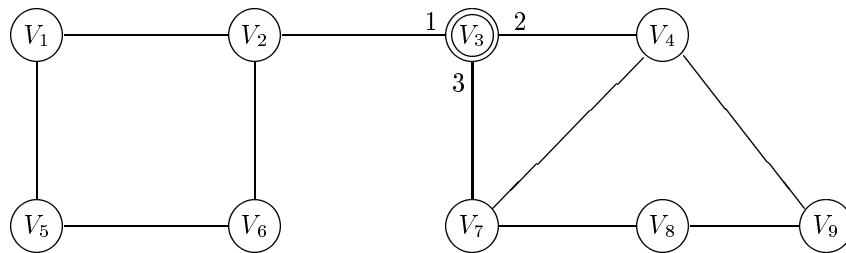
(b)

Tabela 6: Možen izgled usmerjevalne tabele za vozlišče V_3 pred (a) in po (b) prihodu paketa iz ugodnejše smeri za V_1 .

7.5.2 Porazdeljeno usmerjanje

Pri porazdeljenem načinu usmerjanja si usmerjevalne tabele izmenjujejo samo neposredno povezana vozlišča. Vsako usmerjevalno vozlišče občasno pridobi vsebine tabel od neposredno sosednjih vozlišč in jih upošteva v svoji tabeli. Vsako usmerjevalno vozlišče torej občasno pošlje svojo usmerjevalno tabelo (ali samo del tabele) svojim neposrednim sosedom in ta jo upoštevajo pri gradnji svojih tabel. Sčasoma se vsebine tabel z izmenjavo preko neposrednih sosedov razširijo po vsem omrežju.

Slika 142 prikazuje primer omrežja na katerem si bomo ogledali potek gradnje usmerjevalne tabele v vozlišču V_3 .



Slika 142: Primer porazdeljenega usmerjanja.

Vozlišče V_3 ima tri neposredne sosede, $S = \{V_2, V_4, V_7\}$. Vozlišče razpolaga tudi z ocenami kvalitete neposrednih povezav (lahko jih občasno oceni s pošiljanjem testnih paketov), $L = \{L_1 = (V_3, V_2), L_2 = (V_3, V_4), L_3 = (V_3, V_7)\} = \{5, 10, 15\}$. Denimo, da je V_3 od sosednjih vozlišč pridobilo vsebine tabel R_2, R_4 in R_7 . Deli tabel za sosednja vozlišča in vozlišče V_3 pred in po popravku tabele prikazuje tabela 7. V tabeli R_3 je za vsako znano vozlišče v omrežju zabeležena najugodnejša smer in kvaliteta poti do danega vozlišča v tej smeri.

Novo vsebino svoje tabele (ocene in smeri) določi po naslednjem pravilu:

$$C(3, i) = \min\{L_1 + C(2, i), L_2 + C(4, i), L_3 + C(7, i)\} \quad (i = 1, 2, \dots)$$

R_2 V_i	$C(2, i)$	R_4 V_i	$C(4, i)$	R_7 V_i	$C(7, i)$	R_3 V_i	Prej $C(3, i)$	Smer	R_3 V_i	Po $C(3, i)$	Smer
V_1	15	V_1	30	V_1	40	V_1	65	3	V_1	20	1
V_2	0	V_2	15	V_2	20	V_2	5	1	V_2	5	1
V_3	5	V_3	10	V_3	15	V_3	0	-	V_3	0	-
V_4	15	V_4	0	V_4	15	V_4	10	2	V_4	10	2
...

Tabela 7: Del vsebine usmerjevalnih tabel sosednjih vozlišč (R_2, R_4, R_7) in vozlišča V_3 pred in po upoštevanju tabel sosednjih vozlišč.

Primer porazdeljenega usmerjanja je usmerjanje v omrežju Internet po protokolu RIP (Routing Information Protocol). Usmerjevalniki, ki med seboj komunicirajo po protokolu RIP, pošljajo svojo usmerjevalno tabelo (ali del tabele) ali zahtevajo sosednjih vozlišč pošiljanje njihovih usmerjevalnih tabel. Uporabljena metrika (kvaliteta) je število prehodov vmesnih vozlišč po določeni poti.

Slabost porazdeljenega usmerjanja je razmeroma nestabilno delovanje. V omrežju se sicer dokaj hitro vzpostavijo optimalne poti, vendar se v primeru spremembe v omrežju (izpada nekega usmerjevalnika) ta sprememba precej pozno upošteva. V omrežju Internet je RIP zamenjal protokol OSPF (Open Shortest Path First).

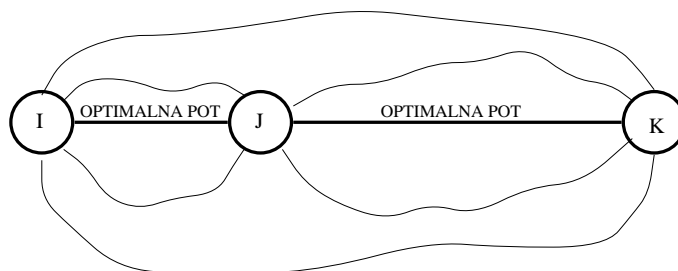
7.5.3 Globalno – centralizirano usmerjanje

Pri centraliziranem ali globalnem načinu usmerjanja se upošteva za določitev vsebine usmerjevalne tabele vsakega usmerjevalnega vozlišča stanje celotnega omrežja. Običajno eno od vozlišč (usmerjevalni center) od drugih vozlišč pridobi informacijo, na podlagi katere razbere topologijo omrežja in kvaliteto neposrednih povezav. Merilo kvalitete povezav je na primer pasovna širina povezave, prepustnost, odzivnost, geografska razdalja, cena, ali kombinacija teh. Pogosto merilo kvalitete poti je kar število vmesnih vozlišč.

Ko se na enem mestu ustvari pregled o razmerah v celotnem omrežju (ali delu omrežja), se na podlagi tega določi najugodnejše (optimalne) poti in po potrebi tudi alternativne poti med poljubnimi pari vozlišč. Usmerjevalni center potem razpošlje usmerjevalne tabele drugim vozliščem. Možno je tudi, da vsako vozlišče zase na osnovi globalne (celotne) informacije določi lastno usmerjevalno tabelo - distribucija tabel ni potrebna.

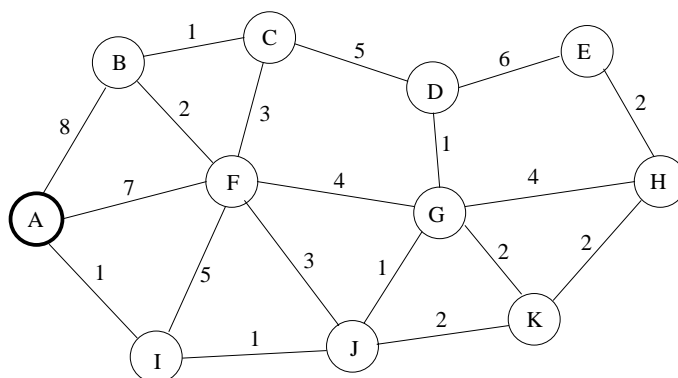
Obstaja več algoritmov za določanje optimalnih oziroma v izbrani metriki najkrajših poti. Vsi algoritmi na načelu optimalnosti (Slika 143), ki pravi: če je

vozišče J na optimalni poti med voziščema I in K, potem je tudi pot od vozišča J do K optimalna. Enako velja za pot od I do J.



Slika 143: Princip optimalnosti. Če leži vozišče J na optimalni poti med voziščema I in K, potem je tudi pot od J do K optimalna.

V nadaljevanju bomo razložili algoritem za iskanje optimalne poti, ki ga je predlagal Dijkstra. Delovanje algoritma si najlažje razložimo na konkretnem primeru. Zato si pogledjmo, kako alogiritem deluje na omrežju s topologijo in oceno kvalitete (razdalje) direktnih povezav, kot je prikazano na sliki 144.



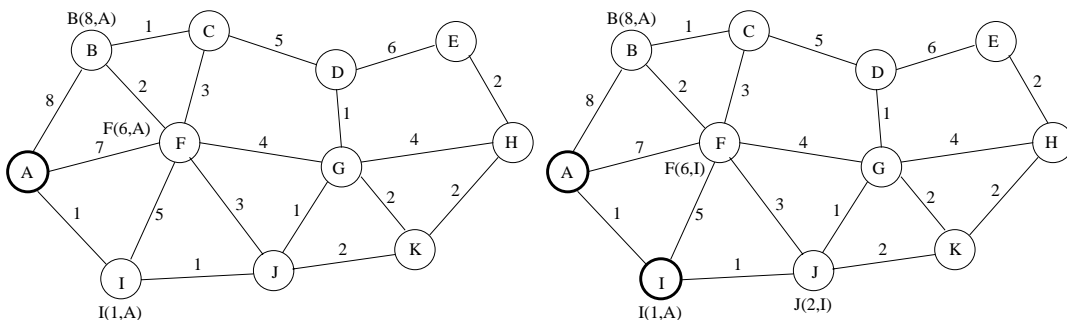
Slika 144: Iskanje optimalne poti od A do H. Prikazana je topologija omrežja in razdalje med sosednjimi vozišči. Kot permanentno je označeno začetno vozišče, to je A.

Naša naloga je, da poiščemo najkrajšo pot med voziščema A in H. Začnemo v vozišču A, ki mu sedaj rečemo “tekoče” vozišče in napredujemo proti končnemu vozišču. Vozišče A je začetek poti in ga zato označimo kot permanentno, ker je gotovo na poti, ki jo iščemo. Med napredovanjem algoritma se pomikamo od vozišča do vozišča ter jih označujemo z najkrajšo do tedaj znano potjo od začetnega vozišča. Med napredovanjem se oznaka vozišča lahko popravlja samo na bolje. Sprva ni poznana nobena pot in vozišča so označena z nedefinirano vrednostjo ali z dovolj veliko vrednostjo (v našem primeru niso označena).

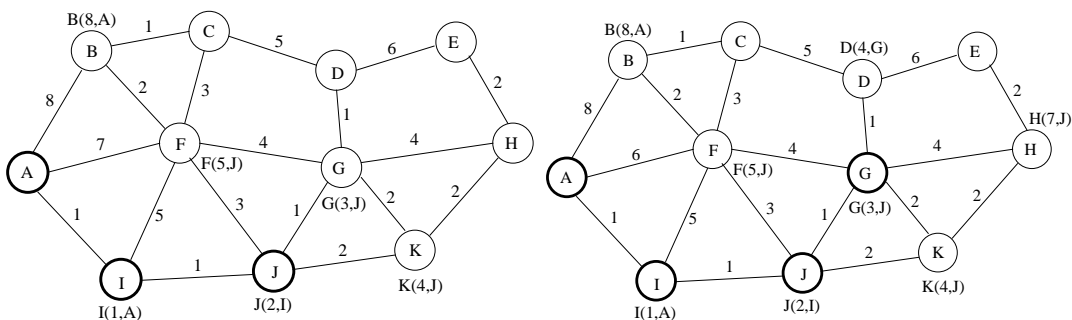
Ker je na začetku vozišče A tekoče vozišče, preiskusimo vsa njemu sosednja vozišča - izračunamo razdalje do sosednjih vozišč in ta vozišča na novo označimo.

Oznake imenujemo “poskusne”, ker je možno, da se kasneje spremenijo. Vedno, kadar na novo označimo kako vozlišče, mu pripišemo smer, od kjer smo prišli. Označevanje smeri je potrebno zato, da bomo tedaj, ko bomo na koncu poti, znali najti pot nazaj do začetnega vozlišča. Ko označimo sosede tekočega vozlišča, preiskujemo vsa označena vozlišča v omrežju. Med njimi izberemo kot naslednje permanentno tisto vozlišče, ki ima najkrajšo razdaljo do začetnega vozlišča. To vozlišče postane novo tekoče vozlišče. med napredovanjem algoritma se oznaka tega vozlišča večne spreminja.

Po prvem koraku ima vozlišče I najugodnejšo oznako. Zato ga označimo kot permanentnega in izberemo za tekočega (Slika 145). Nadaljujemo iz vozlišča I in preizkusimo njemu sosednja vozlišča. Najugodnejša je izbira vozlišča J, ki ga označimo za permanentno in nadaljujemo iz njega (Slika 146). Na enak način nadaljujemo, dokler ne označimo končnega vozlišča. S pomočjo oznak smeri najdemo pot nazaj do začetnega vozlišča (glej slike 144 do 148 in tabelo 8). Na podoben način poiščemo najkrajše poti med ostalimi pari vozlišči.



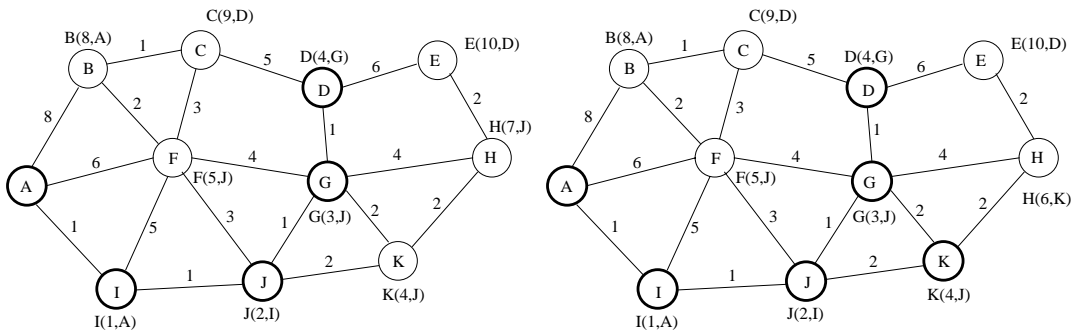
Slika 145: Določanje optimalne poti od A do H, koraka 1 in 2.



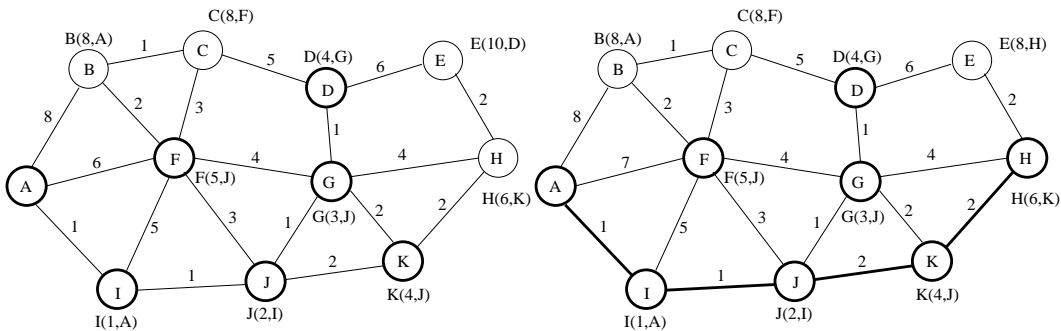
Slika 146: Določanje optimalne poti od A do H, koraka 3 in 4.

7.5.4 Usmerjanje v omrežju Internet

Omrežje Internet deluje po načelu datagram. Osnova za delovanje omrežja je IP protokol. Z IP paketi se prenaša ves omrežni promet. Usmerjanje poteka



Slika 147: Določanje optimalne poti od A do H, koraka 5 in 6.



Slika 148: Koraka 7 in 8 ter optimalna pot od A do H.

od usmerjevalnega do naslednjega usmerjevalnega vozlišča. Na podlagi ciljnega naslova (naslova končnega vozlišča) usmerjevalna vozlišča izbirajo smer, v katero se pošlje dospeli paket. Poti, po kateri poteka prenos paketa ne poznajo, pa je za usmerjanje tudi ne potrebujejo.

V pogledu usmerjanja je delovanje končnih in usmerjevalnih vozlišč zelo podobno. Glavna razlika je v tem, da končna vozlišča nikoli ne pošiljajo prispelih paketov naprej, medtem ko usmerjevalniki po potrebi pošiljajo (posredujejo) pakete naprej - imajo več mrežnih priključkov (komunikacijskih vmesnikov). Vozlišča vzdržujejo usmerjevalne tabele, ki izgledajo nekako tako, kot je prikazano v tabeli 9. Tabela je bila dobljena z UNIX ukazom

`netstat -rn`

na končnem vozlišču z imenom `luz.fe.uni-lj.si`, čigar IP naslov je 193.2.72.140.

V usmerjevalni tabeli je za vsako znano ciljno vozlišče v omrežju ali skupino vozlišč (omrežju ali delu omrežja) zabeleženo, ali je to ciljno vozlišče z njim direktno povezano ali ne. Če ni, potem je v tabeli zabeležen naslov usmerjevalnika, ki bo poskrbel, da se paket pošlje naprej v smer, ki vodi do ciljnega vozlišča.

Stolpci tabele imajo naslednji pomen:

- IP ciljni naslov (ang. Destination IP address): to je poln naslov vozlišča ali

Št. Koraka	Tekoče vozlišče	Poskusne oznake	Permanentno vozlišče
1	A	B(3,A), F(7,A), I(1,A)	I(1,A)
2	I(1,A)	J(2,I), F(6,I)	J(2,I)
3	J(2,I)	K(4,J), G(3,J), F(5,I)	G(3,J)
4	G(3,J)	H(7,G), D(4,G)	D(4,G)
5	D(4,G)	E(10,D), C(9,D)	K(4,J)
6	K(4,J)	H(6,K)	F(5,J)
7	F(5,J)	C(8,F)	H(6,K)
8	H(6,K)		

Tabela 8: Zaporedje korakov za določitev optimalne poti od A do H. Na podlagi oznak sledimo pot nazaj od končnega proti začetnemu vozlišču.

Destination	Gateway	Flags	Refs	Use	Interface	Pmtu	PmtuTime
127.0.0.1	127.0.0.1	UH	0	320455	lo0	4608	
193.2.72.140	127.0.0.1	UH	27	3201312	lo0	4608	
193.2.72	193.2.72.140	U	9	5245675	lan0	1500	
default	193.2.72.65	UG	55	3004572	lan0	1500	

Tabela 9: Primer usmerjevalne tabele končnega vozlišča v omrežju Internet.

naslov omrežja (zgornji del, t.j. omrežni del IP naslova).

- IP naslov usmerjevalnika (ang. IP address of a next-hop-router) ali naslov direktno vezanega omrežja (ang. IP address of a directly connected network). Usmerjevalnik prevzema pakete, ki jih (lokalna) vozlišča preko njega pošiljajo vozliščem na drugi strani.
- Zastavice (ang. Flags): Zastavica U pomeni, da je povezava aktivna (Up). Zastavica H (Host) pove ali je ciljni naslov naslov omrežja ali vozlišča. Če je H postavljen je to naslov vozlišča. Zastavica G (Gateway) pove ali je v stolpcy usmerjevalnik res naslov usmerjevalnika ali pa gre za direktno vezano vozlišče. V primeru, da G ni postavljen, gre za direktno povezano vozlišče.
- Ime vmesnika, na katerega se pošlje paket.
- Ostala določila (število aktivnih povezav, št. prenešenih paketov, ...).

Tabela 9 vsebuje v prvi vrstici pravilo usmerjanja za pakete, ki jih vozlišče pošlje samo sebi (lokalne pakete). V tem primeru gre za komunikacijo procesov, ki obstajajo na tem vozlišču in komunicirajo po TCT/IP protokolu. To je t.i. "loopback interface". Za ta namen rezerviran naslov je 127.0.0.1. Podobno je z drugo vrstico. Paketi, ki so poslani na naslov 193.2.72.140, to pa je naslov

vozišča samega, se zaključijo direktno - lokalno v okviru dejavnosti mrežnega sloja na tem vozišču in ne obremenjujejo omrežja. Tretja vrstica vsebuje kot ciljni naslov naslov omrežja (193.2.72) in naslov usmerjevalnika, ki je zadolžen za dostavo paketov naslovljenih na to omrežje. Zadnja vrstica je vsebuje naslov privzetega usmerjevalnika (193.2.72.65) za vse ostale ciljne naslove (ang. "default router"). Samo v zadnji vrstici gre za "pravo" usmerjanje naprej preko usmerjevalnika z naslovom 193.2.72.65 (postavljen je G), ostali naslovi so naslovi direktno vezanih vozišč. V prvih dveh vrsticah je ciljni naslov polni naslov vozišča (H je postavljen), v ostalih dveh primerih gre za naslov omrežja.

Vsebina usmerjevalne tabele se običajno določi ob začetnem zagonu vozišča. Za formiranje (dodajanje) vrstic tabele služi UNIX ukaz `route`. Na primer:

```
route add default ags-fer.fer.uni-lj.si 1
```

doda vrstico s ciljnim naslovi (default) in ime usmerjevalnika, ki je zadolžen za usmerjanje. To je "pravi" usmerjevalnik. Zadnja enka namreč pomeni število vmesnih vozišč do ciljnega (default) naslova - to pa je navedeni (vsaj razume se tako) usmerjevalnik. Nasprotno bi ničla bi pomenila direkten priključek.

V pomoč sledenju paketov obstaja UNIX ukaz `traceroute`. Izvršitev ukaza:

```
traceroute razor.fri.uni-lj.si
```

na vozišču

```
luz.fe.uni-lj.si
```

da naslednji rezultat:

```
traceroute to razor.fri.uni-lj.si (193.2.76.37), 30 hops max, 20 byte packets
 1 ags-fer.fer.uni-lj.si (193.2.72.65)          1 ms    1 ms    1 ms
 2 razor.fri.uni-lj.si (193.2.76.37)         2 ms    2 ms    2 ms
```

Algoritem usmerjanja pa je naslednji:

- Ciljni naslov paketa se primerja s ciljnim naslovi tabele. V primeru zadetka, se postopa takole. Če je vozišče s ciljnim naslovom direktno priključeno, se pošlje na ta naslov. V nasprotnem primeru se pošlje usmerjevalniku, ki je naveden v pripadajoči vrstici tabele.
- V primeru, da naslova vozišča ni v tabeli, se v tabeli išče ujemenje naslova ciljnega omrežja paketa, naprej se postopa enako.
- Če se naslova v tabeli ne najde, se uporabi privzeti usmerjevalnik.

V primeru, da se ciljnega vozlišča ne najde, sledi sporočilo napake “host unreachable” ali “network unreachable”.

Literatura

- [1] W. R. Stevens, *TCP/IP Illustrated, Vol. 1*, Addison–Wesley, 1994.
- [2] A. Tanenbaum, *Computer Networks*, 3rd ed. Prentice-Hall 1996.