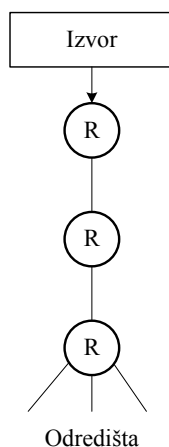


ŠIROKOPOJASNE TELEKOMUNIKACIONE MREŽE
– Poglavlje 5 –

5 IP multikast

Multikast saobraćaj dobija na sve većem značaju u današnjim IP mrežama i njegov udeo u ukupnom saobraćaju postaje sve veći. Pod multikastom se podrazumevaju sledeći tipovi saobraćaja:

- Jedan predajnik šalje saobraćaj grupi prijemnika (*one to many*) - Tipične aplikacije za ovaj slučaj su onlajn predavanja, onlajn prezentacije, slanje obaveštenja grupi pretplatnika poput najnovijih vesti, vremenske prognoze, stanja na berzi i sl, distribucija mrežnog vremena uređajima u mreži itd.
- Grupa predajnika šalje saobraćaj grupi prijemnika (*many to many*) - Tipične aplikacije za ovaj slučaj su multimedijalne konferencijske sesije, sinhronizacija baza podataka, onlajn predavanje sa mogućnošću da učesnici postave pitanje predavaču (učenje na daljinu), onlajn igranje sa više učesnika (*multiplayer*) itd.
- Grupa predajnika šalje saobraćaj jednom prijemniku (*many to one*) - Tipične aplikacije za ovaj slučaj su aukcije gde ponuđač skuplja ponude, prikupljanje podataka, itd. Važno je naglasiti da je ovaj tip multikasta najproblematičniji sa stanovišta skalabilnosti pošto prijemnik može da se zaguši prevelikom količinom saobraćaja. Takođe, mehanizam komunikacije za ovaj tip multikasta još uvek nije dobro dokumentovan i standardizovan.



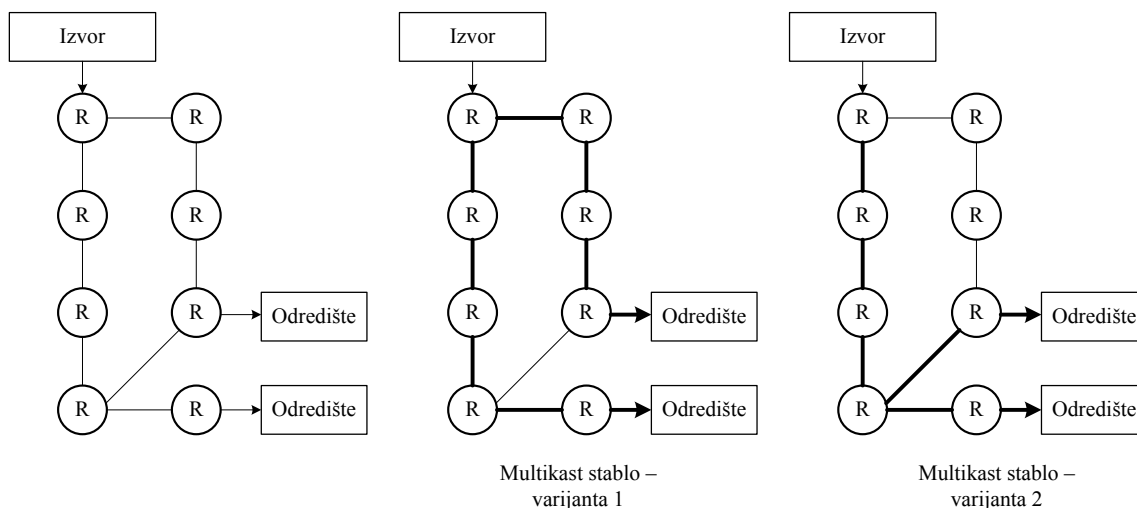
Slika 5.1. Primer multikast komunikacije

Generalno, multikast komunikacija bi se mogla organizovati u vidu većeg broja simultanih unicast komunikacija. Na primer, kada predajnik šalje saobraćaj grupi prijemnika, predajnik bi mogao da uspostavi unicast vezu sa svakim od prijemnika i da svakom prijemniku ponaosob šalje primerak paketa. Međutim, ovakav pristup nije dobro rešenje iz nekoliko razloga. Prvi razlog je neefikasno korišćenje mrežnih resursa, kao što se može videti i sa slike 5.1. Naime, ako predajnik šalje saobraćaj po unicast principu grupi od, na primer, 1000 prijemnika, tada bi mreža morala da prenese 1000 primeraka istog paketa (razlika bi bila samo u zaglavlju paketa) i možemo videti da bi linkovi mreže, koji vode do rutera na kom se saobraćaj račva, nepotrebno prenosili 999 suvišnih kopija paketa. Lako je zaključiti da bi primena unicast principa brzo dovela do zagušenja mreže nepotrebnim kopijama paketa, naročito u slučaju velikog broja takvih komunikacija u kojima učestvuje velik broj prijemnika. Drugi problem je preopterećenje samog

predajnika i njegovog mrežnog interfejsa prevelikim brojem unicast komunikacija i prevelikim brojem paketa koje predajnik mora generisati, čime bi predajnik bio preopterećen i samim tim bi bila ugrožena skalabilnost takve komunikacije sa stanovišta veličine grupe prijemnika.

Da bi se sprečili ovakvi problemi koristi se multikast komunikacija. U okviru IP mreže, predajnik bi paket poslao na multikast adresu dodeljenu dotičnoj multikast sesiji (grupi). Predajnik bi poslao samo jedan primerak paketa, a ruteri bi potom pravili neophodne kopije paketa u tačkama račvanja prema prijemnicima poput najdonjeg rutera sa slike 5.1. Takođe, predajnik ne bi vodio računa o tome koji prijemnici su priključeni na sesiju čime je predajnik dodatno rasterećen. Sami prijemnici bi se prijavljivali svojim lokalnim ruterima na multikast sesije koje ih interesuju, a takođe bi se njima i odjavljivali.

Da bi multikast mogao da funkcioniše neophodne su dve bitne komponente - mehanizam prijavljivanja/odjavljivanja prijemnika na multikast sesiju i mehanizam komunikacije rutera u mreži da bi se kreiralo multikast stablo prosleđivanja. Mehanizam prijavljivanja/odjavljivanja treba da omogući korisnicima da se jednostavno mogu priključiti na željenu multikast sesiju, kao i odjavljivanje sa nje. Pri tome, za neke aplikacije je veoma važno da prijava i odjava budu veoma brzo odrađene pa se i o tome mora voditi računa. Na primer, ako korisnik koristi servis IP televizije, gde svaki kanal predstavlja jednu multikast sesiju (grupu), neophodno je omogućiti da, prilikom menjanja kanala, odjavljivanje sa tekuće multikast grupe i prijavljivanje na novu grupu bude što brže jer prevelike pauze između promena kanala smetaju korisniku. Multikast stablo prosleđivanja predstavlja stablo kojeg čine mrežni čvorovi i linkovi u mreži, kao i predajnik i prijemnici u čijem korenu se nalazi predajnik, a čiji listovi su prijemnici. Paketi koje šalje predajnik putuju kroz mrežu prolazeći multikast stablo prosleđivanja formirano za dotičnu multikast sesiju. U čvorovima gde se stablo grana se formiraju dodatne kopije paketa. Na ovaj način paket stiže do svih listova u stablu, odnosno do svih prijemnika u stablu. Kako se novi prijemnik prijavi u grupu, multikast stablo se ažurira, a isto važi i za odjavu prijemnika iz grupe.



Slika 5.2. Multikast stablo prosleđivanja

Međutim, multikast ima i određene probleme prilikom implementacije. Prvi problem je konstruisanje optimalnog multikast stabla prosleđivanja. Ako se pogleda primer sa slike 5.2 mogu se videti dve varijante multikast stabla. U prvoj varijanti se koristi najkraća putanja do svakog od prijemnika, a u drugoj varijanti se optimalnije koriste linkovi u mreži, odnosno, manji broj linkova je opterećen paketima koje šalje izvor. Očigledno, ako je cilj smanjiti opterećenje

mreže bolja je varijanta 2. Prilikom konstruisanja multikast stabla mogu se koristiti i drugi kriterijumi pored optimalnog iskorišćenja propusnog opsega mreže, poput kašnjenja. Očigledno, nije lako konstruisati optimalno multikast stablo, naročito ako je potrebno kreirati multikast stablo sa velikim brojem listova (list predstavlja prijemnik multikast sesije). Ovaj problem se i dalje istražuje, i pokušavaju se naći što efikasniji i kvalitetniji algoritmi za rešavanje ovog problema.

Drugi značajan problem je multikast prosleđivanje u samim mrežnim čvorovima tj. ruterima u slučaju IP mreža. Naime, velik broj komutatora je predviđen za unicast prosleđivanje i ne podržava multikast prosleđivanje. Otuda kada paket stigne u ruter koji mora da umnoži paket u više primeraka i prosledi ga na odgovarajuće izlazne portove (u skladu sa multikast stablom kome ruter pripada) ovi ruteri formiraju odgovarajući broj primeraka paketa i prosleđuju, odnosno komutiraju ih kao unicast pakete. Međutim, ovo značajno povećava opterećenje komutatora pa može da dođe do zagušenja rutera i time nepotrebnog odbacivanja paketa. Čak i ruteri čiji komutatori podržavaju multikast pakete i njihovo komutiranje imaju često problem u efikasnom raspoređivanju multikast paketa za komutaciju (na primer, algoritmi raspoređivanja u komutatorima sa baferima na ulazu). Pošto su multikast paketi u generalnom slučaju namenjeni većem broju izlaznih portova, dolazi i do problema u strukturi tabela usmeravanja čiji zapisi postaju veći jer moraju da imaju mogućnost mapiranja većeg broja izlaznih portova. Svi navedeni problemi su i dalje aktuelni i velik broj istraživanja je posvećen njihovom rešavanju.

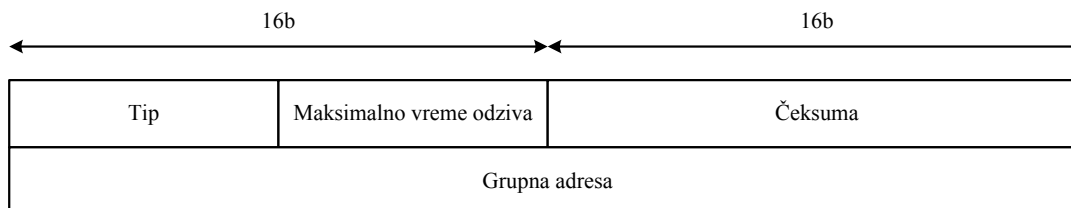
Postoje i drugi problemi multikast saobraćaja poput kreiranja multikast stabala koja se protežu na više autonomnih sistema, pouzdanog prenosa, kvaliteta servisa i dr. U slučaju kreiranja multikast stabla koje se proteže na više autonomnih sistema neophodno je uspostaviti mehanizme dogovora između provajdera koji će omogućiti kreiranje takvih multikast stabala da bi se dobila na kraju globalna pokrivenost koja za sada još uvek nije postignuta. Multikast proširenje BGP protokola (MBGP) je kreirano da razreši ovakve probleme. Pošto predajnik šalje jedan primerak paketa, a taj primerak paketa prima velik broj prijemnika na različitim lokacijama lako je moguće da neki prijemnici prime paket sa greškama ili da ga čak i ne prime uopšte. U nekim aplikacijama je potrebno omogućiti mehanizme retransmisije takvih paketa, pa je razvijeno nekoliko protokola koji pokušavaju razrešiti ovaj problem pošto je IP multikast inicijalno zamišljen kao nepouzdan servis (koji koristi UDP za transport). Protokoli koji su predloženi za postizanje pouzdanog multikast prenosa su PGM (*Pragmatic General Multicast*) definisan u RFC 3208, NORM (*NACK Oriented Reliable Multicast*) definisan u RFC 5401 i RFC 5748, FLUTE (*File Delivery over Unidirectional Transport*) definisan u RFC 6726. U slučaju implementacije i kvaliteta servisa mogu se koristiti protokoli koji omogućavaju podršku za kvalitet servisa poput RSVP protokola koji smo već opisali.

Kao što smo već naveli, za multikast su bitne dve komponente. Prva komponenta je prijavljivanje i odjavljivanje korisnika u i iz multikast sesije. Protokol koji se koristi u ovu svrhu u IPv4 mrežama je IGMP (*Internet Group Management Protocol*) pri čemu su u upotrebi tri verzije IGMPv1, IGMPv2 i IGMPv3. MLD (*Multicast Listener Discovery*) protokol se koristi u IPv6 mrežama, pri čemu postoje verzije MLDv1 i MLDv2. Druga komponenta je kreiranje protokola rutiranja koji omogućavaju podršku za usmeravanje multikast saobraćaja, odnosno za kreiranje multikast stabla. Najčešće korišćen protokol je PIM (*Protocol Independent Multicast*), ali pored njega su definisana i proširenja postojećih unicast protokola rutiranja poput MBGP, MOSPF i dr. U nastavku poglavlja ćemo prvo predstaviti IGMP protokol verzije 2 i 3, MLD

protokol verzije 1 i 2, a potom ćemo predstaviti i PIM protokol kao najpoznatije i najčešće korišćene multikast protokole.

5.1. IGMPv2

IGMPv2 protokol je definisan u RFC 2236. Princip funkcionisanja ovog protokola je veoma jednostavan. IGMP ruter periodično šalje na sve mreže sa korisnicima, koje su na njega priključene, upite za multikast grupe koje su njemu poznate. Pod IGMP ruterom se podrazumeva ruter koji podržava IGMP protokol (u ovom slučaju verziju 2). Hostovi koji su priključeni na dotične grupe šalju svoje izveštaje na primljene upite na osnovu kojih IGMP ruteri prate za koje multikast grupe postoje aktivni članovi. IGMP ruter će prosleđivati multikast IP pakete neke multikast grupe samo na one mreže sa korisnicima u kojima postoje aktivni korisnici za dotičnu grupu. Kada korisnik želi da se pridruži određenoj multikast grupi, on će automatski poslati svoj izveštaj u kojoj će navesti dotičnu multikast grupu na osnovu čega će IGMP ruter prepoznati da se pojavio novi aktivni član što je bitno ako je u pitanju prvi aktivni član grupe te korisničke mreže, jer će tako IGMP ruter najbrže početi da prosleđuje multikast pakete te grupe dotičnoj korisničkoj mreži. Kada korisnik želi da napusti grupu, onda će, u slučaju da je on poslednji aktivni član te korisničke mreže, poslati poruku napuštanja da bi signalizirao IGMP ruteru što pre da ne mora više da prosleđuje multikast pakete te grupe dotičnoj korisničkoj mreži. U slučaju da je na korisničku mrežu povezano više IGMP rutera, tada će samo jedan slati upite (onaj čija je IP adresa najmanja). Inače, IGMPv2 je kompatibilan unazad sa IGMPv1 verzijom. Osnovna razlika u odnosu na IGMPv1 verziju je upotreba poruka napuštanja multikast grupe koje ne postoje u IGMPv1. Ovim porukama je omogućeno da IGMP ruter brže detektuje da u nekoj mreži više nema aktivnih članova za neku grupu.



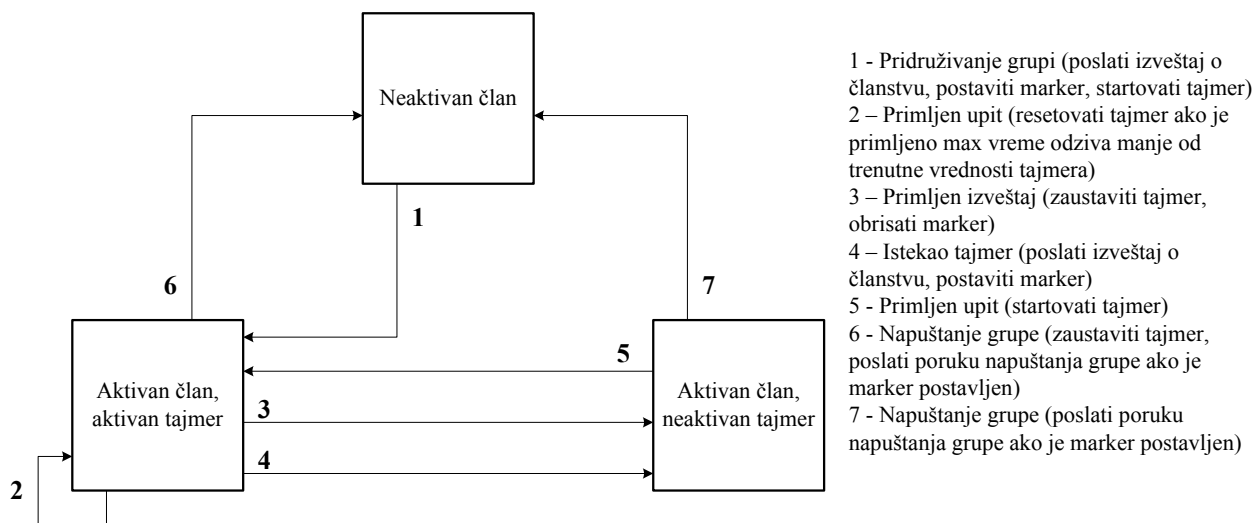
Slika 5.1.1. IGMPv2 paket

IGMPv2 paket se šalje direktno tj. ima svoj protokol ID u IPv4 zaglavlju kao, na primer, ICMP protokol. Protokol ID ima vrednost 2 za IGMPv2 pakete. Struktura IGMPv2 paketa je prikazana na slici 5.1.1 i sastoji se iz sledećih delova:

- Tip (*Type*) - Tip IGMPv2 poruke. Vrednost 0x11 označava da je u pitanju upit članstva (*Membership Query*). Vrednost 0x16 označava da je u pitanju izveštaj o članstvu (*Version 2 Membership Report*). Vrednost 0x17 označava poruku napuštanja multikast grupe (*Leave Group*). Pošto je IGMPv2 dizajniran da bude kompatibilan unazad sa IGMPv1 definisan je i tip vrednosti 0x12 koji označava izveštaj o članstvu kojeg je generisao host koji koristi IGMPv1. Napomenimo da postoje dva tipa upita članstva - opšti upit (*General Query*) i specifikiran upit (*Group Specific Query*). Opšti upit se odnosi na sve multikast grupe, a specifikiran upit na određenu multikast grupu. U slučaju opšteg upita polje grupna adresa se popunjava nulama, a u slučaju specifikiranog upita popunjava se multikast adresom dotične grupe za koju se vrši upit. Opšti upit se šalje na

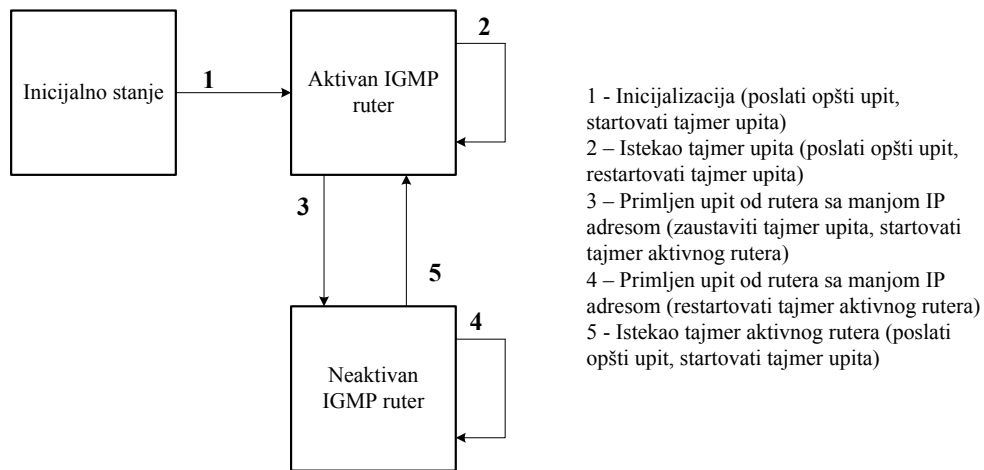
multikast adresu 224.0.0.1 da bi svi hostovi dotične korisničke mreže primili dotični upit. Specificirani upit se šalje na multikast adresu dotične grupe. U slučaju poruka koje generišu hostovi (poruke izveštaja o članstvu i poruke napuštanja multikast grupe), TTL polje u IP zaglavlju se postavlja na 1 da bi se sprečila propagacija paketa dalje u Internet mrežu. Poruka napuštanja multikast grupe se šalje na multikast adresu 224.0.0.2 da bi svi IGMP ruteri priključeni na dotičnu mrežu primili ovu poruku. Izveštaj o članstvu se šalje na multikast adresu dotične grupe na koju se odnosi izveštaj.

- **Maksimalno vreme odziva (*Max Response Time*)** - Ovo polje ima važnost samo za poruke upita, a u ostalim porukama se postavlja na 0 i ne tumači na prijemu. Vrednost polja predstavlja broj desetih delova sekunde. U slučaju upita predstavlja maksimalno vreme za koje treba poslati izveštaj o članstvu. Podešavanjem ovog vremena se može smanjiti veličina bursta IGMP generisanog saobraćaja. Naime, hostovi šalju izveštaj nakon slučajno odabranog vremena koje se kreće u granicama od 0 do maksimalnog vremena odziva iz primljenog upita. Otuda veća vrednost ovog polja smanjuje verovatnoću da će više hostova slati svoje izveštaje u isto vreme, pa samim tim se smanjuje i veličina bursta IGMP saobraćaja. S druge strane, manja vrednost ovog polja omogućava bržu detekciju nepostojanja aktivnih članova grupe u slučaju da se ne primi poruka napuštanja grupe od poslednjeg aktivnog člana koji je napustio grupu.
- **Čeksuma (*Checksum*)** - Zaštitno polje koje se koristi za detekciju grešaka u prenosu. Računa se identično kao čeksuma u IP zaglavlju, pri čemu u proračun ulazi kompletna IGMP poruka.
- **Grupna adresa (*Group Address*)** - U slučaju specificiranog upita predstavlja multikast adresu grupe za koju se vrši upit tj. traže izveštaji od njenih članova. U slučaju poruka izveštaja o članstvu ili napuštanja grupe predstavlja multikast adresu grupe na koju se dotične poruke odnose. Ako je u pitanju opšti upit ovo polje se popunjava nulama.



Slika 5.1.2. Dijagram stanja hosta za jednu multikast grupu

Na slici 5.1.2 je prikazan dijagram stanja konačnog automata hosta po kom se izvršava IGMPv2 protokol za jednu multikast grupu. Inicijalno host je neaktivan član za sve multikast grupe (ovo stanje se u suštini ne beleži u hostu tj. ovo stanje ne troši resurse hosta). Kada host poželi da se pridruži nekoj multikast grupi poslaće izveštaj o članstvu za tu dotičnu grupu. Pri tome će postaviti marker kojim označava da je on poslednji aktivan član grupe (host kreće sa pretpostavkom da je jedini član grupe u dotičnoj korisničkoj mreži). Host tako prelazi u stanje aktivan član, aktivan tajmer. Ako host u tom stanju primi upit tada će restartovati tajmer u slučaju da je trenutna vrednost tajmera veća od maksimalnog vremena odziva iz primljenog upita. Ako u stanju aktivan član, aktivan tajmer primi izveštaj od nekog drugog aktivnog člana tada će obrisati marker jer zna da nije jedini aktivan član, zaustaviće tajmer i preći u stanje aktivan član, neaktivan tajmer jer nema potrebe da generiše izveštaj za IGMP ruter pošto je to već uradio neki drugi član grupe i time označio ruteru da postoje aktivni članovi grupe. Ako u stanju aktivan član, aktivan tajmer istekne tajmer, host će poslati izveštaj o članstvu i postaviti marker jer je on potencijalno poslednji aktivan član i preći će u stanje aktivan član, neaktivan tajmer. Ako primi upit u stanju aktivan član, neaktivan tajmer tada će startovati tajmer i preći u stanje aktivan član, aktivan tajmer. U slučaju da host želi da napusti grupu, tada će u slučaju da se nalazi u stanju aktivan član, aktivan tajmer zaustaviti tajmer i ukoliko je marker postavljen poslaće i poruku napuštanja grupe jer host misli da je poslednji aktivan član grupe. Takođe, host će preći u stanje neaktivan član. U slučaju da se host nalazi u stanju aktivan član, neaktivan tajmer tada će host samo preći u stanje neaktivan član i pri tome će ukoliko je marker postavljen poslati i poruku napuštanja grupe jer host misli da je poslednji aktivan član grupe.

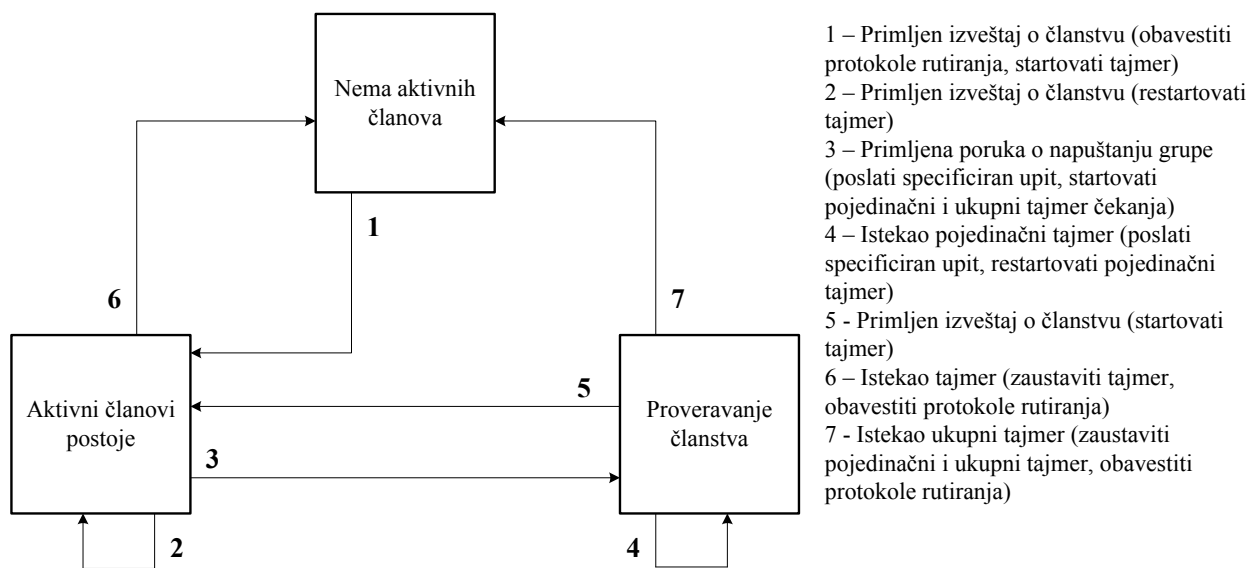


Slika 5.1.3. Dijagram stanja IGMP rutera za određivanje da li je ruter aktivan na mreži ili ne

Sa stanovišta IGMP rutera postoje dva dijagrama stanja na nivou jedne korisničke mreže. Prvi dijagram stanja određuje da li je IGMP ruter aktivan u mreži ili ne, pošto na istu mrežu može biti priključeno više IGMP rutera, a samo jedan sme da šalje upite. Pod pojmom aktivan podrazumevamo IGMP aktivnosti, a ne prosleđivanje unicast saobraćaja. Ovaj dijagram je prikazan na slici 5.1.3. Inicijalno se ruter nalazi u inicijalnom stanju. Ruter tada generiše opšti upit (pošto ne zna da li postoje i drugi IGMP ruteri na dotičnoj mreži) i startuje tajmer upita. Pri tome, ruter prelazi u aktivno stanje. Kada tajmer upita istekne, ruter restartuje taj tajmer i šalje ponovo opšti upit. Ako ruter primi upit od rutera sa manjom IP adresom, tada ruter prelazi u neaktivno stanje i startuje tajmer aktivnog rutera kojim prati aktivnost drugog rutera koji je aktivan na mreži (takođe ruter koji je prešao u neaktivno stanje zaustavlja tajmer upita). Svaki put kad neaktivni ruter primi upit od rutera sa manjom IP adresom, restartuje se tajmer aktivnog

rutera. Ako tajmer aktivnog rutera istekne, ruter prelazi u aktivno stanje, pri čemu šalje opšti upit i startuje tajmer upita.

Dijagram stanja ponašanja rutera u slučaju kada je aktivan (šalje upite) na nivou jedne multikast grupe je prikazan na slici 5.1.4. Inicijalno ruter se nalazi u stanju nema aktivnih članova. Onog momenta kada primi izveštaj o članstvu za dotičnu grupu prelazi u stanje aktivni članovi postoje. Tada ruter obaveštava protokole rutiranja da bi postavili tabelu usmeravanja tako da multikast paketi namenjeni dotičnoj grupi budu usmeravani i na mrežu koja ima aktivne članove te grupe. Ruter startuje i tajmer. Svaki put kada se primi izveštaj o članstvu dotične grupe tajmer se restartuje. Ako se primi poruka o napuštanju dotične grupe, ruter prelazi u stanje proveravanja članstva. Naime, host bi trebao da pošalje poruku o napuštanju grupa samo ako smatra da je on poslednji aktivni član. Ruter tada šalje specificirani upit za dotičnu grupu i aktivira pojedinačan i ukupni tajmer. Pojedinačan tajmer definiše periode slanja specificiranog upita, a ukupni tajmer broj pokušaja tj. slanja specificiranog upita. Kada u stanju proveravanja članstva istekne pojedinačni tajmer, šalje se ponovo specificirani upit i restartuje se pojedinačni tajmer. Ako ukupni tajmer istekne, prelazi se u stanje nema aktivnih članova i obaveštavaju se protokoli rutiranja, tako da se ažurira tabela usmeravanja da se paketi dotične multikast grupe više ne bi usmeravali na ovu mrežu jer ona više nema aktivnih članova. Ako se u stanju proveravanje članstva primi izveštaj o članstvu dotične grupe, prelazi se u stanje aktivni članovi postoje i startuje se tajmer. Ako u stanju aktivni članovi postoje istekne tajmer, smatra se da više nema aktivnih članova dotične grupe i prelazi se u stanje nema aktivnih članova, pri čemu se obaveštavaju protokoli rutiranja, tako da se ažurira tabela usmeravanja da se paketi dotične multikast grupe više ne bi usmeravali na ovu mrežu jer ona više nema aktivnih članova.



Slika 5.1.4. Dijagram stanja rada aktivnog IGMP rutera na nivou jedne multikast grupe

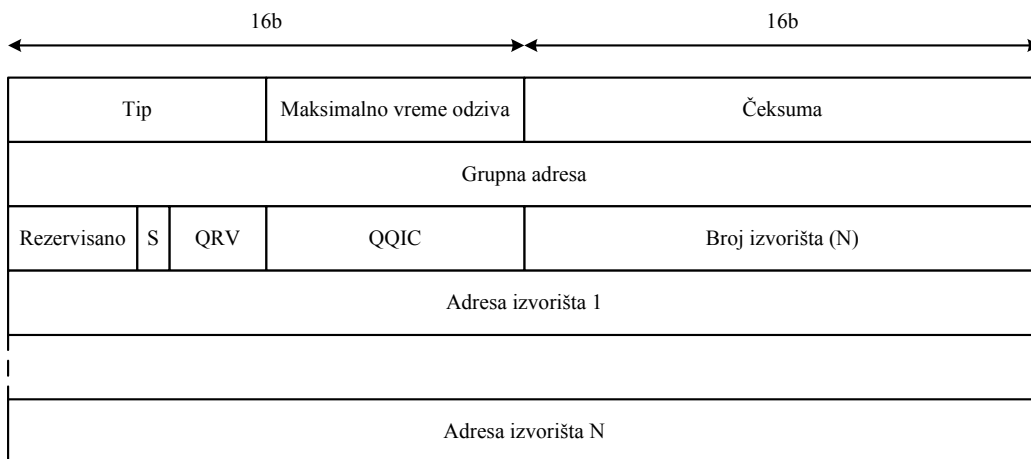
5.2. IGMPv3

IGMPv3 protokol je definisan u RFC 3376 i RFC 4604. IGMPv3 je kompatibilan unazad sa verzijama IGMPv2 i IGMPv1. Princip funkcionisanja ovog protokola je gotovo identičan IGMPv2 protokolu. Suštinska razlika je u podršci filtriranju izvorišta koju donosi IGMPv3. Naime, u IGMPv3 hostovi mogu da deklarišu listu izvorišta u multikast grupi od kojih žele da

primaju sadržaj, a takođe mogu da deklarišu listu izvorišta u multikast grupi od kojih ne žele da primaju sadržaj. Na osnovu ovih podataka IGMP ruter može da postavi filtre i da propušta samo pakete onih izvorišta u multikast grupi za koje postoje zainteresovani aktivni članovi grupe, a takođe multikast protokoli rutiranja na osnovu ovih informacija mogu da adekvatno ažuriraju multikast stabla odgovarajućih izvorišta. IGMPv3 paket se šalje direktno tj. ima svoj protokol ID u IPv4 zaglavlju kao, na primer, ICMP protokol. Protokol ID ima vrednost 2 za IGMPv3 pakete, tj. vrednost je ista kao i za IGMPv2 pakete radi ostvarivanja kompatibilnosti unazad.

Tipovi poruka u IGMPv3 su:

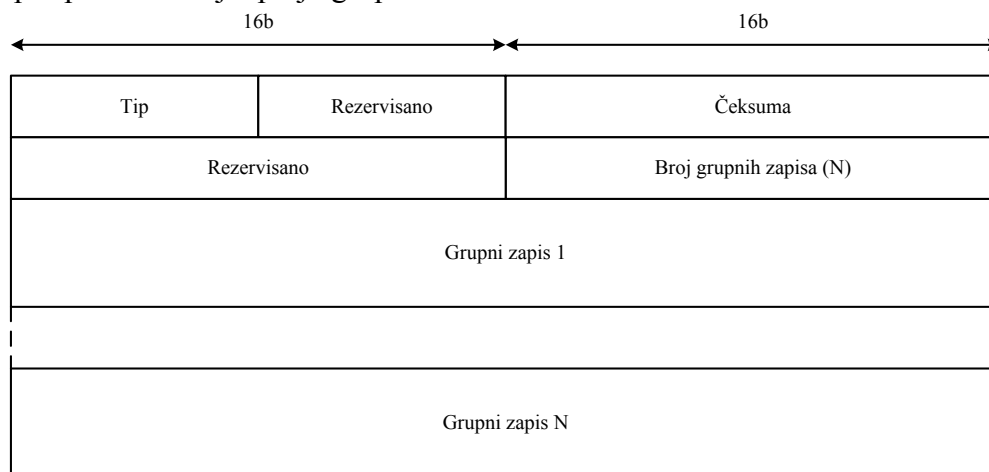
- Upit članstva (*Membership Query*) - Polje tip ima vrednost 0x11.
- Izveštaj o članstvu (*Version 3 Membership Report*) - Polje tip ima vrednost 0x22.
- Izveštaj o članstvu verzije 2 (*Version 2 Membership Report*) - Polje tip ima vrednost 0x16.
- Izveštaj o članstvu verzije 1 (*Version 1 Membership Report*) - Polje tip ima vrednost 0x12.
- Poruka o napuštanju grupe verzije 2 (*Version 2 Leave Group*) - Polje tip ima vrednost 0x17.



Slika 5.2.1. Upit članstva

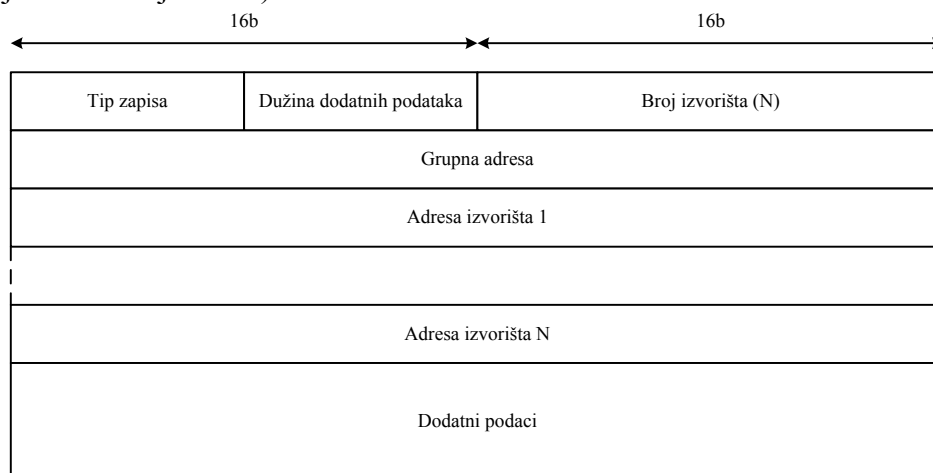
Poslednje tri navedene poruke su neophodne za kompatibilnost unazad sa IGMPv2 i IGMPv1 verzijama IGMP protokola. Struktura upita članstva je prikazana na slici 5.2.1. Sada postoje tri vrste upita - opšti upit, specificirani upit koji se odnosi na grupu i specificirani upit koji se odnosi na grupu i izvore. Prva dva reda imaju ista tumačenja kao i u slučaju IGMPv2 verzije protokola, samo u slučaju da je vrednost polja maksimalnog vremena odziva veća od 127 tad a tri b ita ovog polja čine eksponent, a četiri b ita mantisu pa se broj desetinki računa po formuli $(mant | 0x10) \ll (exp + 3)$. Grupna adresa se i dalje postavlja na nule u slučaju opšteg upita, odnosno na grupnu adresu odgovarajuće grupe (na koju se odnosi upit) u slučaju specificiranih upita. Kao što vidimo prva dva reda imaju istu strukturu kao i u slučaju IGMPv2 protokola, što je bitno zbog kompatibilnosti unazad. IGMPv3 definiše i nova polja u upitu. S (*Suppress Router-Side Processing*) bit se tumači samo u IGMP ruterima i ukoliko je setovan označava ruteru koji je primio upit da potisne regularna ažuriranja tajmera koja se odnose na upite (setimo se da se upiti šalju na multikast adrese - opšti na adresu 224.0.0.1, a specificirani na

multikast adresu odgovarajuće grupe na koju se upit odnosi). QRV (*Querier's Robustness Variable*) predstavlja tzv. varijablu robusnosti aktivnog IGMP rutera na mreži (onoga sa najmanjom IP adresom). Ova varijabla je u suštini parametar koji je srazmeran broju restartovanja pojedinačnog tajmera sa slike 5.1.4. Koristi se za povećanu otpornost na paketske greške u mrežama (za mreže sa većim gubicima paketa se podešava veća vrednost ove varijable) jer se pruža više šansi poslednjem aktivnom članu neke grupe da pošalje izveštaj. QQIC (*Querier's Query Interval Code*) predstavlja periodu slanja opštih upita aktivnog IGMP rutera na mreži (onoga sa najmanjom IP adresom). Vrednost ovog polja se tumači na identičan način kao maksimalno vreme odziva. Broj izvorišta definiše broj adresa izvorišta koji je stavljen u upit. Vrednost ovog polja je 0 u slučaju opšteg upita i specificiranog upita koji se odnosi na grupu, a veća od nule u slučaju specificiranog upita koji se odnosi na grupu i izvore. Adresa izvorišta predstavlja unikat adresu izvorišta koji šalje podatke (predstavlja jedan od izvora) na multikast adresu grupe specificiranoj u polju grupna adresa.



Slika 5.2.2. Izveštaj o članstvu

Struktura izveštaja o članstvu je prikazana na slici 5.2.2. Tip i čeksuma se tumače isto kao u IGMPv2 verziji. Broj grupnih zapisa definiše broj grupnih zapisa uključenih u izveštaj, a potom se ređa odgovarajući broj grupnih zapisa. Izveštaji o članstvu (verzije 3) se šalju na multikast adresu 224.0.0.22 (izveštaji o članstvu starijih verzija 1 i 2 se šalju na multikast adresu grupe na koju se izveštaj odnosi).



Slika 5.2.3. Grupni zapis

Struktura jednog grupnog zapisa je prikazana na slici 5.2.3. Tip zapisa označava kao se tumači dotični zapis. Postoje sledeći tipovi zapisa:

- Uključiti (*MODE_IS_INCLUDE*) - Vrednost 1. Signalizira da su adrese izvorišta navedene u zapisu poželjne tj. da se sa njih želi primati sadržaj.
- Isključiti (*MODE_IS_EXCLUDE*) - Vrednost 2. Signalizira da adrese izvorišta navedene u zapisu nisu poželjne tj. da se sa njih ne želi primati sadržaj.
- Promena na uključiti (*CHANGE_TO_INCLUDE_MODE*) - Vrednost 3. Signalizira promenu za navedene adrese izvorišta sa nepoželjnih na poželjne.
- Promena na isključiti (*CHANGE_TO_EXCLUDE_MODE*) - Vrednost 4. Signalizira promenu za navedene adrese izvorišta sa poželjnih na nepoželjne.
- Dodati na listu (*ALLOW_NEW_SOURCES*) - Vrednost 5. Signalizira adrese izvorišta koje treba dodati na listu izvorišta dotične grupe. Prethodno navedeni tipovi manipulišu sa adresama izvorišta uključenim u listu izvorišta sa stanovišta njihovog filtriranja.
- Skinuti sa liste (*BLOCK_OLD_SOURCES*) - Vrednost 6. Signalizira adrese izvorišta koje treba skinuti sa liste izvorišta dotične grupe.

Dužina dodatnih podataka označava dužinu (u 32-bitnim rečima) dodatnih podataka ukoliko su oni uključeni u zapis. Dodatni podaci nose dodatne informacije vezane za zapis u kome se nalaze. IGMPv3 ne specificira dodatne podatke, pa je očigledno ovo polje definisano za buduću upotrebu, odnosno u IGMPv3 protokolu se dužina dodatnih podataka postavlja na 0. Broj izvorišta definiše broj adresa izvorišta navedenih u zapisu, a grupna adresa predstavlja multikast adresu dotične grupe. Nakon multikast adrese dotične grupe, ređaju se adrese izvorišta.

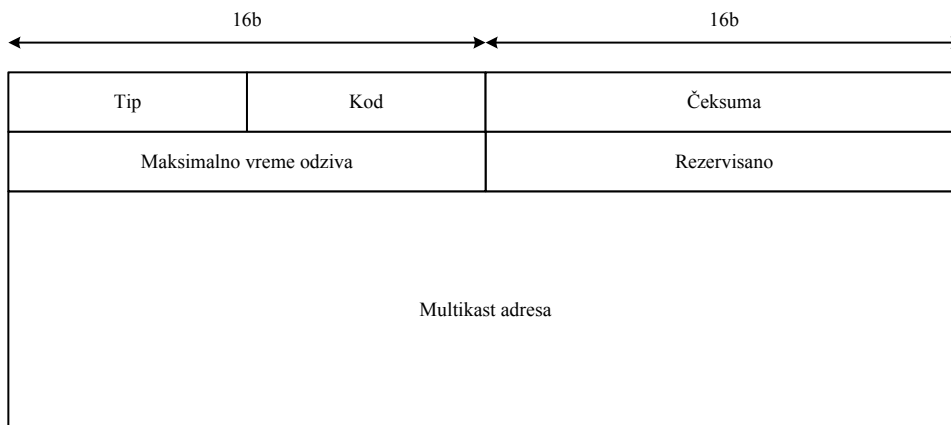
5.3. MLD

MLD protokol je ekvivalent IGMP protokolu u IPv6 mrežama, pri čemu su definisane dve verzije MLDv1 i MLDv2. MLDv1 verzija je definisana u RFC 2710 i implementira funkcionalnosti IGMPv2 protokola samo u IPv6 mrežama, a MLDv2 verzija je definisana u RFC preporukama RFC 3810 i RFC 4604 i implementira funkcionalnosti IGMPv3 protokola samo u IPv6 mrežama. MLD poruke (i verzije 1 i verzije 2) se prenose direktno u IPv6 paketima, pri čemu je vrednost Next Header pokazivača 58 (i ovde je *hop limit* polje IPv6 zaglavlja postavljeno na vrednost 1 - *hop limit* polje je ekvivalent TTL polja iz IPv4 zaglavlja).

Princip rada MLDv1 protokola je funkcionalno identičan radu IGMPv2 protokola. Razlike postoje samo u tehničkim detaljima usled razlika između IPv4 i IPv6 mreža. Na primer, adrese su četiri puta duže u IPv6 mrežama. Struktura MLDv1 poruke, prikazana na slici 5.3.1, je veoma slična IGMPv2 poruci. Tipovi MLDv1 poruka su identični po funkcionalnosti tipova IGMPv2 poruka, pa su definisani MLDv1 tipovi:

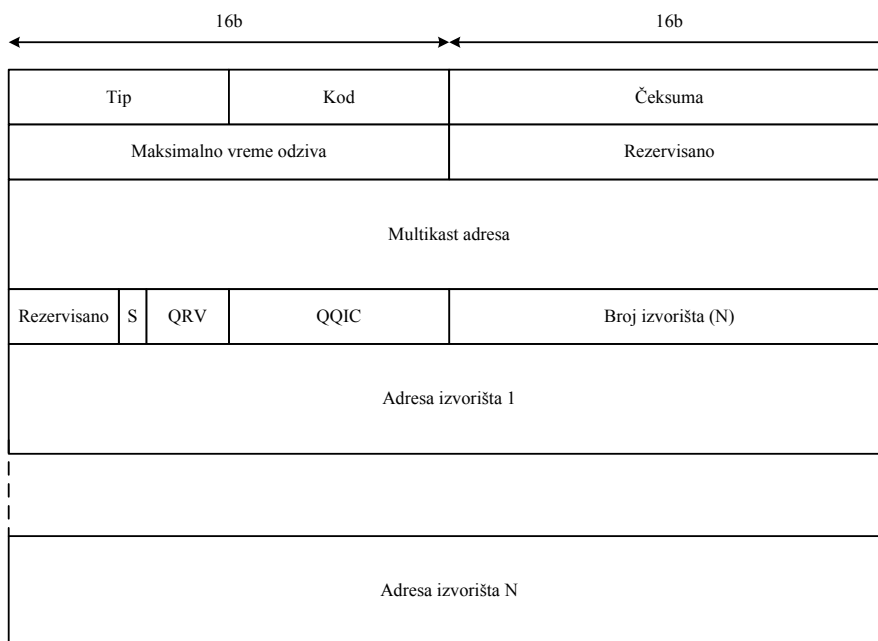
- Upit članstva (*Multicast Listener Query*) - Vrednost tipa je 130. Postoje dva tipa upita - opšti i specificirani kao i kod IGMPv2 poruka. U slučaju opšteg upita polje multikast adresa je popunjeno nulama, a u slučaju specificiranog upita je popunjeno multikast adresom grupe na koju se odnosi specificirani upit. Ova poruka je ekvivalent IGMPv2 poruke upit članstva. Opšti upit se inače šalje na multikast adresu FF02::1.

- Izveštaj o članstvu (*Multicast Listener Report*) - Vrednost tipa je 131. Ova poruka je ekvivalent IGMPv2 poruke izveštaj o članstvu.
- Napuštanje grupe (*Multicast Listener Done*) - Vrednost tipa je 132. Ova poruka je ekvivalent IGMPv2 poruke o napuštanju multikast grupe. Poruka napuštanje grupe se inače šalje na multikast adresu FF02::2.



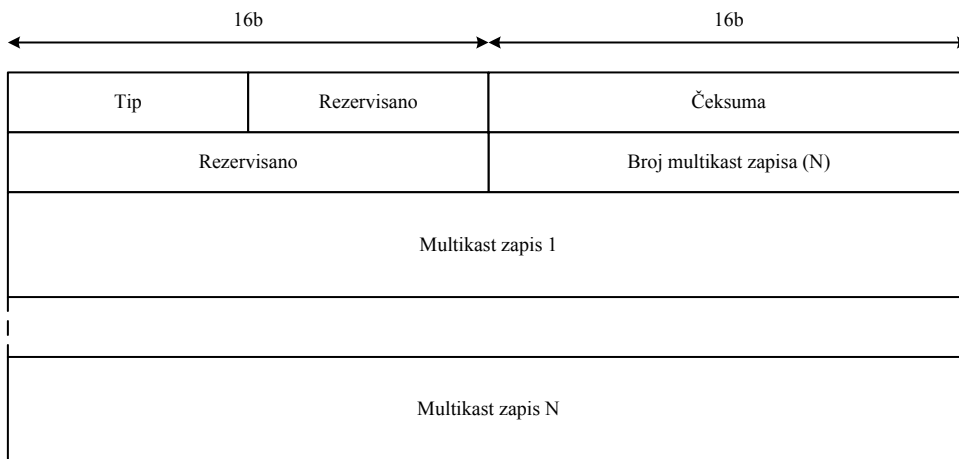
Slika 5.3.1. MLDv1 poruka

Maksimalno vreme odziva i čeksuma imaju istu funkciju kao i kod IGMPv2 poruka. Maksimalno vreme odziva se sada definiše u ms (vrednost ovog polja predstavlja broj ms), pri čemu je sada ovo polje 16 bita dužine u odnosu na IGMP gde je dužina ovog polja bila 8 bita. Multikast adresa predstavlja adresu grupe na koju se poruka odnosi, sem u slučaju opšteg upita kada je vrednost ovog polja postavljena na sve nule. Polje kod je predviđeno za eventualnu buduću upotrebu, a predajnici ga u MLDv1 protokolu postavljaju na 0. Princip rada MLDv1 je funkcionalno identičan IGMPv2 protokolu pa dijagrami stanja hostova i rutera u potpoglavlju 5.1 važe i za MLDv1.



Slika 5.3.2. MLDv2 poruka upita članstva

MLDv2 unapređuje MLDv1 protokol podrškom za filtriranje izvorišta, tj. MLDv2 je funkcionalno identičan IGMPv3 protokolu (sve razlike su tehničke prirode usled razlika između IPv4 i IPv6 mreža - slično kao u slučaju MLDv1 i IGMPv2 protokola). Tipovi poruka koje prepoznaje MLDv2 su: izveštaj o članstvu verzije 1 (vrednost tipa 131), poruka o napuštanju grupe iz verzije 1 (vrednost tipa 132), upit o članstvu (vrednost tipa 130) i izveštaj o članstvu verzije 2 (vrednost tipa 143). Kao i u IGMPv3 protokolu, i u MLDv2 protokolu postoje tri vrste upita: opšti upit, specificirani upit koji se odnosi na grupu i specificirani upit koji se odnosi na grupu i izvore. Strukture upita članstva i izveštaja o članstvu prikazanim na slikama 5.3.2 i 5.3.3, respektivno, su gotovo istovetne strukturama ekvivalentnih poruka iz IGMPv3 protokola.

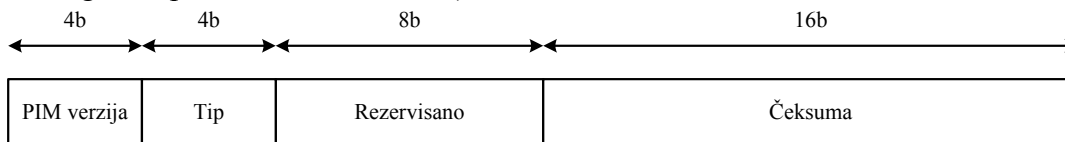


Slika 5.3.3. MLDv2 poruka izveštaj o članstvu

Polje kod sa slike 5.3.2 je kao i u MLDv1 ostavljen za eventualnu buduću upotrebu. Osim što su multikast adrese četiri puta duže u IPv6 mrežama, razlika postoji u određivanju vrednosti maksimalnog vremena odziva. Ako je vrednost tog polja manja od 32768, onda ona predstavlja broj ms, u suprotnom polje specificira 3 bita eksponenta i 12 bita mantise i vreme u ms se računa po formuli $(mant \mid 0x1000) \ll (exp+3)$. Struktura zapisa je funkcionalno istovetna strukturi zapisa iz IGMPv3 protokola prikazanoj na slici 5.2.3 (razlika je samo u dužini multikast adresa koje su sada četiri puta duže). Kao i u IGMPv3 slučaju, ni u MLDv2 se dodatni podaci ne koriste i njihova dužina je postavljena na 0.

5.4. PIM

PIM protokol se koristi za kreiranje multikast stabla po kom će se distribuirati multikast paketi neke grupe. PIM za proračun multikast stabla koristi rezultate rada drugih protokola rutiranja poput OSPF, RIP, BGP, IS-IS. Postoji više varijanata PIM protokola: PIM-SM (*PIM Sparse Mode*), PIM-DM (*PIM Dense Mode*), PIM-SSM (*PIM Source Specific Multicast*) i bidirekcionni PIM. Trenutno, PIM-SM se najčešće koristi u praksi. U okviru ovog poglavlja ćemo opisati princip rada PIM-SM i PIM-DM varijanti (opis PIM-SSM se može naći u RFC 3569, a bidirekcionnog PIM protokola u RFC 5015).

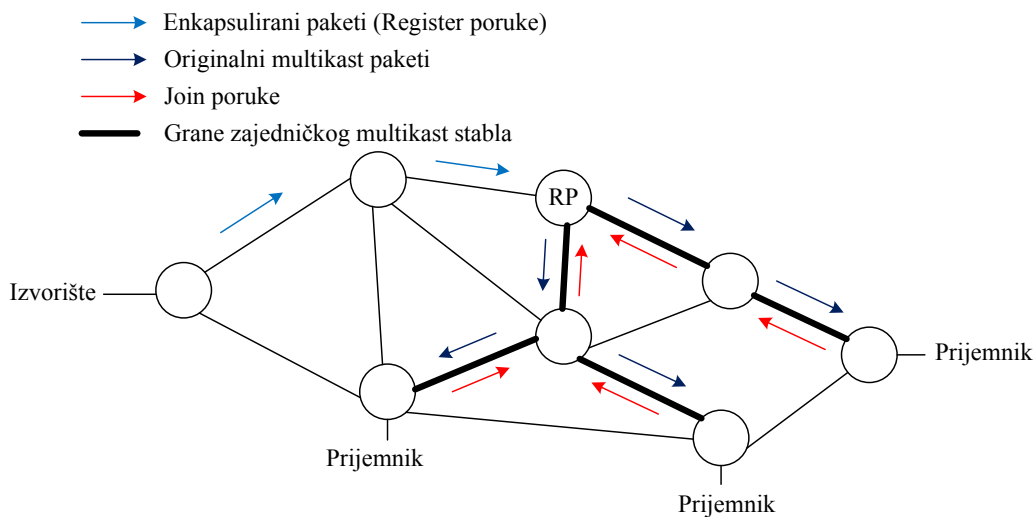


Slika 5.4.1. PIM zaglavlje

PIM poruke se šalju direktno enkapsulirane u IP datagrame, poput ICMP poruka. Protokol ID za PIM poruke je 103. PIM poruka se sastoji od PIM zaglavlja i sadržaja PIM poruke. Struktura PIM zaglavlja je prikazana na slici 5.4.1. Polje verzija definiše verziju PIM protokola i trenutno je u upotrebi verzija 2. Čeksuma se računa na identičan način kao IPv4 čeksuma i računa se uzimajući u obzir celokupnu PIM poruku (sem *Multicast data packet* dela u slučaju Register poruke). Polje tip definiše tip poruke. Definisani su sledeći tipovi PIM poruka:

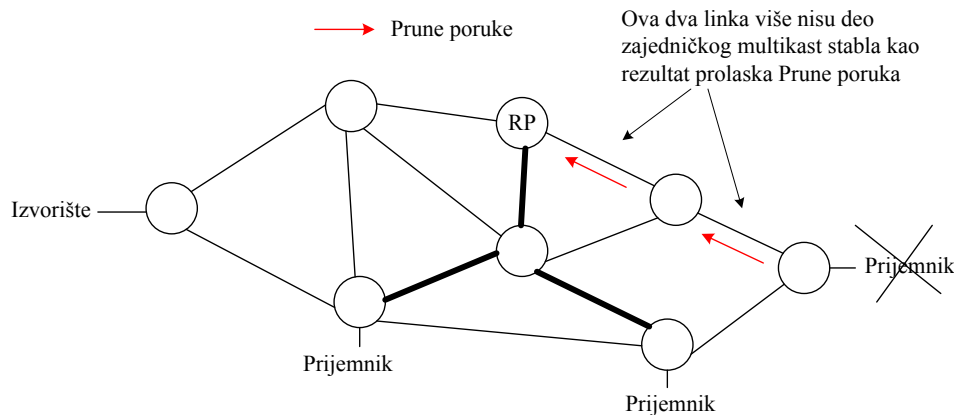
- Hello (tip=0)
- Register (tip=1)
- Register-Stop (tip=2)
- Join/Prune (tip=3)
- Bootstrap (tip=4)
- Assert (tip=5)
- Graft (tip=6)
- Graft-Ack (tip=7)
- Candidate-RP-Advertisement (tip=8)
- State Refresh (tip=9)

Struktura sadržaja poruke zavisi od samog tipa poruke. Poruke se mogu slati na unicast adresu ili multikast adresu, što zavisi od samog tipa poruke. Poruke Hello, Join/Prune, Bootstrap, Assert se šalju na multikast adresu 224.0.0.13 za IPv4 slučaj, odnosno FF02::D za IPv6 slučaj, a ostale poruke se šalju na odgovarajuću unicast adresu uređaja kome su namenjene (tipično ruter). Pri tome, ne koriste se sve poruke u svim varijantama PIM protokola. Na primer, PIM-SM ne koristi poruke Graft i Graft-Ack, dok PIM-DM ne koristi poruke Register, Register-Stop, Bootstrap i Candidate-RP-Advertisement. Detaljne strukture poruka se mogu naći u RFC preporukama PIM varijanata, pre svega RFC 4601 koji definiše PIM-SM i RFC 3973 koji definiše PIM-DM.



Slika 5.4.2. Princip rada PIM-SM protokola

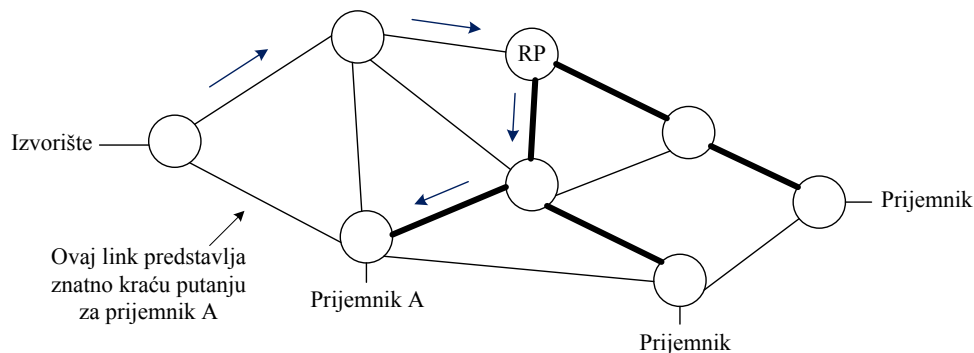
PIM-SM varijanta je definisana u RFC 4601. Trenutno je PIM-SM najpopularniji protokol za kreiranje multikast stabla, pre svega zbog dobre skalabilnosti. Pretpostavka s kojom je razvijen PIM-SM jeste da je broj prijemnika (preciznije broj pod mreža) zainteresovanih za multikast sesiju relativno mali sa stanovišta ukupnog broja prijemnika tj. pod mreža pa otuda u nazivu termin *sparse*.



Slika 5.4.3. Isključivanje delova zajedničkog stabla pomoću Prune poruka

U PIM-SM se definiše RP (*Rendezvous Point*) ruter koji predstavlja koren multikast stabla odgovarajuće multikast sesije tj. grupe. Svi predajnici šalju svoje pakete ka RP ruteru, koji ih potom preko multikast stabla distribuira zainteresovanim prijemnicima. Predajnici šalju pakete svom nadležnom ruteru (u slučaju da je više rutera priključeno na mrežu predajnika, samo je jedan nadležan za prosleđivanje njegovog multikast saobraćaja), pri čemu je odredišna adresa paketa postavljena na multikast adresu grupe. Nadležni ruter predajnika enkapsulira te multikast pakete u unicast PIM Register poruku, gde je unicast odredišna adresa postavljena na IP adresu RP rutera. RP ruter kada primi Register poruku, vrši izvlačenje originalnih multikast paketa iz poruka i potom te multikast pakete šalje na multikast stablo dotične grupe. Pošto svi predajnici koriste isto multikast stablo, često se za to stablo kaže i da je u pitanju zajedničko stablo. S druge strane, prijemnici se odgovarajućim protokolom poput IGMP ili MLD prijavljuju svom nadležnom ruteru da su zainteresovani za neku multikast grupu. Nadležni ruter je u suštini aktivan IGMP/MLD ruter iz IGMP/MLD protokola. Ovaj ruter potom šalje Join poruku. Join poruka putuje kroz mrežu do RP rutera ili do rutera koji je već deo multikast stabla za tu multikast grupu. Svi ruteri kroz koje je prošla Join poruka, a da prethodno nisu bili deo multikast stabla dotične grupe postaju deo multikast stabla dotične grupe. Isto važi i za nadležni ruter koji je generisao Join poruku. Pošto je nadležni ruter zainteresovanog prijemnika postao deo multikast stabla dotične grupe, prijemnik će početi da prima pakete te multikast grupe. Ako nadležni ruter detektuje da više nema zainteresovanih prijemnika (tu detekciju vrši IGMP/MLD protokol), poslaće Prune poruku kojom će signalizirati da se grana do njega treba izbrisati iz multikast stabla. Prune poruka putuje sve do RP rutera ili do rutera u multikast stablu koji ima priključene druge grane koje vode do zainteresovanih prijemnika. Pošto se PIM poruke prenose direktno, nema garancija da će one zaista stići na odredište. Međutim, koristi se soft princip sličan onome iz RSVP protokola. Naime, Join poruke se šalju periodično i samim tim će nova grana biti eventualno uključena u multikast stablo. Istovremeno, periodično slanje Join poruke osvežava status grane u stablu. Kada tajmer osvežavan Join porukom istekne smatra se kao da je stigla Prune poruka. Otuda čak ako se i izgubi Prune poruka, tajmeri u ruterima će obezbediti brisanje grane koja nema zainteresovanih prijemnika iz stabla. Princip opisanog načina rada

PIM-SM je prikazan na slikama 5.4.2 i 5.4.3. Slika 5.4.2 prikazuje strukturu zajedničkog multikast stabla, putanje korisničkih multikast paketa po zajedničkom stablu, kao i putanje Join poruka. Takođe, prikazana je putanja Register poruka koje enkapsuliraju multikast korisničke pakete od nadređenog rutera predajnika do RP rutera. Slika 5.4.3 prikazuje princip rada Prune poruke.



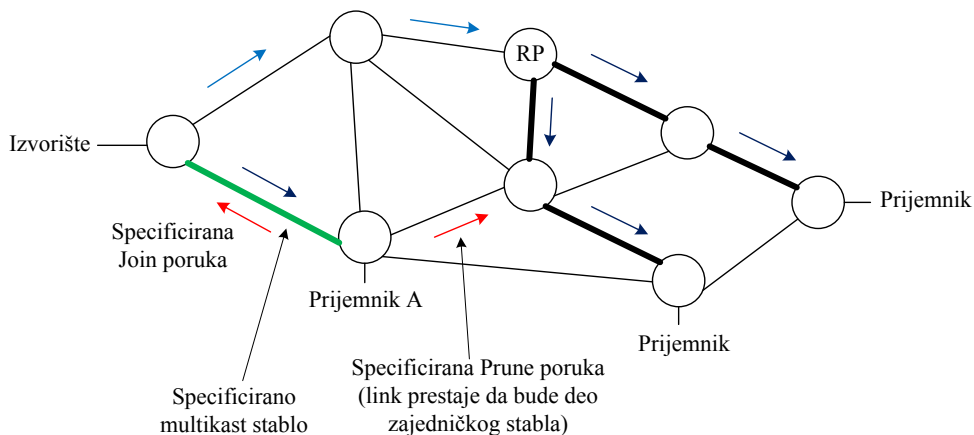
Slika 5.4.4. Primer neoptimalne putanje

Međutim, u opisanom procesu postoje i mane. Prva mana je što proces enkapsulacije i potom izvlačenja multikast paketa iz Register poruka predstavlja dodatno opterećenje za rutere, koje u slučaju kada je saobraćaj intezivan može dovesti do pada performansi rutera. Druga mana je neoptimalna putanja za pojedine prijemnike. Naime, neki prijemnici mogu biti pozicionirani veoma blizu predajnika, pa prijem paketa iz stabla čiji je koren RP ruter može nepotrebno dovesti i do prevelikih kašnjenja, ali i do neefikasnog trošenja mrežnih resursa (propusnog opsega). Ova situacija je ilustrovana na slici 5.4.4. Napomenimo da se rešenja za oba navedena problema aktiviraju tek nakon uspostave originalnog režima rada.

Prvi problem se rešava prelaskom na nativni režim rada. Nativni režim rada podrazumeva da nadležni ruter predajnika šalje originalne multikast pakete RP ruteru bez prethodno urađene enkapsulacije. Da bi se postigao ovaj režim rada, RP ruter šalje Join poruku sa specificiranim izvorom (Join poruke iz originalnog režima rada koji je prethodno opisan nisu specificirale izvorište, već samo multikast grupu podrazumevajući sva izvorišta). Ova specificirana Join poruka putuje do nadležnog rutera predajnika ili prvog rutera koji je uključen u specificirano multikast stablo dotične grupe, ali za specificirani izvor (koren ovog stabla se nalazi u nadležnom ruteru dotičnog predajnika i prosleđuje multikast pakete grupe koje generiše samo dotični predajnik). I ove specificirane Join poruke se šalju periodično. Kada se ruter uključi u specificirano multikast stablo, počće da prima i originalne multikast pakete koji nisu enkapsulirani i enkapsulirane pakete. U tom momentu RP ruter počinje da odbacuje enkapsulirane pakete i kreira Register-Stop poruku koju šalje ka nadležnom ruteru predajnika. Po prijemu ove poruke, nadležni ruter predajnika prestaje da šalje enkapsulirane pakete RP ruteru, tj. tada je definitivno uspostavljen nativni režim rada.

Drugi problem se rešava tako što nadležni ruter prijemnika može da pošalje specificiranu Join poruku ka nadležnom ruteru predajnika. Ova poruka putuje do nadležnog rutera predajnika ili do prvog rutera koji je već uključen u specificirano multikast stablo. Svi ruteri na putu se dodaju u specificirano multikast stablo. U tom momentu će nadležni ruter prijemnika početi primati dve kopije multikast paketa - jednu iz zajedničkog stabla čiji je koren u RP ruteru i jednu iz specificiranog stabla čiji je koren u nadležnom ruteru dotičnog predajnika. Nadležni ruter prijemnika će početi odbacivati kopije iz zajedničkog stabla i generisaće specificiranu Prune

poruku kojom će podesiti filtre u ruterima zajedničkog stabla na uzvodnom putu da ne prosleđuju multikast pakete koje generiše specificirani izvor. Ova poruka se prosleđuje do RP rutera ili prvog rutera koji ima druge prijemnike ka kojima mora da prosleđuje pakete specificiranog izvora. Ova situacija je prikazana na slici 5.4.5.



Slika 5.4.5. Uključivanje prijemnika u specificirano stablo

Kao što smo videli, RP ruter igra značajnu ulogu u PIM-SM protokolu. Koji ruter će biti izabran kao RP ruter se podešava statički (administrator) ili dinamički. Primer dinamičkog principa je upotreba *bootstrap* mehanizma. U mreži se u jednostavnom procesu biranja, izabere neki ruter za tzv. *bootstrap* ruter. Ovom ruteru se prijavljuju svi ruteri koji su konfigurisani da budu RP kandidati, a *bootstrap* ruter bira skup RP rutera koji potom principom plavljenja oglašava ostatku mreže. Očigledno, u jednoj mreži može da postoji više RP rutera pa različite multikast grupe mogu koristiti različite RP rutere u zavisnosti koji RP ruter im omogućava optimalnije zajedničko stablo.

PIM-DM varijanta je definisana u RFC 3973. PIM-DM se koristi u situaciji kada je najveći deo mreže zainteresovan da primi multikast pakete, tj. kada gotovo sve podmreže sadrže prijemnike zainteresovane za sesiju. PIM-DM za razliku od PIM-SM nema dobru skalabilnost, pa otuda nije praktičan za velike mreže. Treba napomenuti da ruteri uglavnom ne podržavaju u praksi PIM-DM protokol.

PIM-DM radi po veoma jednostavnom principu. Izvorišta šalju svoje multikast pakete koji se principom plavljenja šalju kroz mrežu do svih delova mreže. Ruteri čije podmreže ne sadrže zainteresovane prijemnike generišu specificiranu Prune poruku koja specificira grupu i izvorište za koje nema zainteresovanih. Ova poruka putuje do nadležnog rutera navedenog izvorišta ili prvog rutera koji ima zainteresovanih prijemnika. Svi ruteri na tom putu podešavaju svoje filtre tako da ne prosleđuju pakete dotične grupe i navedenog izvorišta koje šalje pakete na tu grupu. Podešavanje filtera je vremenski ograničeno i posle izvesnog vremena ruteri ponovo počinju da prosleđuju i te pakete. Otuda nadležni ruteri izvorišta šalju periodično State Refresh poruke koje se takođe plave i koje osvežavaju stanja filtera. Ako se pojavi zainteresovani prijemnik tada njegov nadležni ruter šalje Graft poruku koja putuje do nadležnog rutera specificiranog predajnika ili do prvog rutera koji i dalje prosleđuje pakete za dotičnu grupu i navedenog predajnika u njoj. Svi ruteri na putu ukidaju podešeni filter i time ponovo počinju da prosleđuju pakete koje prethodno nisu prosleđivali. Graft-Ack se koristi za potvrđivanje Graft poruke.

Osnovne razlike PIM-DM u odnosu na PIM-SM su:

- Ne koristi se periodično slanje Join poruka iz prijemnog smera, već samo Prune i Graft poruke koje se šalju na odgovarajuće događaje. Prune se šalje kada više nema zainteresovanih prijemnika, a Graft kada se ponovo pojavi zainteresovani prijemnik. Napomenimo da detekciju postojanja tj. nepostojanja zainteresovanih prijemnika obavljaju protokoli IGMP i MLD.
- Nema RP rutera jer se koristi princip plavljenja za prosleđivanje multikast paketa.
- Koristi se princip plavljenja za prosleđivanje multikast paketa.
- Usled upotrebe principa plavljenja, PIM-DM nema dobru skalabilnost.