SADRŽAJ

PREDGOVOR 1

1 UVOD 5
1.1 Istorijat Interneta 5
1.2 Međunarodni standardi i preporuke 11
1.3 Klasifikacija telekomunikacionih servisa 15
1.4 Pregled tehnologija prenosa u okosnici IP mreža 17
1.5 Pravci razvoja arhitekture Interneta 20
1.6 Literatura 22

2 PREGLED ARHITEKTURE I PROTOKOLA INTERNETA 25
2.1 Arhitektura Interneta 25
2.1.1 Karakteristike topologije 25
2.1.2 Provajder Internet servisa 28
2.1.3 Pregled protokola Interneta 29
2.1.3.1 Definicija, funkcije i mehanizmi telekomunikacionih protokola ... 29
2.1.3.2 Protokol stek Interneta 31
2.2 Internet protokol (IP) 34
2.2.1 IPv4 34
2.2.1.1 Format IPv4 datagrama 35
2.2.1.2 Principi adresiranja 36
2.2.1.3 ICMP 39
2.2.1.4 Rezolucija adresa (ARP i DHCP) 40
2.2.2 Prevođenje mrežnih adresa (NAT) 42
2.2.3 IPSec 43
2.2.4 IPv6 44
2.2.4.1 Format IPv6 datagrama 45
2.2.4.2 Principi adresiranja 46
2.2.4.3 Migracija od IPv4 ka IPv6 48

2.2.5 Mobilni IP 48
2.3 Rutiranje u Internetu 51
2.3.1 Rutiranje po najkraćoj putanji. Algoritam Dijkstra 53
2.3.2 Plavljenje 55
2.3.3 Rutiranje zasnovano na stanju linka (LS) 56
2.3.4 DV rutiranje. Algoritam Bellman-Ford 59
2.3.5 Konvergencija rutiranja 63
2.3.6 Hijerarhijsko rutiranje 64
2.3.7 Multicast rutiranje 65
2.3.7.1 Multicast adrese 65
2.3.7.2 Upravljanje grupom 66
2.3.7.3 Rutiranje multicast podataka 69
2.3.8 Protokoli rutiranja u Internetu 72
2.3.8.1 OSPF 74
2.3.8.2 RIP 76
2.3.8.3 BGP 77
2.4 Transportni protokoli 84
2.4.1 TCP 85
2.4.1.1 Adresiranje 85
2.4.1.2 Osnovne operacije protokola (RFC 793) 86
2.4.1.3 Format TCP segmenta 88
2.4.1.4 Uspostava i raskid TCP veze 90
2.4.1.5 Kontrola zagušenja 91
2.4.1.6 Opcije TCP 93
2.4.1.7 Verzije TCP 94
2.4.1.8 TCP u bežičnim mrežama 95
2.4.2 UDP 95
2.4.3 RTP i RTCP 96
2.5 Aplikacioni sloj u Internetu 100
2.5.1 Sistem imena domena (DNS) 100
2.5.2 Telnet 102
2.5.3 Elektronska pošta: arhitektura i protokoli 103
2.5.4 Protokol za transfer fajlova (FTP) 106
2.5.5 WWW 110
2.5.5.1 Uniformni identifikator resursa (URI) i uniformni lokator resursa (URL) 110
2.5.5.2 Statički, dinamički i aktivni HTML dokumenti 112
2.5.5.3 HTTP 114

2.6 Pitanja i zadaci 116
2.7 Literatura 118

3 KVALITET SERVISA U IP MREŽAMA 121
3.1 Definicije kvaliteta servisa u IP mrežama 121
3.1.1 Hardijev model kvaliteta servisa 121
3.1.2 ITU-T/ETSI pristup 122
3.1.3 IETF pristup 123
3.1.4 Parametri kvaliteta servisa i mere performansi 124
3.1.5 Klasa servisa i nivo servisa 125
3.2 Arhitekture kvaliteta servisa u IP mrežama 126
3.2.1 IETF arhitektura integrisanih servisa i protokol za rezervaciju resursa (RSVP) 126
3.2.2 IETF arhitektura diferenciranih servisa 128
3.2.3 ITU-T pristup 133
3.3. Mehanizmi QoS u korisničkoj ravni 134
3.3.1 Klasifikacija paketa i kondicioniranje saobraćaja 134
3.3.2 Opsluživanje paketa 138
3.3.3 Upravljanje redovima 140
3.3.3.1 Osnovni algoritam RED 141
3.3.3.2 Ekstenzije algoritma RED 144
3.4 Mehanizmi QoS u kontrolnoj ravni 145
3.4.1 Kontrola pristupa 145
3.4.2 QoS rutiranje 147
3.4.2.1 Pravila slaganja mera performansi 148
3.4.2.2 Algoritmi QoS rutiranja 149
3.4.2.3 Kombinovana mera performanse 150
3.4.3 Rezervacija resursa i signalizacija kvaliteta servisa 151
3.4.3.1 RSVP 152
3.4.3.2 NSIS 153
3.5 Mehanizmi QoS u upravljačkoj ravni 157
3.5.1 Sporazum o nivou servisa 157
3.5.2 Politika upravljanja 159
3.5.3 Merenje saobraćaja 159
3.5.4 Restauracija saobraćaja 160
3.6 Pitanja i zadaci 161
3.7 Literatura 163

4 INŽENJERING SAOBRAĆAJA U IP MREŽAMA 167
4.1 ITU-T model inženjeringa telekomunikacionog saobraćaja 167
4.2. Principi i ciljevi inženjeringa IP saobraćaja 168
4.3 Konteksti inženjeringa IP saobraćaja 171
4.3.1 Kontekst mreže 172
4.3.2 Kontekst problema 173
4.3.3 Kontekst rešenja 174
4.3.3.1 Analiza i kontrola rutiranja 175
4.3.3.2 Upravljanje zagušenjem 176
4.3.3.3 Održivost mreže 178
4.3.4 Kontekst implementacije i operativnog rada mreže 179
4.4 Faze procesa TE u operativnom kontekstu 179
4.5 Klasifikacija sistema inženjeringa IP saobraćaja 180
4.5.1 TE sistemi zavisni od vremena, stanja i događaja 181
4.5.2 Off-line i on-line TE sistemi 181
4.5.3 Centralizovani i distribuirani TE sistemi 182
4.5.4 TE sistemi sa lokalnim i globalnim informacijama 182
4.5.5 Regulatorni i deskriptivni TE sistemi 183
4.5.6 TE sistemi sa otvorenom i zatvorenom petljom 183
4.5.7 Taktički i strateški TE sistemi 183
4.6 Inženjering saobraćaja između domena 183
4.6.1 Kontrola odlaznog saobraćaja 184
4.6.2 Kontrola dolaznog saobraćaja 185
4.7 Uloga TE u obezbeđivanju kvaliteta servisa 186
4.8 Pitanja i zadaci 188
4.9 Literatura 188

5 MULTIPROTOKOLSKA KOMUTACIJA LABELA – MPLS 191
5.1 Definicije i osnovni pojmovi 192
5.2 Osnovna arhitektura 194
5.2.1 Vezivanje labela sa klasom FEC 194
5.2.2 Stek labela 195
5.2.2.1 Kodiranje steka labela 195
5.2.2.2 Osnovne operacije sa stekom labela 197
5.2.3 Selekcija putanja 197
5.2.4 Uklanjanje labele sa steka u pretposlednjem hopu 198
5.2.5 LSP tuneli 199
5.2.6 Primer hijerarhije LSP tunela 199

5.2.7 Zapis o prosleđivanju labele sledećem hopu (NHLFE) 200
5.3 Distribucija labela 201
5.3.1 Distribucija labela na zahtev i bez eksplicitnog zahteva 202
5.3.2 Liberalni i konzervativni režim pamćenja labela 202
5.3.3 Kontrola LSP 203
5.3.4 Distribucija labela parnjacima 204
5.3.5 Protokoli za distribuciju labela 205
5.3.5.1 BGP 205
5.3.5.2 RSVP-TE 206
5.3.5.3 LDP 207
5.4 Brzo preusmeravanje 208
5.5 MPLS podrška za arhitekturu DiffServ 209
5.5.1 E-LSP i L-LSP 211
5.5.2 Model prosleđivanja labela u DiffServ LSR 213
5.5.2.1 Određivanje dolaznog PHB 213
5.5.2.2 Određivanje odlaznog PHB sa opcionim kondicioniranjem saobraćaja 213
5.5.2.3 Prosleđivanje labele 213
5.5.2.4 Kodiranje DiffServ informacije u sloj enkapsulacije 214
5.6 Inženjering saobraćaja u MPLS mreži 214
5.6.1 Rutiranje zasnovano na ograničenju 215
5.6.2 Izmene protokola rutiranja u domenu 217
5.6.3 Primeri inženjeringa saobraćaja u MPLS mreži 219
5.6.4 Mogućnosti primene MPLS TE tunela za kontrolu odlaznog i dolaznog saobraćaja domena 220
5.7 Razvoj MPLS kao tehnologije transportne mreže (MPLS-TP) 220
5.8 Pitanja i zadaci 223
5.9 Literatura 227

6 IP VIRTUELNE PRIVATNE MREŽE 229
6.1 Terminologija i klasifikacija IP VPN 229
6.2 Referentni modeli IP VPN 231
6.2.1 Referentni model PE bazirane L3 VPN 231
6.2.2 Referentni model PE bazirane L2 VPN 233
6.2.3 Referentni model CE bazirane L3 VPN 235
6.2.4 Primena: L2 ili L3 VPN 235
6.3 Arhitektura IP VPN 236
6.3.1 Formiranje i konfigurisanje krajnjih tačaka VPN 236

6.3.2 Detekcija članova VPN 237
6.3.3 Uspostavljanje VPN tunela 237
6.3.4 Distribucija informacije o međusobnoj dostupnosti korisnika VPN 238
6.4 MPLS virtuelne privatne mreže 239
6.4.1 Funkcija virtuelnog rutiranja i prosleđivanja 239
6.4.2 Primer arhitekture MPLS VPN 240
6.4.3 Prednosti MPLS VPN 242
6.5 Mobilne IP VPN 242
6.6 Kvalitet servisa u IP VPN 244
6.6.1 Sporazum o nivou IP VPN servisa 244
6.6.2 Broker VPN servisa 245
6.7 Pitanja i zadaci 247
6.8 Literatura 248

7 OSNOVNE KARAKTERISTIKE GMPLS TEHNOLOLOGIJE 249
7.1 Definicije i osnovni pojmovi 249
7.1.1 Generalizacija labele 249
7.1.2 Tipovi komutacije 250
7.1.3 Definicija LSP 251
7.1.4 Propusni opseg 252
7.1.5 Bidirekcionalnost transportne mreže 252
7.1.6 Razdvajanje kontrolne i korisničke ravni 253
7.1.7 Tunelovanje i hijerarhija LSP 254
7.2 Signalizacija: RSVP-TE 255
7.2.1 Signalizacioni kontroleri i kontrolni kanali 255
7.2.2 Adresiranje 257
7.2.3 Sesije, tuneli i putanje komutirane labelom 257
7.2.4 Poruke RSVP-TE protokola 259
7.2.5 Uspostava i raskid LSP 260
7.3 Upravljanje linkom 261
7.3.1 Definicije linka, kontrolnog kanala i kanala podataka 261
7.3.2 Protokol za upravljanje linkom (LMP) 262
7.4 Rutiranje i inženjering saobraćaja 265
7.4.1 Koncept TE linka i informacija o GMPLS rutiranju 265
7.4.2 Primer GMPLS TE sistema: hibridno višeslojno QoS rutiranje 267
7.4.3 Inženjering saobraćaja između domena GMPLS mreže 268
7.5 Pitanja i zadaci 270
7.6 Literatura 271

8 CARRIER ETHERNET 273
8.1 Osnovne karakteristike Ethernet tehnologije 273
8.1.1 Ethernet i Fast Ethernet 274
8.1.2 Gigabit Ethernet 277
8.1.3 10 Gigabit Ethernet 279
8.1.4 Kvalitet servisa 281
8.1.5 STP i RSTP 282
8.1.6 Virtuelni LAN (VLAN) 284
8.2 Definicija i arhitektura Carrier Ethernet-a 285
8.3 Protokol stek 286
8.3.1 Ethernet preko neosvetljenog vlakna 287
8.3.2 Ethernet preko SDH i WDM sistema prenosa 288
8.3.3 Ethernet preko MPLS mreže 288
8.4 Ethernet servisi 289
8.5 Principi regulacije ulaznog saobraćaja 292
8.6 Skalabilnost Carrier Ethernet-a 295
8.7 Pitanja i zadaci 296
8.8 Literatura 297

9 UPRAVLJANJE MREŽOM I SERVISIMA 299
9.1 TMN 299
9.1.1 Fizička arhitektura TMN 300
9.1.2 Funkcije upravljanja (FCAPS) 302
9.1.2.1 Upravljanje otkazima 302
9.1.2.2 Upravljanje konfiguracijom 303
9.1.2.3 Upravljanje tarifiranjem 304
9.1.2.4 Upravljanje performansama 305
9.1.2.5 Upravljanje zaštitom 306
9.1.3 Slojevita arhitektura TMN 306
9.1.4 Značaj koncepta TMN 308
9.2 Model upravljanja u Internetu 309
9.2.1 Paradigma "upravljač-agent" 309
9.2.2 SNMP 310
9.2.2.1 Baza upravljačkih informacija (MIB) i struktura upravljačke informacije (SMI) 311
9.2.2.2 Struktura poruka i operacije protokola 315
9.2.3 Autentifikacija, autorizacija i tarifiranje (AAA) 317
9.2.4 Principi implementacije 320

9.2.4.1 Upravljačke platforme 320
9.2.4.2 Distribuirani nadzor 321
9.2.4.3 Analiza i vizuelizacija podataka 321
9.2.4.4 Semantički modeli 322
9.3 Upravljanje servisima 323
9.3.1 Hijerarhijski model upravljanja i veza sa TMN arhitekturom 323
9.3.2 Struktura sporazuma o nivou servisa 324
9.3.3 Upravljanje kvalitetom servisa 325
9.4 Upravljanje zasnovano na politikama (PBM) 328
9.4.1 Arhitektura PBM sistema 328
9.4.2 Alat za upravljanje politikom (PMT) 330
9.4.3 Primer PBM sistema u DiffServ mreži 333
9.4.4 Informaciono-komunikacione tehnologije za implementaciju koncepta PBM 334
9.4.4.1 COPS 334
9.4.4.2 LDAP 337
9.4.4.3 CORBA 340
9.5 Pitanja i zadaci 346
9.6 Literatura 347

10 MREŽE NAREDNE GENERACIJE – NGN 351
10.1 Referentni modeli, arhitektura i osnovna svojstva NGN 351
10.1.1 Transportni i servisni stratum 351
10.1.2 Opšti funkcionalni model NGN 353
10.1.3 Arhitektura NGN 354
10.1.4 Slojevitost mreže 356
10.1.5 Generalizovana mobilnost 358
10.1.6 Numeracija, imena i adresiranje 359
10.1.7 Identifikacija i lokacija 360
10.1.8 Hitne komunikacije 361
10.1.9 Zahtevi za tarifiranje servisa 361
10.2 AIPN 362
10.3 Pristup transportnom stratumu NGN 363
10.3.1 Višeslojni transportni stratum 364
10.3.2 Agregatni pristup na sloju 2 365
10.3.3 Agregatni pristup na sloju 3 366
10.3.4 Višestepeno sprovođenje politike 367
10.3.5 Podela saobraćaja transportnog stratuma na poddomene 368

10.4 Multimedijalni servisi 369
10.4.1 Pristup servisima i podrška zahtevima za servise 369
10.4.2 Protokoli za kontrolu sesije 370
10.4.2.1 SIP 370
10.4.2.2 H.323 374
10.4.2.3 Poređenje karakteristika SIP i H.323 377
10.4.3 Protokol za kontrolu medija gejtveja (H.248) 377
10.4.4 IP multimedijalni podsistem (IMS) 382
10.4.5 Veza između NGN i domena servisa 385
10.5 Konvergencija servisa 386
10.5.1 Primer konvergencije servisa 387
10.5.2 Model konvergencije servisa 388
10.5.3 Konvergencija servisa preko više administrativnih domena 390
10.6 Rezime 392
10.7 Pitanja i zadaci 392
10.8 Literatura 393

SPISAK SKRAĆENICA 395

REČNIK TERMINA 401

REGISTAR 409

PREDGOVOR

Tokom više od 40 godina postojanja, Internet je od vojnog projekta, preko međunarodne akademske mreže, prerastao u najveću komercijalnu telekomunikacionu platformu. Tehnologija Internet protokola (IP) je uobičajen naziv za skup tehničko-tehnoloških rešenja u oblasti telekomunikacionih mreža, koja se zasnivaju na protokol steku Interneta. Ova knjiga razmatra arhitekture, tehnologije i protokole u okosnici savremenih IP mreža, čija je bitna karakteristika integracija heterogenih telekomunikacionih servisa.

Udžbenik je prvenstveno namenjen studentima osnovnih i master studija Elektrotehničkog i Saobraćajnog fakulteta Univerziteta u Beogradu, koji prate nastavu iz širokopojasnih telekomunikacionih mreža, računarskih mreža i telekomunikacionih protokola. Knjiga može korisno da posluži i inženjerima različitih profila, za sveobuhvatno sagledavanje savremenih rešenja i tendencija razvoja IP tehnologije. Pretpostavlja se da čitalac poseduje osnovno predznanje o telekomunikacionim mrežama, kao i tehnologijama sistema prenosa.

Materija izložena u udžbeniku organizovana je u deset poglavlja, postupno od jednostavnog ka složenijem gradivu.

Prvo poglavlje je uvodno. Osim prikaza istorije Interneta, cilj je da se čitalac upozna sa procesom standardizacije tehničkih rešenja u oblasti IP tehnologije, kao i klasifikacijom i zahtevima heterogenih telekomunikacionih servisa integrisanih u zajedničku IP-baziranu mrežu. Kratak pregled tehnologija prenosa treba da posluži kao podsetnik za razumevanje materije izložene u poglavljima 5, 7 i 8. Na kraju su apostrofirani pravci razvoja arhitekture Interneta i IP-baziranih mreža.

Drugo poglavlje sadrži pregled arhitekture i bazičnih protokola Interneta, koji je neophodan za razumevanje materije izložene u narednim poglavljima. Pregled sadrži prikaz arhitekture Interneta, a zatim i prikaz karakterističnih protokola mrežnog, transportnog i aplikacionog sloja.

Heterogene aplikacije postavljaju telekomunikacionom sistemu različite zahteve za kvalitet servisa (QoS). Kvalitet servisa je, već skoro dve decenije, 3veoma aktuelno područje istraživanja u oblasti IP tehnologije. U trećem

poglavlju je prvo objašnjena terminologija koja se odnosi na kvalitet servisa u IP mrežama, a zatim su razmatrane IETF arhitekture kvaliteta servisa. Mehanizmi implementacije QoS su detaljno objašnjeni polazeći od grupisanja funkcija u tri logičke ravni: korisničku, kontrolnu i upravljačku.

Inženjering saobraćaja je skup funkcija i procedura koji omogućuje optimizaciju performansi operativne telekomunikacione mreže, u smislu iskorišćenja resursa i obezbeđivanja servisa zahtevanog nivoa kvaliteta. U četvrtom poglavlju su objašnjene funkcije, principi i ciljevi inženjeringa IP saobraćaja.

Peto poglavlje posvećeno je tehnologiji multiprotokolske komutacije labela (MPLS). MPLS uvodi, na jednostavan i fleksibilan način, novu paradigmu rutiranja, pruža niz pogodnosti za inženjering saobraćaja i značajno doprinosi poboljšanju ukupnog kvaliteta servisa. Ova relativno nova tehnologija je za kratko vreme zauzela značajno mesto u praksi i postala dominantna u okosnici operatorskih i korporativnih mreža. Najnovija istraživanja razmatraju dopunu standarda funkcijama upravljanja, tako da MPLS posluži kao osnov za paketske transportne mreže naredne generacije.

U šestom poglavlju razmatrane su IP virtuelne privatne mreže (VPN). Objašnjena je terminologija, prikazana klasifikacija i opisani su standardizovani referentni modeli tri osnovna tipa IP VPN. Takođe su objašnjene komponente arhitekture, a zatim je posvećena pažnja MPLS baziranim VPN, mobilnim IP VPN i implementaciji VPN kvaliteta servisa.

Sedmo poglavlje sadrži prikaz osnovnih karakteristika generalizovane MPLS tehnologije – GMPLS. Osnovna ideja GMPLS je da se princip komutacije labela generalizuje na mreže sa različitim tipovima komutacije. Za takve potrebe neophodna su nova rešenja u kontrolnoj ravni: signalizacija, kontrola linka i kontrola rutiranja.

Ethernet tehnologija, od početka razvoja, zauzima značajno mesto u razvoju Interneta; prema različitim procenama, između 80% i 90% Internet saobraćaja potiče od Ethernet LAN/MAN mreža. Ova tehnologija uveliko prevazilazi okvire lokalnih i gradskih mreža, predstavlja osnov i za WAN mreže, a operatori nude krajnjim korisnicima skup Ethernet servisa. Takav "operatorski" Ethernet je poznat pod nazivom Carrier Ethernet, a razmatran je u osmom poglavlju.

Deveto poglavlje sadrži detaljan prikaz principa upravljanja IP mrežom i servisima. Zahtevi za savremene IP mreže pretpostavljaju visok nivo pouzdanosti i održivosti. To se može realizovati pomoću sofisticiranih, automatizovanih sistema za nadzor i upravljanje, koji omogućuju efikasnu izolaciju otkaza, dinamičku rekonfiguraciju mreže i stalni nadzor performansi.

U desetom poglavlju razmatran je koncept mreža naredne generacije (NGN), čije su osnovne karakteristike razdvajanje servisa od tehnologija

prenosa, slobodan pristup korisnika mrežama i/ili drugim provajderima servisa i podrška mobilnosti korisnika, terminala i sesija.

Svako poglavlje sadrži spisak pitanja i zadataka za proveru znanja i samostalan rad, kao i spisak korišćene literature.

Na kraju knjige dati su spisak skraćenica, rečnik termina i registar pojmova.

Autori izražavaju posebnu zahvalnost prof. dr Miroslavu Dukiću na podsticaju, savetima i pomoći u svim fazama izrade ovog udžbenika.

Zahvaljujemo se prof. dr Miodragu Bakmazu na sugestijama koje su značajno doprinele poboljšanju prezentacije materijala izloženog u udžbeniku.

Takođe se zahvaljujemo dr Slavici Boštjančič Rakas i mr Valentini Timčenko na nesebičnoj pomoći u pregledu rukopisa i tehničkoj obradi knjige.

Beograd, oktobar 2011.

U V O D

1

Internet predstavlja jedan od najuspešnijih primera višestrukih prednosti kontinuiranog i doslednog ulaganja u istraživanje i razvoj informaciono-komunikacione infrastrukture. Od prvih istraživanja u oblasti komutacije paketa do danas, akademske organizacije, industrija, međunarodne i državne institucije sarađivale su u razvoju i implementaciji novih tehnologija, arhitekture i protokola Interneta.

1.1 Istorijat Interneta

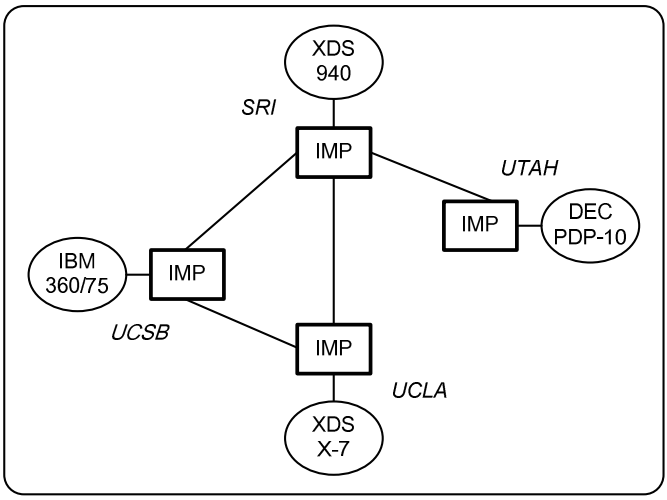
Korene ideje o globalnoj mreži za razmenu informacija nije moguće locirati u određenu godinu ili deceniju. Za svaku komponentu ogromne infrastrukture Interneta postoje tehnički, ekonomski i društveni preduslovi u prošlosti i sadašnjosti. Postojale su vizije tehnologije koja će omogućiti integraciju servisa i globalno povezivanje. Nikola Tesla je, još 1908. godine, govorio o tehnologiji koja će "omogućiti poslovnom čoveku u Njujorku da diktira uputstva koja će se trenutno štampati u njegovoj kancelariji u Londonu" i pomoću koje će se globalno pristupati "bilo kojoj slici, slovu, crtežu ili štampanom dokumentu". Trideset godina kasnije, engleski književnik Herbert Džordž Vels (*H. G. Wells*) je pisao o "svetskom mozgu kao depou koji prima, uređuje, klasifikuje, objašnjava i poredi znanje i ideje". Vanivar Buš (*Bush*) je, 1945. godine, napisao esej o foto-elektro-mehaničkom uređaju sa kolektivnom memorijom koga je nazvao "memeks".

Preduslovi za nastanak Interneta stvoreni su krajem pedestih i početkom šezdesetih godina prošlog veka. Ministarstvo odbrane SAD je 1958. godine osnovalo istraživačku agenciju ARPA (kasniji naziv – DARPA), sa jednim od ciljeva da istraži telekomunikacione tehnologije i mogućnosti umrežavanja računara. Taj period su obeležili teorijski radovi nekoliko naučnika, među kojima se posebno ističu Leonard Klajnrok (*Kleinrock*), Pol Baran, Donald Dejvis (*Davies*) i Džozef Karl Robnet Liklajder (*J.C.R. Licklider*) [1.1]–[1.3]. Klajnrok,

Baran i Dejvis su, nezavisnim radovima, utemeljili teoriju komutacije paketa. Liklajderova "galaktička mreža" je bila vizija podrške društvenih interakcija pomoću globalno povezanih računara, koji omogućuju brz pristup podacima i programima, sa bilo koje lokacije. Takav koncept, u suštini, odgovara današnjem Internetu.

Odluka o povezivanju nekoliko velikih i skupih računara agencije ARPA doneta je 1965. godine. Prvenstvena motivacija za formiranje mreže bila je da se ostvari efikasno i ekonomično deljenje resursa – hardvera, softvera i aplikacija. Naredne četiri godine posvećene su intenzivnom radu na projektu prve mreže sa komutacijom paketa, poznate pod nazivom ARPANET.

Eksperimentalna mreža (slika 1-1) instalirana je 1969. godine. Ona je povezala Univerzitet Kalifornija u Los Anđelesu (UCLA) sa centrom "SRI International" u Menlou Parku (u blizini San Franciska), a zatim Univerzitet Kalifornija u Santa Barbari (UCSB) i Univerzitet Juta (*Utah*).



Slika 1-1. Prvobitna konfiguracija ARPANET-a (1969. godina) [1.1].

Svaka od ovih institucija koristila je drugačiji računarski sistem. Za potrebe umrežavanja, na svakoj lokaciji instaliran je identičan komunikacioni računar, povezan sa hostom. On je nazvan "procesor interfejsnih poruka" (*Interface Message Processor*, IMP). IMP uređaji su međusobno povezani iznajmljenim linijama kapaciteta 50 kb/s, a podržavali su prenos paketa fiksne dužine 1024 bita. Razdvajanje mrežnih funkcija od funkcija hosta značajno je redukovalo složenost sistema, jer je mreža bila nezavisna od specifičnosti hardvera i softvera hostova.

Početkom Interneta smatra se 29. oktobar 1969. godine, kada je Klajnrok poslao prvu poruku preko ARPANET-a, sa hosta univerziteta UCLA. Trebalo je

da se daljinski prijavi na računar centra SRI tako što će poslati reč "log". Sistem u centru SRI programiran je da automatski doda ostatak "in", kako bi kompletirao komandu "login" za prijavljivanje. Da bi se pratio tok i ishod operacije, aktivirana je telefonska veza.

Na terminalu u UCLA, Klajnrok je otkucao slovo "l" i telefonom dobio potvrdu da je stiglo do centra SRI. Zatim je otkucao slovo "o" i ponovo telefonom dobio potvrdu prijema. Kada je otkucao slovo "g", sistem je otkazao. Kasnije je u analima ostala zabeležena anegdota da je prva poruka preneta preko Interneta bila vizionarska, zbog asocijacije na uzvik "*Lo and behold!*" (u slobodnom prevodu: "Gle!").

Prvobitna mreža sa četiri čvora testirana je narednih meseci, kada su opsežnim merenjima potvrđeni Klajnrokovi analitički modeli za određivanje kašnjenja i protoka. Usledilo je proširenje mreže, tako da je 1971. godine ARPANET imao 15 hostova. Iste godine je završena prva specifikacija protokola za transfer fajlova (*File Transfer Protocol*, FTP).

Javna prezentacija rada ARPANET-a održana je 1972. godine. Te godine je uspešno demonstrirana i nova aplikacija – elektronska pošta. Prezentacija ARPANET-a bila je neposredan podsticaj za velike proizvođače računarske opreme da projektuju sopstvene mrežne arhitekture; među njima su se kasnije posebno istakle kompanije IBM i DEC.

Uskoro je započet rad na povezivanju ARPANET-a sa bežičnom paketskom mrežom, zasnovanom na jednostavnom protokolu pristupa medijumu Aloha i sa protokom 9,6 kb/s. Ispostavilo se da je povezivanje ARPANET-a sa drugim mrežama izvodljivo, ali se problem interoperabilnosti nije mogao rešavati jednoznačno. Interkonekcija mreža nazvana je "*internetworking*", odakle i potiče naziv Internet (u nezvaničnoj upotrebi od 1974. godine).

Internet je zasnovan na ideji o povezivanju više nezavisnih, heterogenih mreža. Za takve potrebe, projektovana je četvoroslojna arhitektura protokola, sa slojem host-mreža, mrežnim slojem, transportnim slojem i aplikacionim slojem. Osnov arhitekture predstavljaju dva protokola: TCP (*Transmission Control Protocol*) na transportnom sloju i Internet protokol (IP) na mrežnom sloju. Skup protokola Interneta uobičajeno se naziva "TCP/IP model".

Prvu verziju TCP-a razvili su Robert Kan (*Kahn*) i Vinton Serf (*Cerf*), 1974. godine. Oni su sagledali potrebu za komunikacionim softverom u hostovima, pomoću koga bi bile uspostavljene virtuelne (logičke) veze između aplikacionih procesa i ispravljene greške nastale u prenosu. Akronim TCP je u početku označavao samo "program za kontrolu prenosa", a kompaktan protokol je definisan tek osamdesetih godina. U knjizi o ARPANET-u, objavljenoj 1976. godine, Klajnrok je istakao problem specifikacije telekomunikacionih protokola.

ARPANET je povezan sa paketskom radio mrežom i paketskom satelitskom mrežom, korišćenjem TCP/IP modela, 1977. godine. Demonstracija

zajedničkog rada tri mreže bila je impresivna, jer se prenos podataka odvijao satelitskim linkom, kapaciteta 64 kb/s, od Kalifornije do Londona.

Razvoj personalnih računara, radnih stanica i lokalnih računarskih mreža označio je novo razdoblje u razvoju Interneta, osamdesetih godina prošlog veka. Do današnjih dana, posebno mesto u tome zauzima *Ethernet* tehnologija. Promena od interkonekcije malog broja mreža sa nekoliko velikih hostova do velikog broja mreža sa mnogo PC računara uslovila je nove koncepte razvoja. 1981. godine je završena specifikacija IP protokola verzije 4, koja je predvidela klase adresa A, B i C za nacionalne, regionalne i lokalne mreže, respektivno. Iste godine se pojavila prva stabilna verzija TCP protokola, čime je protokol stek oblikovan u kompaktnu celinu.

Sledeći značajan korak bilo je dodeljivanje imena hostovima, da bi se izbeglo pamćenje numeričkih IP adresa. U početku je postojao ograničen broj hostova, tako da je bila dovoljna jedna zajednička tabela sa svim hostovima i pridruženim adresama. Pomak ka velikom broju mreža kojima se nezavisno upravlja uslovio je potrebu za razvojem sistema imena domena (*Domain Name System*, DNS). Sistem je projektovan kao skalabilan distribuirani mehanizam za preslikavanje hijerarhijski organizovanih imena hostova u Internet adrese.

Proširenje Interneta postavilo je nove zahteve i u pogledu protokola rutiranja i kapaciteta rutera. U prvobitnom ARPANET-u postojao je samo jedan distribuirani algoritam rutiranja koji je uniformno implementiran u svim ruterima. Sa rapidnim povećanjem broja mreža, taj koncept je postao neodrživ i zamenjen je hijerarhijskim modelom, koji razdvaja protokole rutiranja unutar domena od protokola rutiranja između domena. Hijerarhijski koncept omogućuje vlasnicima pojedinih mreža da implementiraju različite protokole rutiranja unutar svojih mreža, odnosno da izvrše optimalan izbor u zavisnosti od cene, brzine rekonfiguracije, robusnosti i skalabilnosti. Interoperabilnost različitih mreža postiže se jedinstvenim protokolom rutiranja između domena.

Koncepcija ARPANET-a bila je atraktivna i izvan vojnih institucija. Američka državna naučna fondacija (NSF) razvila je, osamdesetih godina, na sličnim principima mrežu namenjenu povezivanju istraživačkih institucija [1.2]. Ta mreža je, 1987. godine, integrisana sa ARPANET-om u mrežu koja je nazvana NSFNet. To je zapravo označilo odvajanje ARPANET-a od vojnog eksperimenta u javni istraživački projekat, a TCP/IP je postala stabilna tehnologija, koja je postepeno prodirala u svakodnevne komunikacije. ARPANET je zvanično prestao da postoji 1990. godine, a sve nadležnosti nekadašnje vojne mreže prenete su na NSFNet. Mreža NSFNet je povezivala preko 4000 institucija u SAD, Kanadi i Evropi.

Evropska mreža (EUnet), koja je povezivala vodeće evropske istraživačke institucije, uvela je TCP/IP model 1988. godine, sa gejtvejima ka NSFNet-u u Centru za nuklearna istraživanja, CERN, u Ženevi i Centru za matematiku u Amsterdamu.

Otkriće Web-a, 1989. godine, je najznačajnije uticalo na masovni porast Interneta u godinama koje su usledile, a mnogi hroničari smatraju tu godinu pravim početkom Interneta [1.4]. Engleski fizičar i informatičar Tim Berners-Li (*Berners-Lee*), zaposlen u CERN-u, objavio je članak pod nazivom "Predlog upravljanja informacijama". Predlog se zasnivao na korišćenju procesa nazvanog "hipertekst" za povezivanje odgovarajućih dokumenata lociranih u različitim delovima Interneta. Osim toga, identifikovao je sledeće zahteve: daljinski pristup dokumentima preko više mreža, ostvarivanje kompatibilnosti različitih sistema, decentralizaciju i mogućnost održavanja privatnih linkova.

Krajem 1990. godine, Berners-Li i Robert Kajo (*Cailliau*) su razvili prototip sistema koji su nazvali "*World Wide Web*". Editovanje hiperteksta i pregled stranica (koje su sadržale samo tekst) bili su omogućeni preko posebnog editora/pretraživača. Rukovodili su se jednostavnim principom: "dobijaš ono što vidiš". Ova dvojica inženjera uspostavila su prvu uspešnu komunikaciju između HTTP (*HyperText Transfer Protocol*) klijenta i servera preko Interneta.

Web je ostao u tekstualnoj formi do početka 1993. godine, kada je postojalo 26 sajtova. Tada se pojavio prvi pretraživač koji je podržavao grafiku – *Mosaic*, dizajniran za okruženje *X-Windows*, operativnog sistema *Unix*. Prva iskustva sa ovim sporim pretraživačem nisu obećavala ekspanziju Web-a, posebno u kombinaciji sa *dial-up* modemima.

Preokret se dogodio 30. aprila 1993. godine, kada je uprava CERN-a donela odluku da WWW tehnologija bude slobodno dostupna svim korisnicima Interneta. Taj događaj je promenio istoriju Interneta.

Do kraja 1994. godine, na Internet je bilo priključeno oko dva miliona računara. U radu je bilo više od 1500 Web servera, među kojima je i *Yahoo* – prvi server koji je omogućio efikasno pretraživanje Web sajtova na osnovu ključnih reči. Osnovana je kompanija *Mosaic Communications* (kasnije, poznati *Netscape*), za razvoj pretraživača Web-a. Iste godine je formiran WWW konzorcijum.

Naziv NSFNet zvanično je ukinut 30. aprila 1995. godine, jer je fondacija NSF, dotada najveći finansijer Interneta, prepustila finansiranje i upravljanje provajderima. Takav princip se zadržao do danas, što znači da globalni Internet nema vlasnika, odnosno nijedna država ni institucija ne poseduju celokupnu mrežu. Internet je decentralizovan sistem, čiji ključni akteri nisu samo pojedinci, već i provajderi Internet servisa, korporacije i celokupna telekomunikaciona industrija. Korisnik samostalno bira kako će se priključiti na mrežu i koje će servise koristiti. Centralizovan princip je prisutan samo u dodeli adresa i registraciji domena.

U godinama koje slede, Internet je doživeo ekspanziju kakva nije zabeležena ni sa jednom prethodnom tehnologijom. Prva verzija *Microsoft Internet Explorer*-a pojavila se 1996. godine, a instaliran je i prvi sistem

elektronske pošte preko Web-a (*Hotmail*). Server Gugl (*Google*) otvoren je 1998. godine. 2000. godine je na Internet bilo povezano 70 miliona računara, a Gugl je dnevno odgovarao na 18 miliona upita za pretraživanje Web-a.

Internet je zvanično uveden u Srbiji u februaru 1996. godine, kada je nacionalna akademska mreža spojena sa Internetom posredstvom prvog domaćeg provajdera, BeotelNet. Te godine pojavilo se još nekoliko domaćih komercijalnih provajdera Internet servisa.

Naglo širenje Interneta tokom devedesetih godina bilo je omogućeno zahvaljujući intenzivnoj digitalizaciji sistema prenosa i sve masovnijoj upotrebi optičkih vlakana, čime su obezbeđeni dovoljni transportni kapaciteti u okosnici mreže. Ogroman porast broja korisnika i razvoj aplikacija koje su zahtevale veliki propusni opseg bio je glavni podsticaj za razvoj heterogenih tehnologija širokopojasnog pristupa Internetu.

Rad na standardizaciji IPv6 započet je 1992. godine. Već je tada uočeno da adresni prostor IPv4 (32-bitne adrese) potencijalno predstavlja ograničavajući faktor za buduće proširenje mreže. Osim uvođenja 128-bitnih adresa, nova verzija protokola donela je niz poboljšanja u pogledu efikasnosti i bezbednosti. Predviđen je postepen prelazak sa IPv4 na IPv6 uz mogućnost koegzistencije oba protokola, ali tranzicija ka IPv6 do danas nije izvršena. Razlozi za to biće diskutovani u poglavlju 2.2.4.

Iako je specifikacijama IPv4 i IPv6 predviđena mogućnost markiranja paketa radi prenosa različitim prioritetima, Internet se od početka zasnivao na servisu najboljeg pokušaja (*best effort*). To znači da se informacije prenose bez garancija performansi kao što su kašnjenje, džiter i verovatnoća gubitka paketa. Devedesetih godina postala su aktuelna razmatranja prenosa multimedijalnih informacija u realnom vremenu. To je uslovilo intenzivan istraživački rad na *multicast* rutiranju i arhitekturama kvaliteta servisa (*Quality of Service*, QoS). Razvoj aplikacija za prenos glasa preko Interneta (*Voice over IP*, VoIP) bio je glavna pokretačka snaga za permanentno unapređivanje rešenja u oblasti kvaliteta servisa i za razvoj kontrolnih protokola (signalizacija poziva). Implementacija kvaliteta servisa u mrežama provajdera je relativno spor proces, uglavnom zbog velikih kapaciteta u mreži prenosa, koji omogućuju brz i pouzdan prenos informacija. Nasuprot tome, rešenja QoS su brzo prihvaćena u korporativnim mrežama, posebno za potrebe tzv. operativnih telekomunikacionih servisa, koji neposredno pružaju podršku konkretnoj delatnosti preduzeća.

Interesantno je da u ARPANET-u nisu razmatrani problemi bezbednosti informacija i infrastrukture mreže, iako je to bio vojni projekat. Polovinom devedesetih godina standardizovan je skup protokola (IPSec) koji obezbeđuju kripto-zaštitne mehanizme za tokove IP paketa, a protokoli rutiranja u domenu unapređeni su uvođenjem elementarnih mehanizama zaštite. Zaštita informacija i infrastrukture mreže je danas jedna od najaktuelnijih oblasti istraživanja Interneta.

Početkom novog milenijuma postalo je izvesno da će IP tehnologija predstavljati osnov za integraciju heterogenih telekomunikacionih servisa (glas, podaci, video). Zabeležen je eksponencijalni porast broja korisnika; prema statističkim podacima, Internet je 2010. godine imao blizu dve milijarde korisnika. Ekspanzija mobilnih komunikacija ima ogroman uticaj na razvoj arhitekture Interneta. Web servisi su bogati i veoma raznovrsni: napredno pretraživanje informacija, elektronska pošta (*Webmail*), novosti, elektronsko poslovanje, učenje na daljinu i dr. Društvene mreže (*Facebook*, *Twitter*) svakodnevno okupljaju stotine miliona aktivnih korisnika. Tako je Liklajderova vizija, posle pola veka, postala stvarnost.

1.2 Međunarodni standardi i preporuke

Jedan od ključnih faktora ekspanzije Interneta bio je slobodan i otvoren pristup dokumentaciji, prvenstveno specifikacijama protokola. Stiv Kroker (*Crocker*) je, od početka razvoja ARPANET-a, ustanovio seriju dokumenata poznatih pod nazivom "upit za komentare" (*Request for Comments*, RFC). RFC dokumenti bili su prvobitno namenjeni za brzu distribuciju i neformalnu razmenu ideja između istraživača. Kada bi se postigla neka vrsta konsenzusa (ili bar oblikovao skup ideja) pripreman je specifičan dokument, kao osnov za implementaciju konkretnog rešenja različitim timovima istraživača.

Vremenom su RFC dokumenti usredsređeni na standarde za protokole [1.5], iako i dalje postoji kategorija informativnih dokumenata, koji opisuju alternativne pristupe ili daju sistematizovane informacije o uočenim problemima.

Međunarodna organizacija **IETF** (*Internet Engineering Task Force*), osnovana 1986. godine, donosi i usvaja RFC dokumente – standarde, tehničke propise i informativne dokumente, koji se odnose na Internet i IP tehnologiju [1.6]. Rad IETF se odvija preko većeg broja radnih grupa i neformalnih diskusionih grupa, od kojih se svaka bavi specifičnom oblašću. Aktuelne oblasti standardizacije su aplikacije, rutiranje, bezbednost, prenos, infrastruktura za podršku aplikacija u realnom vremenu, nadzor i upravljanje i dr.

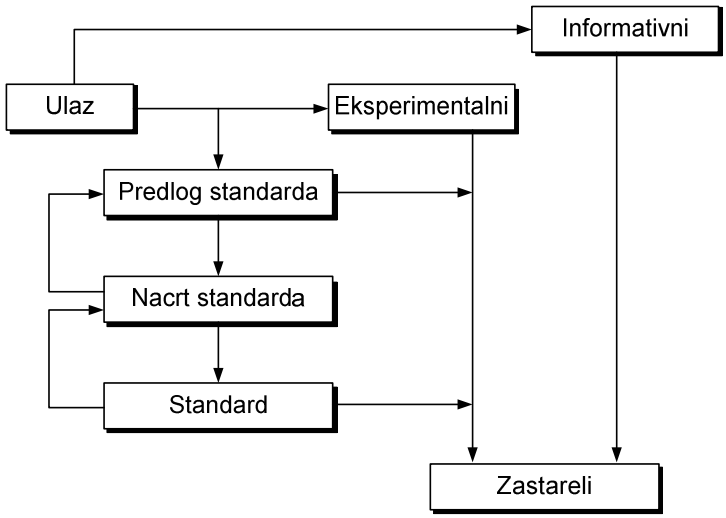
Postoji nekoliko kategorija RFC dokumenata: dokumenti sa oznakom standarda, informativni dokumenti, eksperimentalni dokumenti i dokumenti koji opisuju najbolja praktična iskustva. RFC dokumenti su numerisani prema hronološkom redosledu objavljivanja, bez ikakve kategorizacije po tipu ili oblasti istraživanja. Dokument se objavljuje kao tekstualni fajl, u kome su čak i slike urađene isključivo kombinovanjem specifičnih ASCII karaktera. Slobodno su dostupni na velikom broju Web sajtova širom sveta, a zvanični sajt za pretragu je RFC Editor, koji pripada organizaciji IETF.

Formalni proces donošenja Internet standarda je jednoznačno određen; specifikacija prolazi period razvoja i nekoliko iteracija revizije, pre nego što bude usvojena kao standard i objavljena [1.7], [1.8].

U praksi je taj proces znatno komplikovaniji, iz više razloga:

- postoji problem izrade specifikacije visokog tehničkog nivoa;
- pojavljuje se potreba da se uzmu u obzir i usklade interesi različitih zainteresovanih strana (na primer, različitih proizvođača opreme);
- usvajanje standarda podrazumeva uspostavljanje konsenzusa na nivou odgovarajuće radne grupe IETF;
- postoji realna teškoća da se ocene važnost i primenljivost konkretne specifikacije.

Tokom razvoja specifikacije, nacrt je slobodno dostupan javnosti za pregled i raspravu, ima oznaku "Internet draft" i važi šest meseci. Posle tog perioda, nacrt se publikuje kao RFC, ili prestaje da važi.



Slika 1-2. Proces usvajanja RFC dokumenta (IETF).

Dokumenti sa oznakom standarda (*standards track*) prolaze kroz tri faze razvoja: predlog standarda, nacrt standarda i standard, kao što je prikazano na slici 1-2.

Predlog standarda je relativno stabilan, tehnički ispravan i jasan dokument. Pre nego što definitivno postane standard, ostavlja se vreme da iskustvo pokaže da li će pretrpeti određene promene, ili eventualno biti opozvan.

Nacrt standarda je specifikacija iz koje su proistekle najmanje dve nezavisne i interoperabilne implementacije. Ovaj nivo je već vrlo visok, jer

pokazuje da je specifikacija zrela i primenljiva u praksi.

Internet standard je specifikacija koja je je potvrđena masovnom implementacijom i značajnim iskustvom u eksploataciji. Standard se karakteriše visokim tehničkim nivoom, a rešenje protokola ili servisa koje je u njemu definisano ima opšti značaj za Internet zajednicu. Takvoj specifikaciji se dodeljuje oznaka "STD" i odgovarajući redni broj standarda, pri čemu istovremeno zadržava i svoj RFC broj.

Eksperimentalni RFC dokumenti obično predstavljaju rezultat nekog istraživačko-razvojnog projekta. Takve specifikacije objavljuju se kao opšta informacija za javnost, a podležu razmatranju i verifikaciji urednika odgovarajuće oblasti.

Informativni RFC dokumenti sadrže opšte informacije o određenoj oblasti, koje ne podležu konsenzusu niti predstavljaju preporuku za implementaciju. Njihova osnovna namena je da pruže aktuelne informacije o određenoj temi ili oblasti istraživanja. Proces objavljivanja je sličan kao za eksperimentalne dokumente.

Namena RFC dokumenata koji opisuju najbolja praktična iskustva je da standardizuju određena rešenja koja su već verifikovana u praksi. To je vrlo značajno zbog decentralizovane strukture Interneta, koju sačinjava mnoštvo heterogenih mreža. Proces usvajanja takvog dokumenta je sličan kao donošenje predloga standarda.

Organizacija **IRTF** (*Internet Research Task Force*) je usredsređena na istraživanje novih oblasti koje još nisu zrele za standardizaciju u IETF, kao i za istraživanje oblasti koje nisu direktno predmet standarda, ali mogu da budu koristan osnov za donošenje budućih standarda [1.9].

IAB (*Internet Architecture Board*) je komitet koji nadgleda standarde IETF-a, kontroliše proces objavljivanja RFC dokumenata i obezbeđuje pregled svih sadašnjih i budućih aspekata arhitekture i protokola Interneta [1.10]. IAB je takođe nadležan za kontrolu rada istraživačke organizacije IRTF.

Osim IETF-a, postoje druge međunarodne organizacije koje usvajaju standarde i preporuke za rešenja iz oblasti IP tehnologije. Među njima je posebno značajan Sektor za standardizaciju telekomunikacija u okviru Međunarodne unije za telekomunikacije – **ITU-T** (*International Telecommunication Union – Telecommunication standardization sector*). ITU-T preporuke su organizovane po tehničkim oblastima, tzv. serijama, čije oznake počinju slovima abecede. U okviru serije, svaka preporuka identifikuje se jedinstvenim rednim brojem. Preporuke koje se tiču IP tehnologije pripadaju Y-seriji. Osim Y-serije, relevantne su preporuke X-serije (mreže za prenos podataka), G-serije (sistemi prenosa), M-serije (sistemi za nadzor i upravljanje), E-serije (eksploatacija mreža) i I-serije (mreže sa integrisanim servisima). Od 2007. godine, ITU-T preporuke su, u elektronskom obliku, slobodno dostupne na više jezika, na Web

sajtu ove organizacije.

ETSI (*European Telecommunication Standard Institute*) je institut koji donosi evropske standarde, tehničke propise i različite tehničke izveštaje u oblasti telekomunikacija.

IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) je profesionalna međunarodna organizacija, koja se, pored ostalih aktivnosti, bavi standardizacijom žičnih i bežičnih lokalnih računarskih mreža (*Local Area Network*, LAN) i gradskih mreža (*Metropolitan Area Network*, MAN). Od 2008. godine, IEEE standardi su, u elektronskom obliku, slobodno dostupni na Web sajtu ove organizacije, najranije šest meseci nakon usvajanja.

ISO (*International Organization for Standardization*) je dobrovoljna međunarodna organizacija, čija je delatnost, u kontekstu paketskih mreža, bila značajna zbog standardizacije referentnog modela protokola za povezivanje otvorenih sistema (*Open Systems Interconnection*, OSI).

Pored organizacija za standarde, značajne su aktivnosti nekoliko foruma i velikih međunarodnih projekata, iz kojih proističu odgovarajući tehnički izveštaji i preporuke iz različitih oblasti istraživanja IP tehnologije.

3GPP (*Third Generation Partnership Project*) objedinjuje više organizacija za standarde, a primarno donosi standarde za mobilne sisteme treće generacije. 3GPP specifikacije igraju značajnu ulogu i u koncepciji rešenja za mreže naredne generacije, koje su u potpunosti zasnovane na IP tehnologiji.

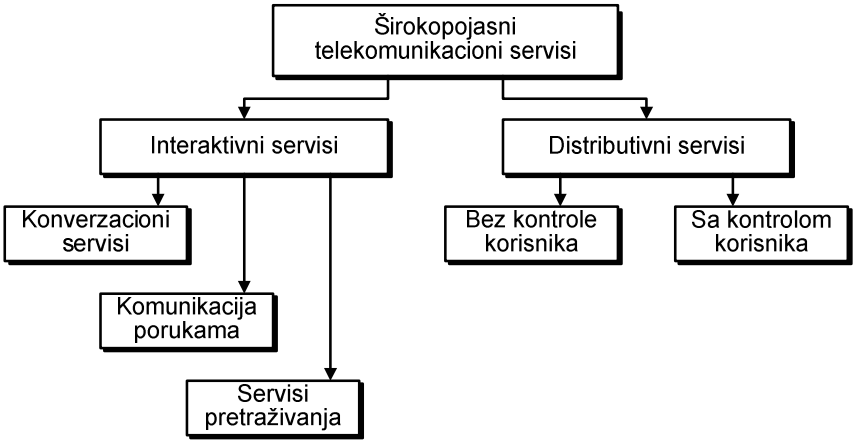
MEF (*Metro Ethernet Forum*) je dobrovoljna međunarodna alijansa koja obuhvata veliki broj heterogenih organizacija, kao što su provajderi servisa, kablovski operatori, proizvođači opreme i softvera, kao i organizacije koje se bave testiranjem proizvoda. Pored tehničkih propisa za MAN mreže, aktuelne aktivnosti ove organizacije tiču se preporuka i tehničkih propisa za operatorski (*Carrier*) *Ethernet*, odnosno implementaciju *Ethernet* tehnologije u mrežama širokog područja (*Wide Area Network*, WAN).

Broadband **forum** je globalni neprofitabilni industrijski konzorcijum koji se bavi specifikacijama rešenja za fiksne, žične širokopojasne telekomunikacione mreže (u okosnici i pristupu).

Navedene organizacije sarađuju i koordiniraju aktivnosti u donošenju standarda, tehničkih propisa i preporuka iz relevantnih oblasti istraživanja. Međunarodni standardi i preporuke su od izuzetnog značaja za proizvođače mrežne opreme, telekomunikacione operatore, provajdere Internet servisa i generalno za korisnike opreme. Standardima se, pre svega, obezbeđuje odgovarajući kvalitet i interoperabilnost opreme različitih proizvođača. Ispitivanje interoperabilnosti vrši se posebnim testovima kompatibilnosti (konformnosti) opreme sa standardima.

1.3 Klasifikacija telekomunikacionih servisa

Za savremene IP mreže karakteristična je integracija heterogenih telekomunikacionih servisa. To znači da je u mreži istovremeno prisutan agregatni IP saobraćaj, koji potiče od heterogenih aplikacija; različite aplikacije postavljaju različite zahteve u pogledu kvaliteta servisa. U nastavku će biti izložena ITU-T klasifikacija širokopojasnih telekomunikacionih servisa [1.11], koja omogućuje razumevanje heterogene prirode servisa, iz koje proističu odgovarajući zahtevi telekomunikacionom sistemu. Najopštija podela servisa je na interaktivne i distributivne, kao što je prikazano na slici 1-3.



Slika 1-3. Klasifikacija telekomunikacionih servisa prema ITU-T preporuci I.211 [1.11].

Interaktivni servisi podrazumevaju dvosmernu komunikaciju između dva ili više krajnjih korisnika ili između krajnjeg korisnika i mrežnog hosta/ servera. Oni se dalje dele na konverzacione servise, servise komunikacije porukama i servise pretraživanja informacija.

Konverzacioni servisi pretpostavljaju interaktivni dijalog u realnom vremenu, što znači da podrazumevaju istovremeno prisustvo i kooperaciju komunikacionih partnera (entiteta) između kojih je uspostavljena veza. Glavna karakteristika ovih servisa su strogi zahtevi za kašnjenje i varijaciju kašnjenja (džiter). Karakteristični primeri servisa su VoIP i multimedijalne konferencije (videokonferencijski servisi, audio-grafičke konferencije).

U multimedijalnim konferencijama, komunikacija između učesnika treba da se odvija prirodno, bez perceptivnih audiovizuelnih teškoća. Stoga je bitan zahtev sinhronizacija unutar i između pojedinih medija (tipično, audio i video signala, tzv. "sinhronizacija usana"). Kvalitetna multimedijalna konferencija zahteva integritet podataka, odnosno što manju verovatnoću gubitka informacija.

Kategoriji konverzacionih servisa takođe pripadaju: akvizicija informacija u realnom vremenu (sistemi automatskog upravljanja, video nadzor objekata), finansijske transakcije preko Interneta, *on-line* razmena poruka, interaktivne igre i dr.

Komunikacija porukama pretpostavlja dijalog koji nije u realnom vremenu, već se zasniva na principu "sačuvaj i prosledi" (*store and forward*). To znači da odgovarajući mrežni serveri prihvataju, čuvaju, prosleđuju i isporučuju informacije. Ovakvi servisi se nazivaju kolaborativnim, zbog toga što podrazumevaju deljenje podataka i/ili resursa mreže. Primeri komunikacije porukama su elektronska pošta i deljenje fajlova. Komunikacioni zahtevi zavise od konkretnog servisa. Na primer, prenos elektronske pošte ne postavlja specifične zahteve za kvalitet servisa. Deljenje fajlova zahteva ograničeno kašnjenje, ali ne pripada vremenski kritičnim servisima.

Servisi pretraživanja informacija obuhvataju arhiviranje, pretraživanje, pregled i transfer različitih vrsta informacija. Navedene operacije izvršavaju se samo na zahtev korisnika. Primeri servisa su manipulacija bazama podataka i pretraživanje raznovrsnih multimedijalnih dokumenata. Glavni zahtevi ovih servisa odnose se na integritet podataka i veliki propusni opseg u smeru od mreže (servera) ka krajnjem korisniku. Iako se ovi servisi ne izvršavaju u realnom vremenu, brzina prenosa informacija bitno doprinosi ukupnom kvalitetu servisa.

Distributivni servisi podrazumevaju prenos određenih informacija od centra (provajdera servisa) ka krajnjim korisnicima, a mogu biti sa ili bez kontrole korisnika.

Distributivni servisi bez kontrole korisnika su radio i TV difuzija. Karakteriše ih kontinualan tok informacija od centra ka velikom broju pretplatnika. Pretplatnici imaju neograničen pristup informacijama, bez uticaja na njihov tok i sadržaj.

Distributivni servisi sa kontrolom korisnika podrazumevaju mogućnost da pretplatnik zahteva od provajdera servisa distribuciju određenih informacija, koje su obično memorisane (snimljene) i pogodne za cikličnu reprodukciju. Tipičan primer takvog servisa je video na zahtev (*Video on Demand*, VoD).

Internet originalno nije bio namenjen za podršku distributivnih servisa, ali se situacija značajno promenila u smislu pružanja IPTV servisa i servisa distribucije sadržaja (*content distribution*), koji su detaljnije objašnjeni u poglavlju 1.5.

Karakteristični zahtevi pojedinih servisa prikazani su u tabeli 1-1. Čitaocu se preporučuje da, za detaljniji opis heterogenih aplikacija i njihovih zahteva, konsultuje ITU-T preporuke E.802 [1.12] ili G.1010 [1.13].

Tabela 1-1. Tipični zahtevi za servise [1.14]

Aplikacija	Brzina (od mreže ka korisniku)	Zahtev za kašnjenje	Ostali zahtevi
VoIP	64 kb/s	200ms	Zaštita
Video konferencija	2 Mb/s	200ms	Zaštita
Deljenje fajlova	3 Mb/s	1s	–
Televizija standardne rezolucije (SDTV)	4,5 Mb/s/ch	10s	*Multicasting*
Video u realnom vremenu	10 Mb/s	200ms	Distribucija sadržaja
Video na zahtev (VoD)	20 Mb/s	10s	Mali gubici
Televizija visoke rezolucije (HDTV)	20 Mb/s/ch	10s	*Multicasting*
Softver mrežnog hosta	25 Mb/s	200ms	Zaštita podataka

1.4 Pregled tehnologija prenosa u okosnici IP mreža

Stalni porast broja korisnika i razvoj novih aplikacija koje zahtevaju veliki propusni opseg čini IP saobraćaj dominantnim i zahtevnim u pogledu kapaciteta mreže prenosa. To se odražava na arhitekturu i tehnologije transportnih mreža, kao i na intenzivan porast broja korisnika različitih tehnologija širokopojasnog pristupa [1.15], [1.16].

U okosnici telekomunikacionih mreža koriste se monomodna optička vlakna, optimizovana za rad u drugom i trećem optičkom prozoru (na talasnim dužinama, 1310nm i 1550nm, respektivno). Infrastruktura optičkih kablova je sve prisutnija i u mreži za pristup, u kojoj se postepeno širi od operatora ka krajnjim korisnicima (FTTx – *Fiber-To-The-node/cabinet/ building/home*).

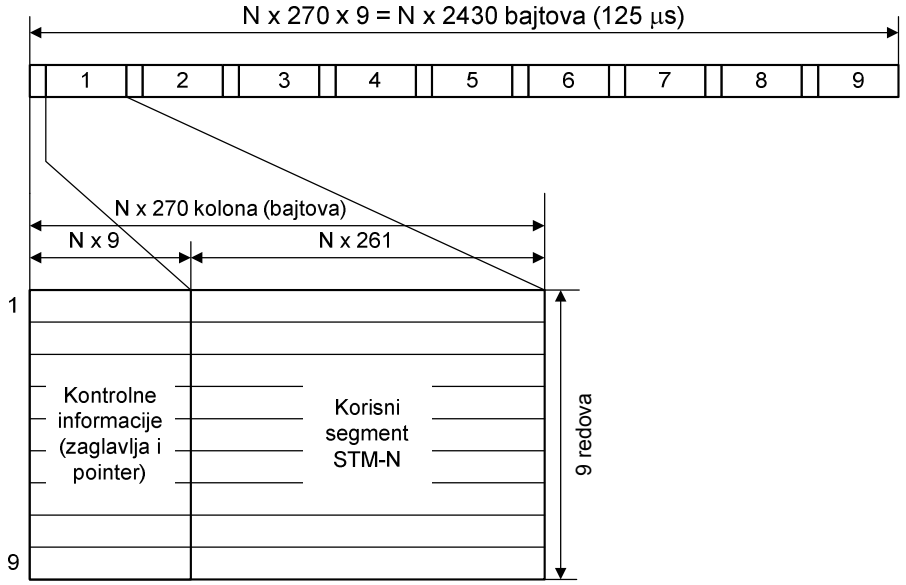
Najrasprostranjenija tehnologija prenosa u okosnici je **SDH/SONET** (*Synchronous Digital Hierarchy/Synchronous Optical Network*). Ova tehnologija je zasnovana na vremenskom multipleksiranju signala (*Time Division Multiplexing*, TDM). SDH je ITU-T/ETSI standard, koji se primenjuje u Evropi. SONET je američki standard, koji se primenjuje u Severnoj Americi. Tehnologije su u potpunosti kompatibilne, kao što je prikazano u tabeli 1-2. Osnovna jedinica prenosa u SDH transportnoj mreži je sinhroni transportni modul STM-1, koji obezbeđuje protok 155,52 Mb/s. Veći protoci dobijaju se multipleksiranjem STM-1 u strukture STM-N, gde je N=4, 16, 64, 256. Prenosi se 8000 ramova u sekundi.

Osnovni format STM-N rama uobičajeno se predstavlja u matričnoj formi, kao što je prikazano je na slici 1-4, a obuhvata kontrolne informacije i korisni segment.

Tabela 1-2. Veza između SDH i SONET sistema

SDH		SONET	
Oznaka	Binarni protok [Mb/s]	Oznaka	Binarni protok [Mb/s]
STM-0	51,84	STS-1/OC-1	51,84
STM-1	155,52	STS-3/OC-3	155,52
STM-4	622,08	STS-12/OC-12	622,08
–	–	STS-24/OC-24	1244,16
STM-16	2488,32	STS-48/OC-48	2488,32
STM-64	9953,28	STS-192/OC-192	9953,28
STM-256	39813,12	STS-768/OC-768	39813,12

STM (*Synchronous Transport Module*) – sinhroni transportni modul
STS (*Synchronous Transport Signal*) – sinhroni transportni signal
OC (*Optical Carrier*) – optički nosilac



Slika 1-4. STM-N ram.

Pritočni signali iz različitih tipova mreža mapiraju se na odgovarajući način u korisni segment STM-N rama. SDH tehnologija omogućuje izgradnju fleksibilne transportne mreže sa raznovrsnim topologijama. U mreži se primenjuju različiti tipovi multiplekserskih uređaja i uređaja za kros-konekciju. Visoka raspoloživost postiže se zahvaljujući primeni redundantnih mehanizama – zaštite i restauracije saobraćaja, čime se osigurava pouzdan prenos informacija i

u uslovima otkaza pojedinih delova mreže. Za SDH su karakteristične topologije unidirekcionalnih i bidirekcionalnih prstenova, koji pružaju mogućnost automatske obnove telekomunikacionih servisa u slučaju otkaza u mreži (tzv. "samoizlečivi" prstenovi).

SDH tehnologija je vrlo dobro prilagođena prenosu signala iz klasične telefonske mreže, kao i prenosu saobraćaja iz paketskih mreža kao što je ATM (*Asynchronous Transfer Mode*). Za potrebe prenosa IP saobraćaja, inicijalno je korišćen PoS (*Packet over SONET/SDH*) protokol. Nova generacija SDH sistema (NG-SDH) unapređena je fleksibilnijim mehanizmima mapiranja pritočnih signala, tako da zapravo predstavlja multiservisnu transportnu platformu, koja može da zadovolji zahteve različitih tipova saobraćaja, da podrži različite protokole i omogući fleksibilno korišćenje propusnog opsega.

Postoje dva glavna nedostatka SDH tehnologije:

- zahteva veoma skupu sinhronizaciju svih uređaja u transportnoj mreži;
- stalni porast IP saobraćaja potencijalno može da prevaziđe kapacitete SDH sistema.

WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) omogućuje multipleksiranje optičkih signala koji se prenose po jednom vlaknu, korišćenjem različitih talasnih dužina. Tako se na ekonomičan način postiže proširenje raspoloživih kapaciteta i transparentan prenos signala različitih tehnologija. WDM sistemi mogu da prenose različito kodovane signale, ali se uobičajeno koriste za prenos TDM ili *Ethernet* okvira.

Talasne dužine koje se koriste u WDM sistemima su standardizovane ITU-T preporukama, koje definišu tzv. "rešetke" (*grid*), a to su skupovi uniformno raspoređenih talasnih dužina pogodnih za specifične primene.

Tako, tehnika konvencionalnog multipleksiranja po talasnim dužinama (*Coarse Wavelength Division Multiplexing,* CWDM) koristi skup od 18 talasnih dužina, raspoređenih u opsegu od 1270nm do 1610nm, na međusobnim rastojanjima 20nm; protok po kanalu je 2,5 Gb/s.

Za tehnike gustog multipleksiranja (*Dense Wavelength Division Multiplexing*, DWDM) definisano je nekoliko skupova talasnih dužina. Koriste se C-opseg (1528-1561nm) i L-opseg (1561-1620nm), a rastojanja između talasnih dužina su manja od 1nm. Ovi sistemi obezbeđuju znatno veći broj kanala, sa protokom po kanalu 10 Gb/s ili 40 Gb/s.

Evolucija ka DWDM sistemima prenosa (slika 1-5) pretpostavlja da se zadrže postojeći SDH sistemi prenosa radi obezbeđivanja transportnih servisa za klasične telekomunikacione servise (telefonija, prenos podataka koji nisu prilagođeni IP protokolu), a da se za prenos IP saobraćaja iskoriste dodatni kapaciteti koje pruža DWDM.



a) *b)*

Slika 1-5. Profil okosnice telekomunikacione mreže: a) korišćenje SDH sistema prenosa; b) evolucija ka DWDM sistemima prenosa.

Na kraju ovog pregleda, treba napomenuti da se celo optičko vlakno može posmatrati kao jedan komunikacioni kanal, bez obzira na tehnologiju prenosa koja se koristi po tom vlaknu. Svič (*fiber switch*) je optički uređaj, koji u tom slučaju vrši transparentno prebacivanje svih podataka sa jednog na drugo optičko vlakno [1.15].

1.5 Pravci razvoja arhitekture Interneta

Tokom više od 40 godina, Internet je evoluirao od vojnog projekta, preko akademske mreže do ogromne komercijalne platforme. Postao je integralni i neophodni deo svakodnevnog života, privrede i društva. Dinamika Interneta podrazumeva kontinuiran razvoj tehničko-tehnoloških rešenja. U nastavku su navedeni najaktuelniji pravci razvoja arhitekture Interneta, koji su predmet brojnih međunarodnih naučno-istraživačkih projekata [1.17].

Mobilnost i pristup mreži sa bilo koje lokacije. Evidentan je pomeraj od desktop računarskih sistema ka lap-top računarima i mobilnim uređajima. Mobilnost korisnika i/ili terminala je jedan od najvažnijih pokretačkih faktora za dalji razvoj Interneta i IP tehnologije. Postavljaju se zahtevi za konvergenciju različitih tipova mreža, kao što su IP mreže, javni sistemi mobilne telefonije, bežične ad hoc i senzorske mreže, koje se zasnivaju na različitim standardima i implementiraju različite poslovne modele. Razmatranje mobilnosti kao sastavnog dela arhitekture IP mreže je jedna od suštinskih karakteristika mreža naredne generacije. Značajni istraživački napori usmereni su ka pronalaženju kompromisa između mobilnosti sa jedne strane i skalabilnosti, bezbednosti infrastrukture mreže i zaštite privatnosti korisničkih podataka, sa druge strane.

Distribucija sadržaja. Prvobitna namena Interneta za podršku komunikacije host-host (interaktivnih servisa) menja se u smislu značajne podrške distributivnih servisa. CDN (*Content Distribution Network*) je sistem

koji sadrži kopije određenih podataka (Web objekti, softver, audio i video zapisi, baze podataka) u različitim Web serverima u mreži. Koncept CDN pretpostavlja postojanje geografski dislociranih keš-servera koji čuvaju kopije takvih sadržaja; kada korisnik želi da preuzme određene podatke, zahtev se opslužuje sa najbližeg servera. Pravilno projektovana i implementirana CDN značajno poboljšava pristup različitim sadržajima, u smislu brzog odziva i visoke redundantnosti servisa [1.18]. Pod pravilnim projektovanjem se prvenstveno podrazumeva strateško raspoređivanje keš-servera po regionima, odnosno na periferiji mreže da bi se izbeglo preopterećenje okosnice. Na primer, ako je okosnica mreže kapaciteta 10 Gb/s, a kapacitet centralnog servera 100 Gb/s, jasno je da su mogućnosti isporuke ograničene kapacitetom okosnice. Problem se može prevazići tako što se, pored centralnog servera, instalira nekoliko servera (sa identičnim sadržajima) na periferiji mreže, tako da svaki od njih opslužuje određeni region. Uvođenje koncepta CDN ima značajan uticaj na dalji razvoj arhitekture Interneta, u smislu potrebe za novim metodima zaštite privatnosti sadržaja, razvoja skalabilnih algoritama za određivanje optimalnog servera i redirekciju korisničkih zahteva, razvoja novih protokola za pristup različitim sadržajima, implementacije kvaliteta servisa i dr.

Cloud-computing **arhitekture.** Model pristupa zajedničkom skupu umreženih konfigurabilnih računarskih resursa (mreža, serveri, čuvanje podataka, aplikacije i servisi) naziva se "*cloud computing*" [1.19]. Termin *"cloud"* (oblak) je asocijacija na uobičajenu grafičku predstavu telekomunikacione mreže. Računarskim resursima lociranim u mreži pristupa se preko različitih terminalskih uređaja – mobilnih telefona, lap-top računara ili PDA (*Personal Digital Assistant*) uređaja. Migracija računarskih resursa iz hostova u mrežu zahteva nove arhitekture, čije su ključne komponente centri podataka. Potrebno je projektovati sigurne, pouzdane, skalabilne i robusne arhitekture za međusobno povezivanje i integraciju korisničkih, kontrolnih i upravljačkih informacija u centrima podataka. Glavni tehnički izazov predstavlja obezbeđivanje pouzdanosti i raspoloživosti servisa, uz obaveznu zaštitu privatnosti korisničkih podataka.

Bezbednost. Kao što je ranije istaknuto, mehanizmi zaštite nisu bili razmatrani u originalnom Internetu, već su postepeno dodavani tokom razvoja mreže. Arhitekture i mehanizmi zaštite, kao i upravljanje zaštitom predstavljaju imperative daljeg razvoja arhitekture Interneta. Istraživanja obuhvataju brojne tehničke, ekonomske i društvene aspekte. Značajan napredak ostvaren je u oblasti zaštite informacija, a zasniva se na tehnikama kontrole prava pristupa, sistemima za otkrivanje napada i kripto-zaštitnim mehanizmima. Poslednjih godina posvećena je pažnja zaštiti infrastrukture mreže (rutera, servera i gejtveja) od spoljnih i unutrašnjih napada. Osim toga, svako istraživanje novih rešenja u oblasti IP tehnologije mora da obuhvati diskusiju potencijalnih implikacija na bezbednost mreže i servisa.

Pouzdanost i održivost mreže. Integracija heterogenih servisa pretpostavlja visoko pouzdanu mrežu, koja je održiva i u uslovima otkaza pojedinih segmenata. Takav zahtev se može realizovati samo pomoću sofisticiranih i visoko automatizovanih sistema za nadzor i upravljanje, koji omogućuju efikasnu izolaciju otkaza, dinamičku rekonfiguraciju mreže i stalni nadzor performansi.

Internet objekata (*Internet of things*). Ovaj pristup pretpostavlja potpunu integraciju različitih objekata (predmeta) u informatičku mrežu, u kojoj ti objekti imaju aktivnu ulogu. Da bi se to ostvarilo, neophodna je jedinstvena identifikacija svakog objekta i njegova virtuelna prezentacija u strukturi zasnovanoj na Internetu [1.20]. Mnogi istraživači smatraju da je Internet objekata tehnološka revolucija koja predstavlja budućnost informaciono-komunikacionih sistema, čiji razvoj zavisi od dinamike razvoja različitih oblasti nauke i tehnike – od bežičnih senzorskih mreža do nanotehnologija.

Internet treba shvatiti kao sistem koji se neprekidno razvija i pred koji se stalno postavljaju zahtevi za ponudu novih ili poboljšanje postojećih servisa, što uslovljava kontinuirano istraživanje i razvoj odgovarajućih tehničkih rešenja. Korisnici, proizvođači opreme, telekomunikacioni operatori i provajderi servisa prihvataju kontinuiranu evoluciju kao glavno načelo filozofije Interneta.

1.6 Literatura

[1.1] L. Kleinrock, "An Early History of the Internet", *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, no. 8, August 2010, pp. 26-36.

[1.2] B. M. Leiner, V. G. Cerf, D. D. Clark, R. E. Kahn, L. Kleinrock, D. C. Lynch, et al. "A Brief History of the Internet". [Online]. Available: http://www.isoc.org/internet/history/brief.shtml. (Updated 2011).

[1.3] V. G. Cerf, "In Memory of Paul Baran", *IEEE Network*, vol. 25, no. 3, May/June 2011, pp. 2-4.

[1.4] A. Curtis, "A Brief History of the World Wide Web". [Online]. Available: http://www.uncp.edu/home/acurtis/Courses/ResourcesForCourses/WebHistory.html. (2011).

[1.5] D. Thaler, B. Aboba, "What Makes for a Successful Protocol?", RFC 5218 (Informational), IETF, 2008.

[1.6] H. Alvestrand, "A Mission Statement for the IETF", RFC 3935 (Best Current Practice), IETF, 2004.

[1.7] S. Bradner, "The Internet Standards Process - Revision 3", RFC 2026 (Best Current Practice), IETF, 1996.

[1.8] L. Dusseault, R. Sparks, "Guidance on Interoperation and Implementation Reports for Advancement to Draft Standard", RFC 5657 (Best Current Practice), IETF, 2009.

[1.9] S. Floyd, V. Paxson, A. Falk, "IAB Thoughts on the Role of the Internet Research Task Force (IRTF)", RFC 4440 (Informational), IETF, 2006.

[1.10] R. Atkinson, S. Floyd, "IAB Concerns and Recommendations Regarding Internet Research and Evolution", RFC 3869 (Informational), IETF, 2004.

[1.11] ITU-T Recommendation I.211, "B-ISDN Service Aspects", 1993.

[1.12] ITU-T Recommendation E.802, "Framework and Methodologies for the Determination and Application of QoS Parameters", 2007.

[1.13] ITU-T Recommendation G.1010, "End-user Multimedia QoS Categories", 2001.

[1.14] L. G. Kazovsky, D. Gutierrez, W-T. Shaw, G. Wong, "Broadband Fiber Access", a tutorial from the IEEE Communications Society. [Online]. Available: http://www.comsoc.org/freetutorials.

[1.15] M. N. Ellanti, S. S. Gorshe, L. G. Raman, W. D. Grover, *Next Generation Transport Networks – Data, Management, and Control Planes*, Springer, 2005.

[1.16] E. S. Cohen (ed.), *Broadband Internet: Access, Regulation and Policy*, Nova Science Publishers, Inc., New York, 2007.

[1.17] S. Paul, J. Pan, R. Jain, "Architectures for the Future Networks and the Next Generation Internet: A Survey", *Computer Communications*, vol. 34, no. 1, January 2011, pp. 2–42.

[1.18] J. Choi, J. Han, E. Cho, T. T. Kwon, Y. Choi, "A Survey on Content-Oriented Networking for Efficient Content Delivery", *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 3, March 2011, pp. 121-127.

[1.19] P. Mell, T. Grance, "The NIST Definition of Cloud Computing", NIST Special Publication 800-145 (draft), 2011.

[1.20] H. Sundmaeker, P. Guillemin, P. Friess, S. Woelfflé, *Vision and Challenges for Realising the Internet of Things*, European Commission, Information Society and Media, March 2010.