4 Arhitekture bežičnih mreža

U ovom predmetu, naš glavni fokus usmeren je na istraživanje i razumevanje komunikacionih tehnologija koje omogućavaju formiranje bežičnih mreža pametnih uređaja. Osnovna svrha pametnog uređaja jeste da prikupljaju relevantne podatke iz svog okruženja i/ili direktno upravljaju fizičkim objektima koji su pod njegovom kontrolom. Međutim, važno je napomenuti da pametini uređaji retko funkcionišu izolovano; njihova potpuna efikasnost i svrha se ostvaruju tek kada su integrisani u širi sistem. Stoga, koncept pametnog uređaja uključuje komunikaciju i interakciju sa drugim pametnim uređajima, čime se ostvaruje sinhronizovana i koordinisana funkcionalnost. Takođe, pametni uređaji mogu dostavljati prikupljene podatke eksternim entitetima, kao i izvršavati zadatke koji su im dodeljeni od strane eksternih agenata ili sistema. Dakle, pametni uređaj je, ako ne uvek, onda po pravilu deo komunikacione mreže koja omogućava deljenja podataka, koordinaciju i zajedničko izvršenje različitih funkcija.

Komunikaciona mreža

Komunikaciona mreža je skup međusobno povezanih računara i drugih uređaja koji koriste zajedničke resurse za razmenu podataka i informacija. Razmena podataka može se odvijati unutar ograničenog prostora, kako u lokalnoj mreži, ili na velikim udaljenostima, tako i u globalnoj mreži poput Interneta. Osnovna svrha komunikacionih mreža je omogućiti efikasnu i pouzdanu komunikaciju između različitih uređaja i korisnika. Ključne karakteristike komunikacionih mreža uključuju:

Povezivanje uređaja: Omogućava povezivanje računara, pametnih telefona, servera, senzora i drugih uređaja radi deljenja resursa i informacija i međusobne koordinacije.

Prenos podataka: Pruža infrastrukturu za prenos podataka između uređaja, koristeći različite tehnologije poput žičane ili bežične komunikacije.

Skalabilnost: Mogućnost povećanja kapaciteta i dodavanja novih uređaja kako bi se zadovoljile rastuće potrebe mreže.

Pouzdanost: Pruža mehanizme za održavanje pouzdane komunikacije, uključujući detekciju i oporavak od grešaka.

Energetska efikasnost: Posebna pažnja se posvećuje energetskoj efikasnosti, pre svega u aplikacijama sa baterijskim napajanjem, kako bi se produžio vek trajanja baterije/uređaja

Sigurnost: Implementacija mera sigurnosti radi zaštite podataka od neovlašćenog pristupa i napada.

Topologija: Mrežna topologija definiše način povezivanja uređaja u mreži, kao što su zvezda, stablo, rešetka i druge.

Protokoli: Upotreba standardizovanih protokola za prenos podataka, kao što su protokoli iz protokol-steka TCP/IP u kontekstu Interneta, kako bi se omogućila interoperabilnost između različitih uređaja i mrežnih komponenti.

Komunikacione mreže imaju različite primene, uključujući lokalne mreže unutar organizacija, šire mreže koje pokrivaju gradove ili regione, i globalne mreže koje obuhvataju celokupni svet, kao što je internet. Ove mreže često koriste različite tehnologije, uključujući Ethernet, WiFi, mobilne mreže, optičke kablove i drugo.

Bežične vs. žičane mreže

Potrebno je istaći da bežična komunikacija nije isključivi izbor za umrežavanje pametnih uređaja, jer je u nekim slučajevima racionalnije za ovu namenu koristiti žičanu mrežnu infrastrukturu, posebno ukoliko takva infrastruktura već postoji i ukoliko su uređaji stacionarni ili su zahtevi u pogledu komunikacije takvi da se mogu ostvariti samo upotrebom žičane mreže. U nastavku su navedene osnove prednosti i nedostaci bežičnog i žičanog pristupa, na osnovu kojih se, u zavisnosti od specifičnih potreba i uslova, u svakoj konkretnoj situaciji donosi odluka o načinu umrežavanja:

Bežične mreže

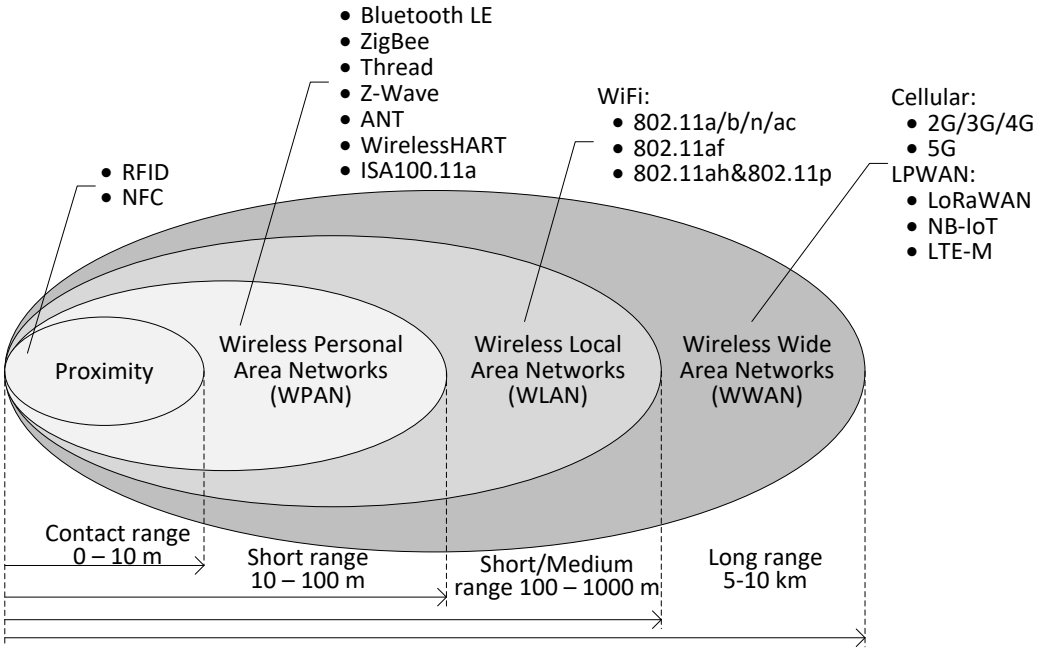
Prednosti	**Nedostaci**
Fleksibilnost: Bežična komunikacija omogućava veću mobilnost, jer nema potrebe za fizičkim povezivanjem sa uređajem	*Interferencija*: Bežične mreže su podložne interferenciji iz različitih izvora, poput drugih bežičnih uređaja ili fizičkih prepreka
Lakša i brža instalacija: Bežične mreže se relativno brzo i lako implementiraju, jer nema potrebe za postavljanjem kablova i specijalizovanih mrežnih uređaja.	*Ograničen domet*: Signali bežične komunikacije mogu imati ograničen domet, posebno u zatvorenom prostoru ili područjima s puno prepreka
Pristup teško dostupnim mestima: Bežična mreža omogućava komunikaciju na mestima gde je postavljanje žičane infrastrukture teško ili nemoguće	*Sigurnost*: Bežične mreže su podložnije sigurnosnim pretnjama (hakerski napadi i neovlašćen pristup) u poređenju sa žičanim mrežama
	Brzina i pouzdanost: U nekim slučajevima, žičane mreže mogu pružiti veću brzinu prenosa i pouzdanost od bežičnih mreža

Žičane mreže

Prednosti	**Nedostaci**
Stabilnost i pouzdanost: Žičane mreže obično pružaju stabilniji i pouzdaniji prenos podataka u poređenju sa bežičnim	*Ograničena mobilnost*: Dostupnost žičan infrastrukture i ograničena dužina kablova, što može ograničiti mobilnost uređaja
Veća brzina: Žičane mreže obično imaju veći kapacitet za prenos podataka, što rezultira u bržoj i efikasnijoj komunikaciji	*Veća složenost instalacije*: Instalacija žičane infrastrukture može biti složenija i zahtevati više vremena u poređenju sa postavljanjem bežične mreže
Manja podložnost interferencijama: Žičane veze su manje podložne interferencijama iz okoline	*Visoki troškovi*: Postavljanje i održavanje žičane mreže može biti skuplje, posebno ako je potrebna velika količina kabla

4.1 Klasifikacija bežičnih mreža

Danas postoji veliki broj bežičnih mrežnih tehnologija, odnosno tipova bežičnih mreža, koje su prilagođene različitim zahtevima brojnih primena. Glavna karakteristika bežične mrežne tehnologije se odnosi na obuhvat, odnosno na veličinu oblasti, ili geografskog područja, koje može da pokrije. Oblast pokrivanja konkretne mreže zavisi od radio dometa bežične komunikacije koja se koristi, ali i od sposobnosti mreže da obezbedi komunikaciju između uređaja koji nisu jedan drugom u radio dometu. Prema oblasti pokrivanja, bežične mreže se svrstavaju u sledećih nekoliko kategorija (Sl. 1):



Sl. 1 Klasifikacija bežičnih mreža prema oblasti pokrivanja

WPAN (*Wireless Personal Area Network*) – bežična lična mreža. „Lična“ u smislu da ove mreže funkcionišu u ličnom prostoru korisnika, za primene kao što je konekcija bežičnih slušalica ili pametnog sata sa mobilnim telefonom, prenos audio sadržaja sa mobilnog telefona na sistem za reprodukciju muzike, bežično povezivanje miša/tastature i računara i sl. Ove mreže koriste komunikaciju male snage i kratkog dometa, najčešće oko $10\ m$, sa brzinom prenosa od najviše nekoliko $Mbps$. Po pravilu, WPAN mreže rade u ISM opsegu frekvencije ($2.4 - 2.5\ GHz$). Najpoznatija komunikaciona tehnologija iz ove kategorije je *Bluetooth*, koji je prvobitno uveden kao bežična alternativa kablovskom povezivanju na malim rastojanjima (miš-računar). Savremene verzije Bluetooth-a (BLE) omogućavaju umrežavanje pametnih uređaja u mreže složene topologije, za primene poput *Smart Home*. Postoji još nekoliko WPAN mreža, od kojih najširu primenu nalaze ZigBee i Thread.

Posebna potkategorija u okviru WPAN su mreže veoma kratkog dometa (označeno kao *proximity* na Sl. 1). Reč je komunikacionim tehnologijama koje omogućavaju bežičnu komunikaciju samo na veoma malom rastojanju, najčešće reda cm, ili do najviše nekoliko metara, kao npr. RFID i NFC (prethodno poglavlje).

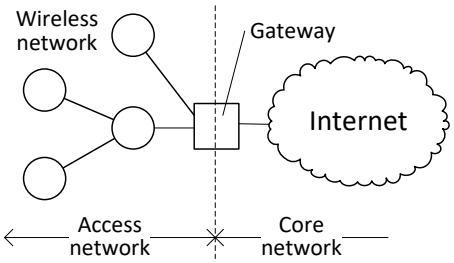
WLAN (*Wireless Local Area Network*) – bežične lokalne mreže. WLAN omogućava povezivanje različitih uređaja, poput računara, pametnih telefona, pametnih televizora i drugih bežičnih uređaja, unutar određenog ograničenog prostora, kao što je stan, kuća, zgrada ili kompleks zgrada. Tipično, WLAN koristi WiFi tehnologiju, ali moguće su i druge bežične tehnologije. Domet WiFi komunikacije, kao najzastupljenije u ovom domenu, kreće od nekoliko desetina metara do nekoliko stotina metara, ali u praksi može biti manji zbog prisustvo prepreka (zidovi, pregrade) i interferencije iz drugih uređaja. U zavisnosti od verzije, WiFi podržav brzine prenosa od nekoliko desetina $Mbps$ (starije verzije), do nekoliko $Gbps$ (najnovije verzije). WiFi radi u frekventnim opsezima $2.4\ GHz$ i $5\ GHz$. U odnosu na WPAN, WLAN mreže podržavaju značajno više brzine prenosa i pokrivaju nešto širi prostor, što je uslovljeno ciljnim primenama koje često zahtevaju veliki protok podataka i malu latenciju (kašnjenje). Velika brzina prenosa i veći domet neminovno vode ka većoj potrošni energije što WiFi čini manje atraktivnim za umrežavanje jednostavnih pametnih uređaja sa baterijskim napajanjem.

WWAN (*Wireless Wide Area Network*) – bežična širokopojasna mreža. WAN (bez jednog „W“ na početku) je tip mreže koji pokriva veliko geografsko područje, i koristi se za povezivanje različitih lokalnih mreža (LAN) na velikim udaljenostima. Ove mreže koriste različite tehnologije za prenos podataka, uključujući optička vlakna, satelitske veze i mikrotalasne veze. WWAN je bežični WAN koji koristi bežične tehnologije za povezivanje uređaja na velikim udaljenostima. Ove tehnologije uključuju mobilne mreže kao što su 3G, 4G i 5G i druge bežične tehnologije koje omogućavaju pristup Internetu i prenos podataka između uređaja koji se nalaze na različitim lokacijama. Domet mobilnih mreža (misli se na rastojanje mobilni uređaj – bazna stanica) je do $10\ km$, dok brzina prenosa podataka zavisi od generacije mobilne mreže – od $384\ kbps$ kod 2G, $42\ Mbps$ kod 3G, do $1\ Gbps$ kod 4G i nekoliko $Gbps$ kod 5G mreža. Mobilne mreže, zbog široke rasprostranjenosti, predstavljaju atraktivnu opciju za povezivanje pametnih uređaja, naročito u ruralnim oblastima (npr. sistemi za pametnu poljoprivredu), u sistemima za praćenje vozila, u sistemima pametnih gradova i sl. Međutim, nedostatak ovog pristupa je relativno velika potrošnja energije na strani uređaja, što predstavlja ozbiljan ograničavajući faktor. Zbog toga se za primene, poput prethodno nabrojanih, umesto konvencijalnih mobilnih mreža koriste tzv. LPWAN mreže (*Low-Power WAN*) koje su projektovane da omoguće veliki domet komunikacije sa niskom potrošnjom energije. LPWAN mreže su namenjena za povezivanje senzorskih uređaja, uređaja za praćenje i sličnih IoT (*Internet of Things*) uređaja koji šalju malu količinu podataka na velike udaljenosti, a istovremeno zahtevaju dug vek trajanja baterije.

Pristupne i osnovne mreže

Danas, većina komunikacionih mreža, pa i one koje se koriste u distribuiranim embeded sistemima, nije izolovana, već je uključena u globalnu mrežu, tj. Internet - kaže se, deo su Internet ekosistema. Povezanost na Internet pruža brojne pogodnosti, poput mogućnosti daljinskog upravljanja, monitoringa i ažuriranja softvera i firmvera uređaja. U ovom pogledu, bežična mreža pametnih uređaja se može posmatrati i kao pristupna mreža (*access network*), koja obezbeđuje pristup Internetu za umrežene uređaje. Koncept je ilustrovan na Sl. 2. Glavu ulogu u ovoj postavci igra uređaj pod nazivom *gateway* (mrežni prolaz), koji je s jedne strane član lokalne bežične mreži, dok sa druge strane ima pristup Internet mreži. Njegova funkcija je da prosleđuje podatke između uređaja u lokalnoj mreži i odredišta na Internetu. Suštinski problem je ovde to što se za komunikaciju na Internetu koristi, kao što znamo, set protokola TCP/IP, dok se u lokalnim bežičnim mrežama, po pravilu, koriste neki drugi protokoli, prilagođeni specifičnim zahtevima umrežavanja jednostavnih pametnih uređaja.

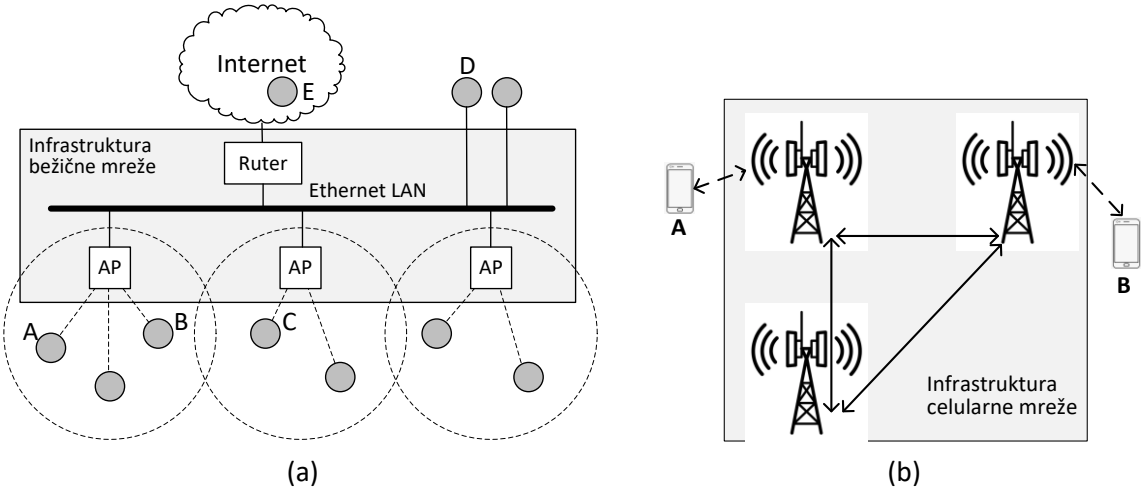
Tipovi mreža koji su pomenuti u klasifikaciji prema oblasti pokrivanja (WPAN, WLAN i WWAN) suštinski su pristupne mreže. Ove mreže, zapravo obezbeđuju pristup tzv. *core* mreži (osnovnoj mreži), koja povezuje različite pristupne mreže i omogućava rutiranje i prenos podataka na globalnom nivou. Osnovna mreža, u kontekstu Interneta, ima ključnu ulogu u međusobnom povezivanju različitih provajdera i različitih regiona. U ovoj mreži koriste se brze veze visokog kapaciteta, obično preko optičkih kablova.



Sl. 2 Bežična mreža kao pristupna mreža

Infrastrukturne i *ad-hoc* mreže

Infrastrukturne bežične mreže su najčešće proširenja žičane mrežne infrastrukture. Infrastrukturu ovakve mreže čini jedna ili više baznih stanica, ili pristupnih tačaka (AP – *Access Point*). AP poseduje RF transiver, za bežičnu komunikaciju, ali je takođe i povezan na fiksnu žičanu mrežu (npr. Ethernet LAN) i postavljen je na fiksno mesto (nije mobilan) – kao *gateway* na Sl. 2. WLAN mreže (WiFi) su tipičan primer infrastrukturne bežične mreža. Mrežni uređaji se pridružuju mreži posredstvom AP-a. WiFi bežična mreža nije ograničena na jedan AP. Više AP-ova povezanih na žičani LAN mogu da pokriju širu oblast, kao na Sl. 3(a). Ova mreža omogućava uređaju A da komunicira sa uređajem B u istoj bežičnoj mreži, sa uređajem C u nekoj drugoj bežičnih mreža koja je povezana na isti LAN, sa uređajem D koji je povezan direktno na LAN, kao i sa uređajem E, koji je negde na Internetu. Takođe, celularne WWLAN su infrastrukturne mreže. Mreža mobilne telefonije, ili celularna mreža, je tipičan primer, čija se infrastruktura sastoji iz baznih stanica povezanih pozadinskom mrežom (Sl. 3(b)).

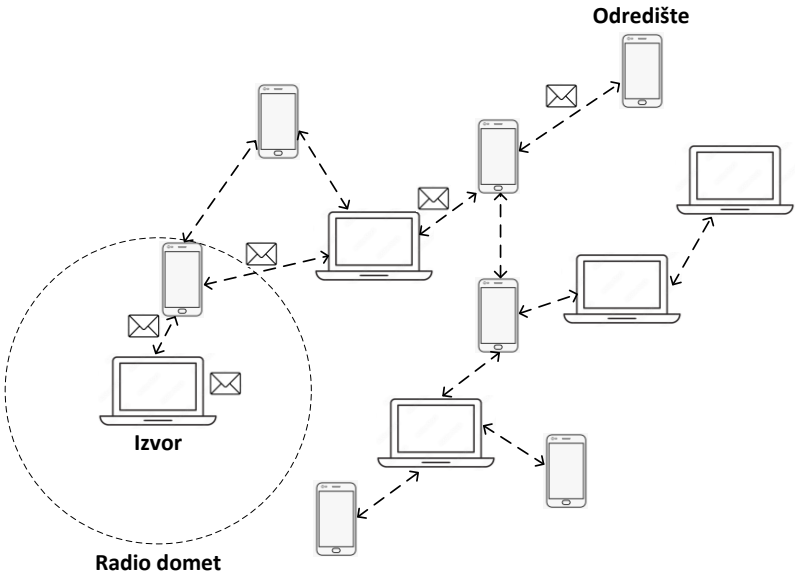


Sl. 3 Infrastrukturna bežična mreža: (a) WLAN, na primeru WiFi; (b) WWAN, na primeru celularne mreže (tj. mreže mobilne telefonije)

Ad hoc bežična mreža je generalni pojam koji se odnosi na decentralizovanu vrstu bežične mreže u kojoj uređaji komuniciraju direktno jedni s drugima, bez potrebe za centralizovanim pristupnim tačkama ili mrežnom infrastrukturom. U *ad hoc* mreži, svaki uređaj u mreži ima jednak status i može direktno da komunicira s drugim uređajima (Sl. 4). *Ad hoc* mreže se obično formiraju dinamički kako uređaji dolaze u blizinu jedni drugih. Uređaji se priključuju ili napuštaju mrežu po potrebi, a mreža se prilagođava promenama u sastavu uređaja. *Ad hoc* mreže često su privremene i formiraju se u svrhu određene komunikacije. Kada se zadovolje potrebe za komunikacijom, uređaji se mogu isključiti sa mreže i mreža kao takva prestaje da postoji. Uređaji u *ad hoc* mreži moraju biti sposobni za samostalnu organizaciju, kako bi mogli da se povežu i komuniciraju jedni s drugima bez oslanjanja na centralnu jedinicu. *Ad hoc* mreže su poznate i kao *peer-to-peer* mreže.

Ad hoc mreže uglavnom srećemo u domenu WPAN mreža, u scenarijima kada se uređaji poput mobilnog telefona, digitalne kamere, bežičnog *headset* (kombinacija mikrofona i slušalice) po potrebi međusobno povezuju. Na primer, po prijemu poziva, mobilni telefon se povezuje sa *headset*-om; nakon što je poziv završen, veza se raskida. *Ad-hoc* mreže nisu ograničene samo na 1-na-1 povezivanje, već ovaj pristup omogućava formiranje mreža složene strukture sa većim brojem uređaja, kao na Sl. 4. Na primer, zamislimo scenario u kome je mnoštvo bežičnih senzorskih uređaja slučajno raspoređeno u nekoj oblasti radi prikupljanja određenih podataka

ili obavljanja neke aktivnosti. Između ovih uređaja se uspostavlja mreža kako bi uređaji mogli međusobno da komuniciraju. Mreža pokriva veći geografski prostor, a prenos podataka između udaljenih uređaja se obavlja preko dinamički formiranih putanja, posredstvom jednog ili više među-uređaja u više „skokova“. Karakteristike *ad hoc* mreža se sreću i kod *smart home* sistema, gde sposobnost samo-organizovanja olakšava instalaciju i doprinosi fleksibilnosti sistema (dodavanje novih uređaja, premeštanje uređaja na drugu poziciju i slično).



Sl. 4 *Ad hoc* bežična mreža

U tabeli ispod je dato poređenje osnovnih karakteristika infrastrukturnih i *ad hoc* bežičnih mreža.

	Infrastrukturna mreža	***Ad hoc* mreža**
Infrastruktura	Postoji fiksna mrežna infrastruktura	Ne postoji fiksna mrežna infrastruktura
Topologija	Bazne stanice su fiksne. Topologija mreže (raspored baznih stanica) se retko menja. Mrežni uređaji mogu biti mobilni.	Mrežni uređaji mogu biti mobilni, topologija mreže se može dinamički menjati, najčešće kao posledica mobilnosti uređaja ili otkaza uređaja.
Mrežni uređaji	Glavnu ulogu u prenosu podataka igraju bazne stanice. Mrežni uređaji nisu uključeni u prenos podataka drugih uređaja.	Mrežni uređaji mogu da preuzimaju mrežne uloge, poput rutera i da prenose saobraća za druge uređaje
Linkovi	Mrežni uređaji pristupaju komunikacionoj infrastrukturi posredstvom baznih stanica, koje su povezane bežičnim ili žičanim vezama.	Veze između mrežnih uređaja su bežične. Komunikacija između udaljenih uređaja se ostvaruje preko više bežičnih linkova, tj. u više skokova

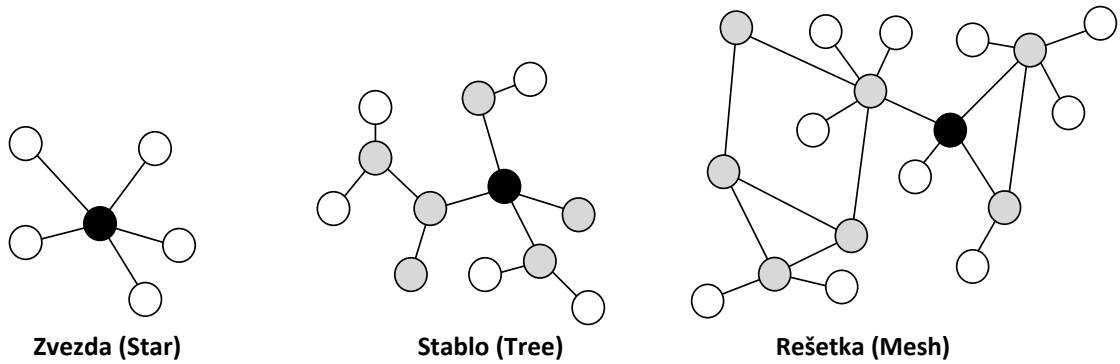
4.2 Topologije bežičnih mreža

Zamislimo kolekciju bežičnih uređaja raspoređenih u prostoru. Svaki uređaj poseduje mogućnost bežične komunikacije, ograničenog dometa. Za dva uređaja koja su jedan drugom u radio dometu kazaćemo da su susedi. Dalje, pretpostavimo da je u ovom sistemu formirana bežična mreža, što znači da svi čvorovi implementiraju protokole konkretne mreže i slede pravila komunikacije definisana tom konkretnom mrežom. Pravila komunikacije često uvode ograničenja u povezivanju uređaja, u smislu da uređaj može da uspostavi direktni bežični link samo sa nekim, ali ne i sasvim svojim susedima. Ako nacrtamo graf mreže, u kome je svaki uređaj predstavljen kružićem (čvorom), a svaka linija povezuje

dva uređaja/čvora koja mogu direktno da komuniciraju, nacrtali smo zapravo topologiju mreže. Dakle, topologija mreže je uslovljena prostornim rasporedom uređaja, relacijom susedstva između uređaja i restrikcijama u komunikaciji između suseda.

Na Sl. 5 su prikazane tri osnovne mrežne topologije: zvezda (*star*), stablo (*tree*) i rešetka (*mesh*). Dakle, potreban, ali ne i dovoljan uslov za postojanje bežičnog linka između dva čvora je da su oni jedan drugom u radio dometu, kako bi (fizički) komunikacija između njih bila moguća. Međutim, u zavisnosti od tipa mreže, obično postoje dodatna ograničenja, koja sprečavaju uspostavljanje linka između bilo kog para bliskih čvorova. Na primer, u topologiji zvezda, linkovi postoje samo između perifernih i centralnog čvora, ali ne i između perifernih čvorova, čak kada su oni na dovoljno bliskom rastojanju da bi mogli i direktno da komuniciraju. Kod topologije stabla, restriktivnost u uspostavljanju bežičnih linkova je manja, a kod rešetkaste topologije najmanja.

Kod bežičnih mreža, topologija najčešće nije statička, već se može, dinamički menjati tokom eksploatacije mreže. Obično postoji mogućnost da se novi čvor pridruži postojećoj mreži, ili da čvor napusti mrežu, bilo da je, prosto, uklonjen iz mreže, premešten na neku drugu lokaciju ili prestao sa radom zbog kvara. U mreži zvezdaste topologije, novo-dodati čvor se uvek povezuje sa centralnim čvorom. U mreži topologije stabla, novi čvor se može pridružiti mreži i povezati sa okolnim čvorovima, ali samo tako da mreža zadrži topologiju stabla. U mreži rešetkaste topologije postoji najveća sloboda povezivanja čvorova. U ovim mrežama topologija se često i „spontano“ menja (neki linkovi se izbacuju a drugi ubacuju) kako bi se uspostavile putanje za prenos podataka između nekog para udaljenih čvorova.



Sl. 5 Osnovne mrežne topologije

Uloge uređaja

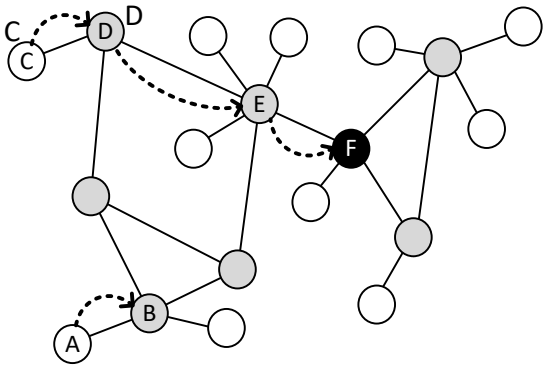
Prema komunikacionim mogućnostima, pametni uređaji se mogu svrstati u dve kategorije: *point-to-point* i *point-to-multipoint*. *Point-to-point* uređaj ima sposobnost da uspostavi bežični link samo sa jednim svojim susedom. Za *point-to-multipoint* uređaje ovo ograničenje ne važi i takvi uređaji mogu, po potrebi, da uspostavljaju bežične linkove sa bilo kojim podskupom suseda. Ove komunikacione mogućnosti nameću različite uloge čvorova u mreži. Na Sl. 5, čvorovi su obojeni različitim bojama upravo da bi se naglasila njihova uloga u mreži.

Svi „beli“ čvorovi na Sl. 5 imaju mogućnost isključivo *point-to-point* komunikacije, odnosno u stanju se da se povežu i direktno komuniciraju samo sa jednim čvorom u mreži (tj. sa centralnom tačkom u zvezdastoj topologiji ili fizički najbližim „sivim“ ili „crnim“ čvorom u preostale dve topologije). Za *point-to-point* uređaje se često koristi pojam *end-device*, ili periferni uređaji, u smislu da su to krajni uređaji u mreži, koji osim što koriste mrežu za prenos svojih podataka, nemaju nikakvu dodatnu funkciju u mreži. Tipičan primer su jednostavni baterijski napajani senzorski uređaji. Mreža topologije zvezda je karakteristična po ovakvom načinu povezivanja, gde su svi uređaji, osim jednog, tipa *end-device*.

Čvorovi koji su na Sl. 5 obojeni sivom i crnom bojom imaju mogućnost *point-to-multipoint* povezivanja, odnosno mogu da komuniciraju sa više susednih čvorova (bilo koje „boje“). Osim svoje primarne funkcije (opsluživanje senzora, aktuatora i sl.), ovi čvorovi implementiraju (kroz protokol stek) i izvesne mrežne funkcije. „Sivi“ čvorovi koriste svoje *point-to-multipoint* mogućnosti za rutiranja podataka u mreži složenije topologije (*tree* ili *mesh*), odnosno učestvuju u multi-hop prenosu podataka između udaljenih čvorova. U mnogim mrežama, postoji jedinstveni centralni čvor, koji igra ulogu kontrolera, ili koordinatora mreže („crni“ čvorovi). Takav čvor je zadužen za čitav niz mrežnih funkcija, poput priključenja novog čvora na mrežu, prosleđivanje podataka iz mreže ka nadređenom sistemu i sl. Ruteri i kontroleri mreže su po pravilu hardverski i softverski složeniji od perifernih uređaja. Za njihov nesmetan rad često je neophodno obezbediti neprekidno napajanje iz električne mreže. Razlog za to je veća opterećenost komunikacijom, zbog čega njihovi RF transiveri moraju veći deo vremena biti u aktivnom režimu, što troši dosta energije. Za razliku od toga, periferni uređaji uključuju svoje RF transiveri samo onda kada je potrebno da pošalju svoje podatke ili prime podatke koji su njima namenjeni.

Single- i multi-hop komunikacija

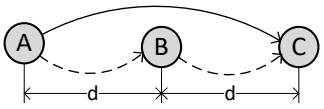
U kontekstu komunikacionih mreža, pravi se razlika u značenju pojmova predajnik/prijemnik i izvor/odredište. Pojmovi predajnik/prijemnik se koriste kada se govori o direktnoj (neposrednoj) komunikacije između dva čvora: predajnik šalje, a prijemnik prima poruku. Kod bežičnih mreža, predajnik emituje radio signal modulisan sadržajem poruke; prijemnik prima i demoduliše taj isti radio signal. Podrazumeva se, naravno, da su predajnik i prijemnik jedan dugom u radio dometu. Pojmovi izvor/odredište se odnose na uloge čvorova u procesu komunikacije. Izvor je čvor koji generiše podatke za slanje nekom drugom čvoru; odredište je čvor kome su ti podaci namenjeni, odnosno krajnji korisnik podataka.



Sl. 6 Single-hop i multi-hop komunikacija

Ukoliko između izvornog i odredišnog čvora postoji direktni bežični link, reč je *single-hop* komunikaciji, jer se poruka prenosi direktno, bez posrednika, od izvora od odredišta. Primer radi, u mreži na Sl. 6, poruka čiji je izvor čvor A, a odredište B, prenosi se u jednom skoku. U mrežama složenije topologije, sa čvorovima ograničenog radio dometa, *single-hop* komunikacija nije uvek moguća između svakog para čvorova, zbog velike udaljenost ili zbog nepostojanja direktnog bežičnog linka između izvora i odredišta. U takvim slučajevima, poruka se između izvora i odredišta prenosi na *muli-hop* način, tj. preko više među-čvorova u više skokova, kao što je to slučaj pri prenosu poruke između izvornog čvorova C i odredišnog čvora F u mreži na Sl. 6. Kao što vidimo, poruka se prenosi u tri skoka, prolazeći kroz dva među-čvora D i E. Među-čvorovi u *multi-hop* prenosu igraju ulogu rutera, u smislu da ne samo što prosleđuju poruku jedan korak dalje, već i donose odluku o tome kom sledećem čvoru poruku treba proslediti kako bi ona stigla do svog krajnjeg odredišta.

Energetska efikasnost *multi-hop* komunikacije



Ovaj primer ilustruje jedan neočekivani benefit multi-hop komunikacije (slika →). Pretpostavka je da čvorovi u ovoj mreži poseduju RF predajnike sa mogućnošću podešavanja izlazne snage. Takođe, pretpostavimo da, pre emitovanja, predajni čvor, znajući rastojanje do prijemnika, podešava svoj predajnik na minimalni nivo izlazne snage koja je potreban da bi se obavila pouzdana komunikacija (prilično nerealna pretpostavka). Rastojanje između čvorova A i C je $2d$, a čvor B je na pola puta između A i B. Neka čvor A treba da pošalje poruku čvoru C. Čvor A ima dve opcije. Prva opcije je da poruku direktno, u jednom skoku, pošalje čvoru C (strelica na slici nacrtana punom linijom). Da bi ovaj prenos bio moguć, čvor A podešava svoj predajnik na izlaznu snagu P_{AC}. Druga opcija je da A prosledi poruku svom susedu B, kako bi je ovaj isporučio odredištu C. Sada se poruka prenosi u dva skoka. Pošto su rastojanja između čvorova d, oba čvora A i B podešavaju izlaznu snagu svojih predajnika na nivo $P_{AC}/4$, zato što, kao što znamo, snaga radio signala opada sa kvadratom rastojanja. To praktično znači da se za jedan preskok na duplo kraćem rastojanju troši 4 puta manje energije. Pošto prenos od A do C sada zahteva dva preskoka, ukupna energije je 2 puta manja od energije koja je potreba za direktan, *single-hop* prenos. U zaključku, ukoliko postoji mogućnost izbora, *multi-hop* komunikacija je potencijalno energetski efikasnije od *single-hop*. S druge strane, nedostatak multi-hop komunikacije je povećano kašnjenje u prenosu, odnosno latencija, zato što svaki skok unosi dodatno kašnjenje.

Unicast, broadcast i multicast

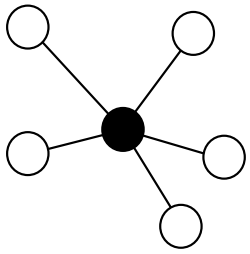
Unicast, *broadcast* i *multicast* su tri načina komunikaciju u bežičnim mrežama, kao i generalno u svim komunikacionim mrežama.

Unicast je vrsta komunikacije u kojoj izvor šalje poruku tačno jednom primaocu (odredištu). Ovo je najčešći način komunikacije gotovo u svim mrežama. Na primer, pametni uređaj A šalje poruku o izmerenoj temperaturi pametnom uređaju B koji upravlja sistemom grejanja. Da bi ovakav vid komunikacije bio moguć, svaki čvor u mreži mora imati jedinstvenu individualnu adresu. Individualna adresa odredišta je deo zaglavlja svake *unicast* poruke. U slučaju *multi-hop* komunikacije, rutiranje poruke se vrši po ovoj adresi, odnosno ruter, na osnovu odredišne adrese zna (na neki način) kome od svojih suseda-rutera da prosledi poruku, kako bi ona stigla do svog odredišta.

Broadcast je vrsta komunikacije u kojoj izvorni čvor šalje poruku svim čvorovima u mreži. Na primer, koordinator mreže obaveštava sve ostale čvorove da je mreži pridružen novi čvor. Po pravilu, za *broadcast* komunikaciju koristi se jedinstvena adresa (npr. adresa „sve jedinice“). Čvor koji primi poruku koja u svom zaglavlju, kao adresu odredišta nosi *broadcast* adresu, prihvatiće tu poruku kao da je njemu namenjena. Ako je taj čvor ruter, onda će, eventualno, preduzeti i dodatne korake, koji zavise od algoritma za *broadcast* rutiranje u konkretnoj mreži – npr. istu poruku može da reemituje svojim susedima.

Multicast komunikacija podrazumeva da se poruka šalje određenoj grupi odredišta. Na primer, u *smart home* sistemu, od ukupno, recimo, 10 umreženih pametnih uređaja, tri su zainteresovana za informaciju o temperaturi čiji je izvor pametni uređaj A. *Multicast* komunikacija je podržana tzv. *multicast* ili grupnim adresama. Svaki čvor u mreži može biti član ni jedne, jedne ili više *multicast* grupa. Dakle, svi čvorovi koji su zainteresovana za temperaturu koju meri uređaj A, biće članovi iste *multicast* grupe, odnosno svako od njih će biti konfigurisan, osim svojom individualnom adresom i odgovarajućom *multicast* adresom. Kada čvor A šalje poruku o temperaturi, kao odredište poruke navodi upravo tu *multicast* adresu. Čvor koji primi *multicast* poruku i pri tom pripada *multicast* grupi kojoj je poruka upućena, prihvatiće poruku kao da je njemu namenjena. Čvor može biti član više *multicast* grupa, odnosno može biti konfigurisan sa više *multicast* adresa. Kod mreža složenije topologije (stablo i rešetka) *multicast* komunikacija, kao i *broadcast*, podrazumeva primenu odgovarajućih algoritama rutiranja.

4.2.1 Zvezda



Mreža topologije „zvezda“ se sastoji iz jednog centralnog čvora (centralna tačka pristupa) i više perifernih čvorova (uređaja). Periferni čvorovi ne komuniciraju direktno jedan s drugim, čak i onda kad su u radio dometu, već komuniciraju isključivo sa centralnim čvorom. U nekim sistemima, uloga centralnog čvora može biti da prikuplja podatke od perifernih čvorova i prosleđuje ih dalje putem neke druge mreže (npr. Ethernet, a onda Internet). U takvim sistemima, centralni čvor ima ulogu pristupne tačke (AP – *Access Point*) koja omogućava perifernim uređajima da se povežu sa žičanom mrežom. On služi kao most između bežične i žičane mreže (Ethernet) i često pruža i funkcije rutiranja. AP-ovi su često korišćeni u WiFi mrežama. Takođe, AP može igrati i ulogu posrednika u komunikaciji između perifernih čvorova. Kada jedan periferni čvor želi da pošalje podatke nekom drugom perifernom čvoru, on te podatke šalje AP-u, a AP ih prosleđuje odredištu.

Prednosti star mrežne topologije:

- Glavna prednost zvezdaste topologije je jednostavnost, jer se lako instalira i konfiguriše.
- Laka dijagnostika, u smislu da se problemi u mreži mogu lako dijagnositifikovati jer se svaki periferni uređaj povezuje direktno sa centralnim čvorom.
- Pouzdana komunikacija, jer svaki periferni uređaj ima direktan put do centralnog čvora, što olakšava komunikaciju i smanjuje mogućnost kolizija signala
- Pouzdanost u smislu da ako jedan periferni uređaj ili veza ima problem, ostatak mreže može ostati funkcionalan.

Nedostaci bežične *star* topologije:

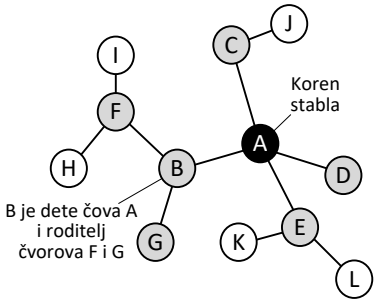
- Ograničena oblast pokrivanja. Oblast pokrivanja zvezdaste mreže određena je radio dometom bežične komunikacija (zbog zahteva da je svaki periferni čvor u dometu centralnog čvora). Zbog toga, oblast pokrivanja zavisi od konkretne bežične tehnologije, jer sve one nemaju isti domet, ali i od konfiguracije prostora koji treba pokriti (zatvoren prostor sa mnogo prostorija, otvoren prostor i slično).
- Zavisnost od centralnog čvora. Ako centralni čvor otkaže, otkazala je celokupna mreža.
- Ograničen broj perifernih uređaja. Broj uređaja koji se mogu povezati sa centralnim čvorom može biti ograničen, što može uticati na skalabilnost (proširljivost) mreže. Ovo ograničenje može poticati od ograničenog kapaciteta bežičnog medijum ili „softverskih“ ograničenja koja nameće protokol-stek (npr. broj perifernih čvorova je ograničen na 8, jer centralni čvor nema dovoljno resursa (npr. memorije) da vodi računa o većem broju pridruženih uređaja).
- Smanjena propusnost. Sa povećanjem broja uređaja koji dele jednu centralnu tačku pristupa, može doći do smanjenja ukupne propusnosti mreže ili, generalno, do pogoršanja komunikacioni performansi.
- Povećana latencija, zbog potrebe da se komunikacija između perifernih čvorova obavlja posredno, preko centralnog čvora, čime se unosi dodatno kašnjenje u komunikaciji.

Poslednja dva nedostatka se primarno ispoljavaju u bežičnim mrežama od kojih se očekuje velika propusnost (mogućnost prenos velike količine podataka) i mala latencija, kao u slučaju WiFi mreže. U sistemima poput senzorskih mreža, gde su čvorovi mreže jednostavni uređaji koji ne zahtevaju veliki protok podataka, propusnost i latencija zvezdaste mreže obično nisu ograničavajući faktor.

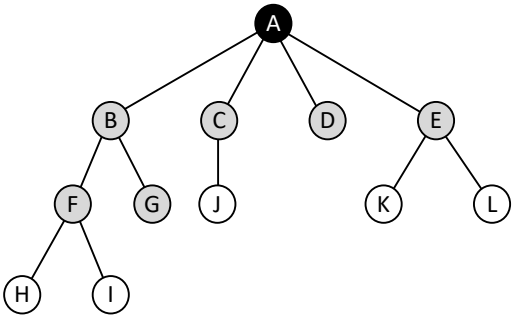
4.2.2 Stablo

Mrežna topologija oblika stabla, predstavlja jedan način kako se može povećati domet, odnosno površina prostora koji pokriva zvezdasta mreža. U ovoj mrežnoj topologiji, čvorovi su organizovani u hijerarhijsku strukturu koja nalikuje stablu, sa centralnim čvorom u korenu stabla (*root*). Počev od korena stabla, ova struktura se razgranava, tako što svaki čvor ima tačno jedan roditeljski čvor (koji je bliže korenu stabla) i pri tom, pojedini ili svi čvorovi mogu igrati ulogu roditelja za neke druge čvorove. U stablu ne postoje ciklične putanje. U kontekstu bežičnih mreža, topologija stabla se može realizovati korišćenjem različitih bežičnih tehnologija, poput WiFi i ZigBee.

Čvor, koren stabla, ima ulogu centralnog uređaja koji deluje kao koordinator mreže ili AP. Ovaj uređaj je odgovoran za menadžment mreže i upravljanje komunikacijom. Sa čvorom korenom stabla direktno su povezani drugi periferni uređaji, ili uređaji tipa ruter.



Prostorni raspored



Logička organizacija

Ruteri su čvorišta za druge njima bliske uređaje koji zbog velike udaljenosti ne mogu da ostvare direktnu vezu sa korenom stabla. Generalno, uređaji koji su bliži korenu stabla imaju veće mogućnosti od onih koji su udaljeniji. Komunikacija u mreži topologije stabla, generalno, teče od korena prema perifernim čvorovima, ili od perifernih čvorova prema korenu. U zavisnosti od realizacije mreže, periferni uređaji mogu i međusobno da komuniciraju, posredstvom čvorova-rutera. Danas su mreže topologije stabla široko rasprostranjene u oblastima kao što su pametne kuće, senzorske mreže i sistemi za nagledanje u industriji.

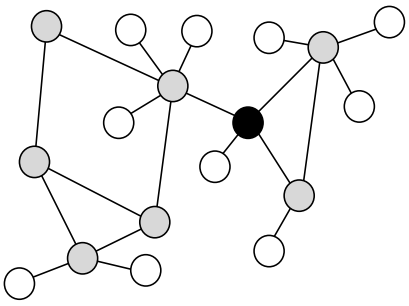
Prednosti bežične mrežne topologije stabla:

- *Organizacija i Struktura*: Topologija tipa stabla ima jasnu organizaciju i strukturu, što olakšava ne samo instalaciju i održavanje mreže, već i rutiranje podataka u mreži.
- *Laka proširljivost*: Dodavanje novih uređaja u mrežu može se jednostavno postići razgranavanjem postojeće strukture.
- Pogodna je primene gde je oblast pokrivenosti razuđena, npr. u vidu udaljenih „ostrva“ (veliko rastojanje između „ostrva“ se može premostiti sa jednim ili više rutera).

Nedostaci bežične mrežne topologije stabla:

- Nedostatak stabla, kao i zvezde, je oslonjenost na centralni čvor, čiji otkaz dovodi do otkaza celokupne mreže. Takođe, otkaz bilo kog roditeljskog čvora raskida vezu svih njegovih naslednika sa ostatkom mreže.
- Topologija stabla može imati ograničen domet, posebno ako se centralni čvor nalazi na kraju mreže. Takođe, širenja mreže na veće udaljenosti može biti problematično, jer se povećava broj nivoa (među-čvorova) između udaljenog čvora i centralnog čvora.
- U dinamičkim okruženjima gde se uređaji često dodaju ili uklanjaju, održavanje mreže topologije stabla može biti otežano.
- U bežičnoj mreži topologije stabla moguća je i pojava uskih grla u komunikaciji, pre svega na nivoima mreže koji su bliski korenu.

4.2.3 Rešetka



U mrežama rešetkaste topologije, često se kaže i meš topologije (od *mesh*), čvorovi mogu da komuniciraju ne samo sa centralnim čvorom, već i međusobno, formirajući tako strukturu koja nalikuje rešetki. U poređenju sa stablom, meš topologija je bogatija linkovima jer je dozvoljeno postojanje cirkularnih putanja. U meš topologiji, čvorovi sarađuju u prenosu podataka između udaljenih čvorova. Odnosno, svaki čvor (ili većina njih) ima i ulogu rutera, za prosleđivanje podataka koji nisu njemu namenjeni. Na ovaj način, osim mogućnosti da se mrežom pokrije veći prostor, postiže se i veća pouzdanost u radu mreže.

Svaki čvor u bežičnoj mreži meš topologije direktno komunicira sa određenim brojem okolnih, tj. susednih čvorova kako bi se kreirale (*multi-hop*) putanje u mreži za prenos podataka između udaljenih čvorova. Drugim rečima, podaci se prenose između udaljenih čvorova u više „skokova“, tehnikom „zapamti-prosledi“ (*store-and-forward*), gde čvor, nakon prijema podatak koji mu nisu namenjeni, prosleđuje te podatke susedu koji je bliži krajnjem odredištu podatka. Meš mreže poseduju nekoliko bitnih prednosti u odnosu druge mrežne topologije:

- Otkaz nekog čvora, po pravilu, ne znači i otkaz mreže, jer se saobraćaj koji je prolazio kroz taj čvor obično može preusmeriti na druge, bliske i ispravne čvorove. U tom pogledu, za meš mreže se kaže da su *self-healing* (samo-ozdravljujuće), budući da između dva udaljena čvora obično postoji više alternativnih putanja, kao i mogućnost da se preusmeravanje izvede automatski bez intervencije operatera mreže.
- Meš mreže su skalabilne (lako proširljive). Čvor se može priključiti u mrežu, ili se može ukloniti iz mreže, bez remećenja i ponovnog konfigurisanja celokupne mrežne infrastrukture, što čini ove mreže prilagodljivim različitim i dinamički promenljivim zahtevima u pogledu broja čvorova i njihovog prostornog rasporeda.
- Meš mreže mogu da pokriju veliku oblast i to korišćenjem bežičnih tehnologije relativno malog RF dometa, npr. WiFi i Bluetooth, što ih čini pogodnim za primene kao što su pametne kuća, pametni gradova, industrijska automatizacija i javne WiFi mreže.
- U meš mrežama se, po pravilu koristi dinamičko rutiranje, što znači da putanje nisu unapred određene i fiksirane, pa time ni bežični linkovi, već se uspostavljaju u realnom-vremenu primenom algoritama za dinamično rutiranje koji omogućavaju da se u datim uslovima izabere najefikasnija putanja. Ova vrsta adaptivnosti je ključna za funkcionisanje mreže u promenljivim uslovima.

Neki od potencijalnih generalnih nedostataka meš mreža su:

- Konfiguracija i upravljanje meš mrežom može biti kompleksno, posebno u većim mrežama. Potrebno je pažljivo planiranje (u smislu prostornog rasporeda čvorova) kako bi se osigurala pokrivenost, efikasnost i pouzdanost;
- Prenos podataka multi-hop putanjama može povećati latenciju, tj. vreme potrebno za prenos podataka od izvora do odredišta;
- Meš mreže mogu imati nižu propusnost (protok) u poređenju sa drugim mrežama (npr. zvezda), jer podaci prolaze kroz više čvorova-rutera pre nego što stignu do krajnjeg odredišta. U uslovima intenzivnog saobraćaja pojedini linkovi i/ili ruteri mogu postati preopterećeni. Ovo

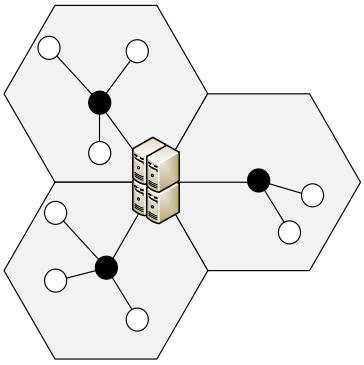
obično nije problem u mrežama gde preovlađuju jednostavni pametni uređaji, jer oni generišu malu količinu podataka i tolerantni su na povećano kašnjenje u komunikaciji.

- Implementacija meš mreža može biti skupa, posebno ako je potrebno postaviti dodatne čvorove samo radi premošćavanja za pokrivanje većeg područja;
- Održavanje i dijagnostika problema u meš mreži može biti otežano zbog složenosti strukture i potrebe za praćenjem rada više čvorova istovremeno;
- Ukoliko se koriste čvorovi sa baterijskim napajanjem, neophodno je efikasno upravljanje potrošnjom energije (zbog dodatnog utroška energije na *multi-hop* prenosa podataka). Zbog toga, često postoji zahtev da se čvorovi-ruteri napajaju iz električne mreže;
- Iako su meš mreže, generalno skalabilne, proširenje mreže iznad određenog obima može pogoršati prethodno navedene nedostatke.

Važno je napomenuti da se navedeni nedostaci mogu razlikovati u zavisnosti od konkretnih implementacija i primena *mesh* bežičnih mreža. Pravilnim planiranjem, konfiguracijom i upravljanjem, mnogi od ovih nedostataka mogu se umanjiti ili prevazići.

4.2.4 Celularna mreža

Bežične mreže celularne (ili ćelijske) topologije se prevashodno koriste u realizaciji komunikacionih mreža za mobilne uređaje u većem geografskom prostoru, kao što su mreže mobilne telefonije (2G, 3G, 4G, 5G). Po pravilu, celularna mreža predstavlja kolekciju mreža zvezdaste topologije, gde centralni čvor (bazna stanica) u svakoj pojedinačnoj zvezdastoj mreži obezbeđuje pokrivenost unutar jednog ograničenog prostora, tj. ćelije, ili zone, odnosno, opslužuje sve mobilne uređaje koji se trenutno nalaze unutar odgovarajuće ćelije. Bazne stanice su prostorno raspoređene tako da se minimizira preklapanje njihovih oblasti pokrivenosti. Ovo je ključno u smislu sprečavanja interferencije signala između susednih ćelija.



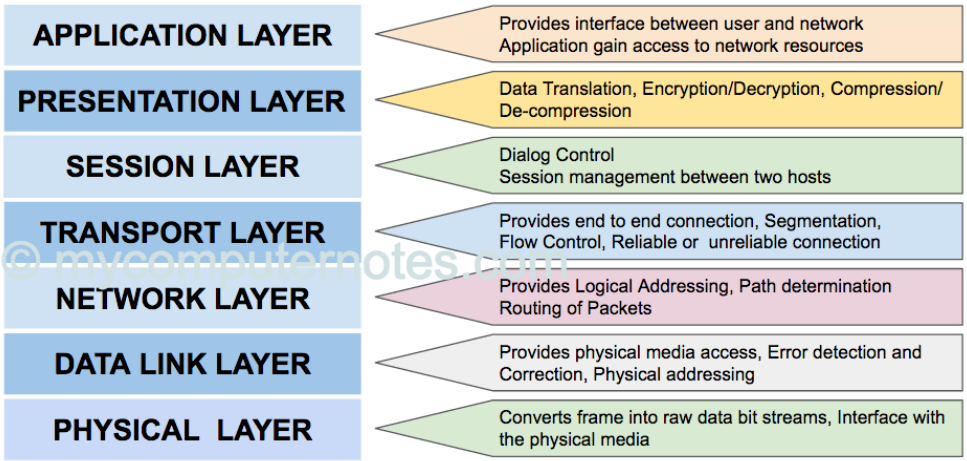
Komunikacija i koordinacija između baznih stanica se ostvaruje posredstvom posebne, pozadinske mreže (*backhaul network*). Pozadinska mreža (koja je obično žičana ili optička) obezbeđuje rutiranje podataka između baznih stanica i konektivnost mobilnih uređaja u okviru celokupne celularne mreže. Naime, ako se dva mobilna uređaja nalaze unutar iste ćelije, komunikacija između njih se ostvaruje putem bazne stanice koja pokriva tu ćeliju. Međutim, ako su uređaji u različitim ćelijama, komunikacija između njih uključuje i pozadinsku mrežu, kroz koju se podaci prenose između baznih stanica dva uređaja. Poseban problem koji se rešava u celularnim mrežama je tzv. preuzimanje (*handover*, ili *handoff*), kada mobilni uređaj prelazi iz jedne u drugu ćeliju, što podrazumeva (automatsko) prebacivanje konekcije mobilnog uređaja s jedne na drugu baznu stanicu i to na način koji ne dovodi prekida i ponovnog uspostavljanja tekuće sesije (npr. telefonskog razgovora).

Infrastruktura celularnih mreža je kompleksna i skupa, zato što zahteva veliki broj baznih stanica, pozadinsku mrežu i kompletnu infrastrukturu raznoraznih mrežnih elemenata. Uprkos visokoj ceni, glavna prednost celularne mreže je u velikom mrežnom kapacitetu, koji omogućava opsluživanje velikog broja mobilnih uređaja.

4.3 Protokol-stek

Iza svake konkretne bežične mrežne tehnologije (WiFi, Bluetooth, ZigBee, LoRaWAN, ...) stoji precizna, globalno usaglašena i prihvaćena tehnička specifikacija, ili standard, koji definiše sve aspekte rada mreže i funkcionalne karakteristike umreženih uređaja. Ovakav pristup je osnova za interoperabilnosti, odnosno za nesmetano umrežavanje različitih uređaja ili mrežnih komponenti različitih proizvođača. U suštini, mrežni standard definiše protokol-stek, koji moraju da implementiraju svi mrežni uređaji da bi mogli da funkcionišu u konkretnoj mreži.

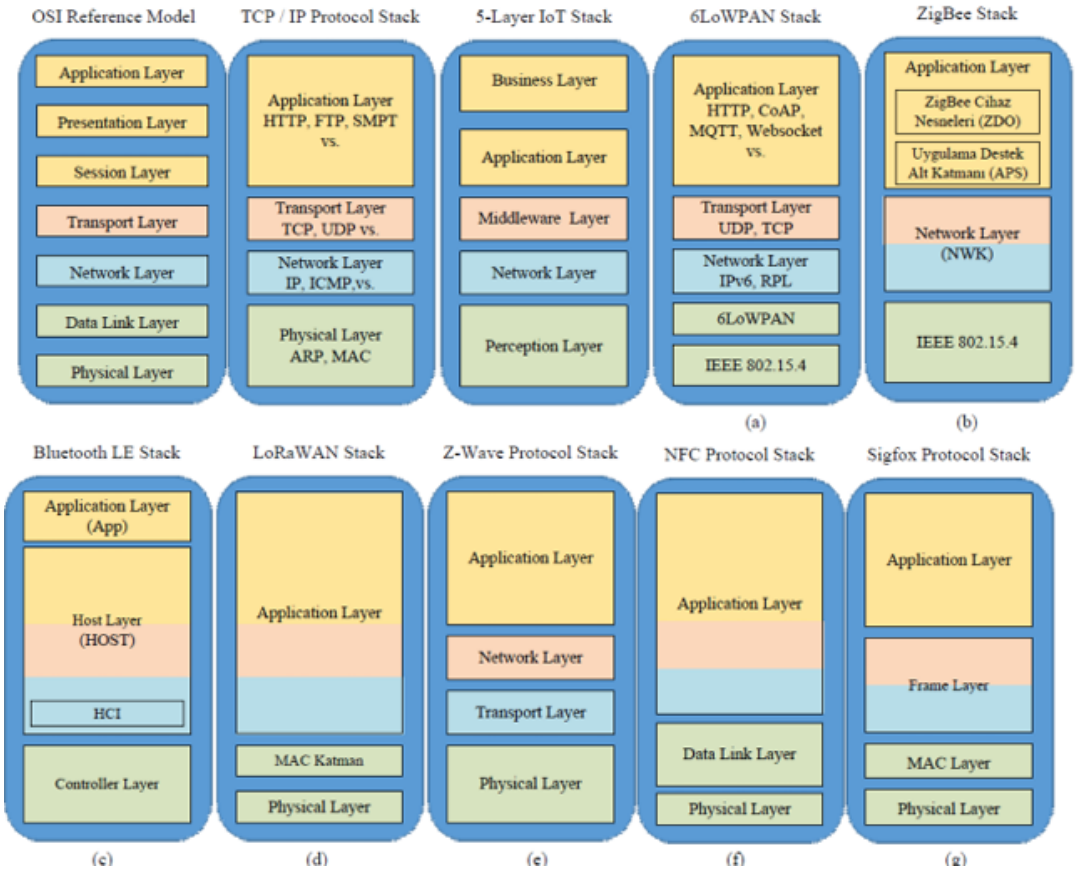
Protokol-stek je skup međusobno povezanih slojeva softvera ili protokola koji zajedno omogućavaju komunikaciju između uređaja u mrežnom okruženju. Osnovna karakteristika protokol-steka jeste podela ukupne funkcionalnosti na slojeve, pri čemu svaki sloj ima određenu ulogu i odgovornosti. Svaki sloj koristi usluge sloja ispod i pruža usluge sloju iznad putem definisanih interfejsa, čime se obezbeđuje modularnost i zamenjivost softverskih i hardverskih komponenti. Tipični primer modela organizacije protokol-steka je OSI model (*Open Systems Interconnection* model) koji definiše sedam slojeva, počev od fizičkog sloja (najniži nivo) do aplikacionog sloja (najviši nivo) - Sl. 7. Ovaj mreži model bi trebalo da je poznati iz Računarskih mreža i ovde se nećemo udubljivati u njegove detalje. Suština je u sledećem. Svaki sloj obuhvata određenu funkcionalnost koja je bitna za komunikaciju između uređaja. Fizički sloj, koji je na dnu, zadužen je za fizički prenos podataka preko prenosnog medijuma. Kod bežičnih mreža, ovaj sloj je u potpunosti obuhvaćen funkcionalnošću RF transivera. Sloj veze obuhvata detekciju i korekciju grešaka u prenosu, reguliše pristup medijumu (kako će uređaji deliti zajednički kanal), formatiranje podataka, kontrola protoka i sl. Kod bežičnih mreža, funkcije sloja veze su jednim delom implementirane u hardveru (RF transiveru) i drugim, većim delom u softveru. Primarna uloga mrežnog sloja je rutiranje poruka u mreži složene topologije. Kada poruku treba preneti između dva udaljena uređaja, sloj mreže pronalazi putanju za *multi-hop* prenos. Osnovna uloga transportnog sloja je omogućavanje pouzdane i efikasne komunikacije između dva krajnja uređaja u mreži. Tri sloja na vrhu, sloj sesije, prezentacioni i sloj aplikacije, nisu neposredno uključeni u prenos podataka, već su zaduženi za upravljanje dijalogom, zaštitu i kompresiju podataka, kao i za obezbeđivanje interfejsa prema korisniku.



Sl. 7 OSI model

U suštini, OSI model definiše probleme koje treba rešiti, ali ne nudi konkretna rešenja. Rešenja dolaze kroz mrežne standarde. Mrežni standard „popunjava“ slojeve konkretnim protokolima, koji implementiraju funkcionalnosti pridružene slojevima. Pri tom, nije neophodno da mrežni standard pokrije svih sedam slojeva. Po pravilu, standard definiše protokole za određeni broj nižih slojeva, počev od fizičkog sloja, i još nekoliko slojeva iznad, a sve preostale (neobuhvaćene) slojeve pridružuje

aplikacionom sloju. To praktično znači, da svi problemi koji nisu eksplicitno rešeni standardom, ostavljeni su aplikaciji da ih reši, ukoliko je to njoj bitno ili neophodno. Primera radi, TPC/IP protokol stek, koji se koristi na Internetu, ne prepoznaje sloj sesije i prezentacioni sloj, što znači da se problemi npr. zaštite podataka i upravljana sesijom moraju rešiti na aplikacionom nivou, odnosno protokolima aplikacionog sloja, kao što su HTTP, FTP, SMTP i sl. Ovaj koncept je ilustrovan na Sl. 8, koja prikazuje odnos između OSI modela i protokol-steka devet mrežnih standarda. Neki od ovih standarda biće obrađeni u narednim poglavljima. Potrebno je napomenuti da su standardni za bežične mreže najvećim delom fokusirani na dva najniža nivoa: fizički i sloj veze. Na primer, WiFi obuhvata protokole samo za ova dva sloja. Standardi za mreže iz kategorije WPAN su opširniji i često uključuju i mrežni sloj (kako bi se npr. omogućilo rutiranje u *mesh* mreži). To je npr. slučaj sa ZigBee mrežom.



Sl. 8 Poređenje OSI modela, TCP/IP i protokol-stekova osam standardizovanih bežičnih mreža

U zaključku, da bi pametni uređaj mogao da se pridruži određenoj bežičnoj mreži, on mora da implementira sve protokole i funkcionalnosti predviđene odgovarajućim mrežnim standardom. Prvo, to znači da njegov RF transiver treba da podržava odgovarajući protokol fizičkog sloja (npr. transiver za WiFi ne može da radi u Bluetooth mreži, jer ove dve mrežne tehnologije koriste različite načine fizičke komunikacije). Drugo, softver pametnog uređaja treba da implemetira odgovarajući protokol-stek. Pri tom, ne moraju svi umreženi uređaji da implementiraju sve aspekte mrežnog standarda. To je npr. karakteristično za WPAN mreže, gde periferni uređaji implemetiraju samo protokole fizičkog i sloja veze, dok ruteri dodatno implemetiraju i protokole sloja mreže. RF transiveri za različite mrežne standarde su dostupni kao IC, dok je softverski deo protokol-steka tipično dostupan u vidu softverskih biblioteka. To praktično znači da je embeded inženjera, koji projektuje pametni uređaj, ili realizuje konkretnu mrežnu aplikaciju, rasterećen implementacije komunikacionog hardvera i softvera. Na njemu je da razume način funkcionisanja konkretne mreže kako bi na najbolji način iskoristio sve mogućnosti koje ona pruža i prilagodio ih ciljnoj primeni.

4.4 Vodič za učenje

- Osnovne karakteristike komunikacionih mreža
- Prednosti i nedostaci žičanih i bežičnih mreža

Klasifikacija bežičnih mreža

- WPAN, WLAN i WWAN. Samo osnovne karakteristike (brzine prenosa i frekventne opsege ne treba pamtiti)
- Pristupne i osnovne mreže. Uloga gateway kod pristupne mreže
- Infrastrukturne bežične mreže. Šta je to infrastruktura mreža? Osnovne karakteristike (iz tabele). Šta čini infrastrukturu WiFi mreže, a šta celularne mreže?
- *Ad hoc* bežične mreže. Šta su to *ad hoc* mreže? Primeri. Osnovne karakteristike (iz tabele).

Topologije bežičnih mreža

- Šta određuje topologiju bežične mreže (misli se na prostorni raspored uređaja, radio domet i restrikcije u povezivanju)?
- *Point-to-point* i *point-to-multipoint* komunikacija
- Uloge uređaja u bežičnoj mreži. Periferni uređaji, ruteri i kontroleri mreže
- *Single-hop* i *multi-hop* komunikacija
- *Unicast*, *broadcast* i *multicast* komunikacija
- Osnovne karakteristike bežičnih mreža topologije: zvezda, stablo i rešetka, kao i celularne mreže

Protokol-stek

Generalno o interoperabilnosti mrežnih uređaja, OSI arhitekturi i slojevitoj organizaciji protokol-steka

- ♦ ♦ ♦ -