

Vertti Nuotio

ANDROIDIIN POHJAUTUVAT MESH- VERKOT

Kandidaatintutkielma
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Kesäkuu 2025

TIIVISTELMÄ

Vertti Nuotio : Androidiin pohjautuvat mesh-verkot
Kandidaatintutkielma
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikan tutkinto-ohjelma, Tietotekniikka
Kesäkuu 2025

Android-käyttöjärjestelmään pohjautuvat mobiililaitteet ovat laajalle levinneitä sekä kaupallisesti saatavilla. Tällaisia mobiililaitteita käyttämällä on mahdollista luoda ulkoisesta infrastruktuurista riippumatta toimivia mesh-verkkoja eli vertaisverkkoja, jotka mahdollistavat viestinvälityksen ja kommunikoinnin kriisitilanteissa ilman kiinteitä reitittimiä tai palvelimia. Tällaiset verkot mukautuvat verkon rakenteen muuttuessa ja pyrkivät säilyttämään verkon eheyden ja kyvyn viestienvälitykseen. Tutkielman tarkoituksena on perehtyä mesh-verkkojen toimintaan ja rakentamisen vaiheisiin, sekä näistä aiheutuviin ongelmatilanteisiin ja mahdollisiin ratkaisuihin.

Mesh-verkkojen rakentamiseen on Android-alustoilla kehitysympäristöjä ja viitekehyksiä, kuten Androidin kehittäjän Googlen ylläpitämä Wi-Fi Direct -kehys. Tällaisilla teknologioilla on mahdollista muodostaa suoria peer-to-peer- eli vertaisyhteyksiä laitteiden välillä, jotka mahdollistavat tiedonsiirron verkon sisällä. Yhdistämiseen ja reititykseen liittyy ongelmia, kuten yhdistäessä käyttäjän manuaalisen vahvistuksen tarve, jotka haittaavat verkon toimintaa. Tutkielmassa keskitytään myös näihin ongelmiin sekä olemassa oleviin sovelluksiin ja ratkaisuihin.

Tutkielmassa mesh-verkkojen luominen jaettiin laitteiden yhdistämisen ja reitityksen osa-alueisiin. Laitteiden yhdistämisen huomattiin olevan hidasta ja epävarmaa, ja todennäköisesti verkon toiminnan heikoin lenkki. Reitityksen todettiin olevan kompromissi eheän tiedonvälityksen ja duplikaattiviestien aiheuttaman epätehokkuuden välillä. Yhdistämisen ongelmiin on esitelty mahdollinen ratkaisu Wi-Fi Direct -teknologiaa käyttämällä, minkä lisäksi tutkielmassa tuodaan esille kolme olemassa olevaa mesh-verkkosovellusta mobiilialustoille. Mesh-verkkojen luominen Androidiin pohjautuvilla mobiililaitteilla on haasteista huolimatta mahdollista, ja esimerkiksi pelastustoiminnan kannalta verkot voivat olla kriittisiä kommunikaation takaamiseksi.

Avainsanat: mesh, vertaisverkot, Android, peer-to-peer, P2P, wireless networks, routing

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

TEKOÄLYN KÄYTTÖ OPINNÄYTTEESSÄ

Opinnäytteessäni on käytetty tekoälysovelluksia:

- Ei
- Kyllä

Ilmoitukseni mukaan olen käyttänyt opinnäytteessäni tutkielmanprosessin aikana seuraavia tekoälysovelluksia:

ChatGPT (4o) ja Consensus-hakukone

Tekoälysovellusten nimet ja versiot: [Listaa tähän kaikki tekoälysovellukset ja niiden versiot, joita olet käyttänyt tutkielmanprosessin aikana.]

ChatGPT (4o) ja Consensus-hakukone (ei versiota, 2025)

Käyttötarkoitus: [Kuvaa tähän yksityiskohtaisesti, mihin tarkoitukseen ja miten tekoälyä on sovellettu opinnäytteeseen tutkielmanprosessin aikana.]

ChatGPT 4o -kielimallia käytettiin rakenteen hiomiseen ja tärkeiden osa-alueiden etsimiseen. Consensus-hakukonesivustoa käytettiin osana lähteiden hakemista ja tiedon oikeuden varmistamista.

Osiot, joissa tekoälyä on käytetty: [Luettele tähän kaikki opinnäytteen vaiheet ja osiot, joissa tekoälyä on tutkielmanprosessin aikana käytetty.]

Osa lähteistä on peräisin Consensus-hakukoneen tuloksista, ja ChatGPT-kielimallin käyttö näkyy lievästi työn rakenteessa. Tekoälyä ei käytetty tekstin luomiseen.

Olen tietoinen siitä, että olen täysin vastuussa koko opinnäytteeni sisällöstä, mukaan lukien osat, joissa on hyödynnetty tekoälyä, ja hyväksyn vastuun mahdollisista eettisten ohjeiden rikkomuksista.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. TUTKIMUSMENETELMÄ	2
3. MESH-VERKKOJEN TOIMINTA	3
3.1 Mesh-verkot	3
3.2 Vertaisyhteydet ja tiedonvälitys	4
4. VERKON RAKENTAMISEN VAIHEET JA ONGELMAT	6
4.1 Yhteydenmuodostus ja tiedonsiirto	6
4.2 Reititys	7
5. SOVELTAMINEN JA MUU KESKUSTELU	9
5.1 Käyttökohteet	9
5.2 Olemassa olevat ratkaisut	9
5.3 Jatkokehitys	10
6. YHTEENVETO	12
LÄHTEET	14

1. JOHDANTO

Älypuhelinien levitessä yhä laajemmalle käyttäjäkunnalle on niiden sovelluksia eri tarpeisiin kehitetty pidemmälle. Yksi kasvavista tutkimus- ja kehityskohteista on mesh-verkot, jotka mahdollistavat paikallisten, dynaamisten verkkojen luomisen lähilaitteilla. Tällaisia paikallisia verkkoja olisi mahdollista käyttää ilman todellista internet-yhteyttä esimerkiksi viestien lähettämiseen. Pelastustoiminnalla ja armeijoilla on käyttöä verkolle, joka toimii tavallisilla puhelimilla ilman paikallista infrastruktuuria.

Saatavilla olevat pidemmän kantaman teknologiat Android-laitteiden yhdistämiseen ovat Bluetooth sekä Wi-Fi Direct. Molemmat teknologiat toimivat ohjelmistotasolla hyvin samankaltaisesti, ja pääasialliset erot löytyvät kantaman, virrankulutuksen ja kaistanleveyden osilta. Keskeisiä haasteita paikallisten verkkojen luomisessa kumpaakin teknologiaa käyttäen ovat kantaman sisäpuolisten laitteiden tunnistaminen, yhteyksien nopea luominen sekä verkkojen reititys. Android ei alustana varsinaisesti tarjoa työkaluja ongelmien ratkaisuun, ja useat kehittäjät ovat joutuneet löytämään omia, usein monimutkaisia ratkaisuja näihin ongelmiin.

Tämän työn tarkoituksena on selvittää paikallisten infrastruktuurivapaiden verkkojen luomiseen liittyviä seikkoja ja ongelmia. Tavoitteena on myös löytää mahdollisia ratkaisuja näihin ongelmatilanteisiin Android-pohjaisissa mesh-verkoissa hyödyntäen olemassa olevaa kirjallisuutta ja testituloksia. Työn pääasiallinen painopiste on yhteyksien luominen ja reititys sekä näihin liittyvät ongelmat. Kolmannen luvun tarkoituksena on pohjustaa teoriaa verkkojen toiminnalle, kun taas neljännessä luvussa tutustutaan tarkemmin verkonhallinnan ja viestinvälityksen vaiheisiin sekä käytännön toteutukseen.

2. TUTKIMUSMENETELMÄ

Tutkielma on tyypiltään itsenäinen kirjallisuuskatsaus. Tutkielmassa tuotiin esille mesh-verkkojen toiminnan lisäksi yleisimpiä niihin liittyviä ongelmatilanteita, sekä näihin ongelmiin mahdollisia ratkaisuja perustuen olemassa olevaan kirjallisuuteen sekä tutkimuksiin. Tiedonkeruun pääasialliset työkalut olivat Google Scholar -hakukone sekä tekoälypohjainen Consensus-sivusto. Lähes kaikki aiheeseen liittyvä kirjallisuus on julkaistu englanniksi, joten hakusanoiksi valikoituvat erityisesti englanninkieliset termit ”mesh networks”, ”wireless mesh” sekä ”android wi-fi direct”. Lähdeviittaukset luotiin käyttäen Zotero-lähteidenhallintaohjelmaa sekä tämän Word-lisäosaa APA7-viittaustyyliä.

Käytettäviä lähteitä hakiessa huomio kiinnittyi erityisesti julkaisualustaan sekä viittausten ja tekijöiden määrään. Android-alustalla aihealue on rajattu, joten parhaimmillakin lähteillä oli joitakin kymmeniä viittauksia, eikä useita satoja. Tällaiset lähteet kuitenkin todettiin hyviksi ja tutkielmaan kelpaaviksi. Mesh-verkkojen toimintaperiaatetta tutkiessa tutkielmassa pyrittiin käyttämään useasti siteerattuja lähteitä, ja aihealueen ollessa laajempi ja tutkitumpi tällaisia satojen viittauksien lähteitä löytyi helpommin. Osa varsinkin mesh-verkkojen peruseriaateista perustuu 2000-luvun taitteessa julkaistuihin kirjallisuuteen, mutta varsinkin Android-alustaa tarkasteltaessa lähteet pyrittiin valitsemaan 2010- ja 2020-lukujen tutkimuksista. Lähteiden laatua tarkasteltiin myös Julkaisufoorumi-palvelun avulla.

3. MESH-VERKKOJEN TOIMINTA

Ulkopuolisesta infrastruktuurista riippumattoman viestintäsovelluksen toiminnan keskiössä ovat mesh-verkot eli vertaisverkot. Mesh-verkoille ominaista on kyky muodostaa tiedonvälitysverkko useiden väliaikaisten, mahdollisesti liikkuvien laitteiden ja tukiasemien pohjalta. Tällaiset verkot ovat hyvin dynaamisia, joten yhden laitteen tai tukiaseman kadotessa verkko voi muodostaa uusia tiedonsiirtoreittejä. (Hossain & Leung, 2007; Misra ym., 2009) Kahden verkossa toimivan laitteen välille luotua suoraa yhteyttä kutsutaan *peer-to-peer (P2P)* -yhteydeksi (Shen ym., 2010) eli vertaisyhteydeksi. Mesh-verkon rakentamiseen siis tarvitaan vertaisyhteyksiä, joita käytetään takaamaan muuttuvissa olosuhteissa verkon reititys. Seuraavien alilukujen tarkoituksena on avata sekä verkon että vertaisyhteyksien käsitteitä enemmän ja hahmottaa, millä verkkotasolla kumpikin toimii ja missä vaiheissa niitä tarvitaan.

3.1 Mesh-verkot

Mesh-verkkojen eli vertaisverkkojen keskeinen toimintaperiaate on tiedon ja viestien välittäminen verkon halki useiden hyppyjen eli ketjuttamisen avulla. Koska verkossa olevat laitteet eivät välttämättä ole kaikki toistensa kantamalla, viestinvälitys tapahtuu lähettämällä viesti eteenpäin laitteelle, joka puolestaan lähettää sen eteenpäin havaitsemilleen muille laitteille reititysprotokollan mukaan. (Akyildiz ym., 2005; Misra ym., 2009) Tämän ketjutusmenetelmän ansiosta verkon kantama on laitteiden ominaisesta lähetystehosta ja kantamasta huolimatta teoriassa rajaton, mutta verkon suorituskyky laskee nopeasti ketjutuksen mukana (Akyildiz ym., 2005). Esimerkiksi Android-mobiilialustalla toimivan Wi-Fi Direct -teknologian kantama on hyvissä olosuhteissa noin 100 metriä (Mbala ym., 2021), mutta ketjuttamalla useita laitteita voidaan viestiä välittää huomattavasti pidempiä matkoja.

Verkoille on ominaista verkon dynaamisuus ja mukautuvuus olosuhteisiin, sillä mesh-verkoissa jokainen laite voi toimia samaan aikaan sekä vastaanottajana että lähettäjänä (Akyildiz ym., 2005; Misra ym., 2009). Verkossa olevia laitteita kutsutaan reitityksen yhteydessä solmuiksi, ja termit ovat tämän työn kannalta identtiset. Dynaamisuudella ja mukautuvuudella tarkoitetaan, että toisin kuin esimerkiksi perinteisissä internet-verkoissa, yhden solmun kadotessa verkosta verkko pyrkii muodostamaan uuden reitin käyttäen muita soveltuvia, kantaman sisällä olevia solmuja (Misra ym., 2009). Solmun katoaminen voi johtua esimerkiksi kaikkien muiden laitteiden kantaman ulkopuolelle siirtymisestä tai laitteen sammumisesta. Kyky muodostaa toimiva reititysketju tekee mesh-

verkoista hyvin soveltuvia muuttuvien olosuhteiden kriisialueille, joissa toimiva tiedonvälitys voi olla kriittistä (Yarali ym., 2009).

Verkon reitityksen toteutuksen kannalta helpoin reitityskeino on tapa, jossa jokainen solmu luo yhteyden jokaiseen ympärillä olevaan solmuun ja lähettää saadessaan viestin sen eteenpäin näille kaikille solmuille. Tämä kuitenkin johtaa todennäköisesti siihen, että yksittäiset solmut saavat saman viestin monelta eri lähettäjältä verkon sisällä, mikä hidastaa verkon toimintaa (Liu & Raychaudhuri, 2005). Tällaisia reitityksen ongelmia voidaan minimoida viestiketjun kirjanpidolla, kuten pitämällä kirjaa viestin saaneista laitteista, tai palauttamalla lähettäjälle vahvistus viestin vastaanottamisesta. Reitityksen toteutukseen ja ongelmatilanteisiin perehdytään luvussa 4.2.

Mesh-verkoista voidaan yleisesti todeta, että ne ovat tavanomaisia tiedonsiirtoverkkoja mukautuvampia ja niitä voidaan käyttää erityisesti tilanteissa ja olosuhteissa, joissa kiinteää verkkoinfrastruktuuria ei ole saatavilla. Mesh-verkkojen vahvuutena on kyky muodostaa uusi reitti viestien välitystä ja tiedonsiirtoa varten olosuhteiden muuttuessa. Haasteena on toisaalta tiedon välittäminen kaikille verkon jäsenille luotettavasti ja tehokkaasti.

3.2 Vertaisyhteydet ja tiedonvälitys

Peer-to-peer (P2P) -yhteyksillä eli vertaisyhteyksillä tarkoitetaan kahden laitteen välille luotua suoraa kommunikaatioyhteyttä (Shen ym., 2010). Tutkielman kannalta nämä laitteet ovat Android-mobiililaitteita, mutta käytännössä ne voivat olla myös kiinteitä tukiasemia tai muita laitteita. Vertaisyhteydet eroavat perinteisistä palvelin- ja reititinpohjaisista verkkoinfrastruktuureista siten, että kaikki tieto välittyy suoraan kahden laitteen välillä, eikä kumpaakaan voi pitää erillisenä palvelimena (Schollmeier, 2001; Shen ym., 2010). Tässä työssä tarkasteltavien mobiililaitteille perustuvien mesh-verkkojen kannalta vertaisyhteydet ovat välttämättömiä, sillä ne mahdollistavat tiedonsiirron ilman internet-yhteyttä tai muuta ulkopuolista infrastruktuuria.

Tavanomaisessa verkkoinfrastruktuurissa tieto välittyy laitteiden välissä olevien reititinten avulla (Shen ym., 2010). Tarkasteltavissa mesh-verkoissa verkon rakenne ja laitteiden fyysinen sijainti voivat kuitenkin muuttua lyhyellä aikavälillä. Tämän vuoksi erillisten palvelinten ja reititinten käyttö tiedonvälitykseen ei ole käytännöllistä, vaan jokaisen verkon osalaitteen on kyettävä sekä vastaanottamaan että välittämään tietoa.

Mobiililaitteille perustuvissa mesh-verkoissa laitteet eli solmut eivät voi olla jatkuvasti yhteydessä toisiinsa energiakulutuksen ja kaistankäytön vuoksi. Lisäksi Android-laitteet voivat Wi-Fi Direct -kanavaa käyttäen käyttäytyä joko väliaikaisena tukipisteenä tai täl-

laiseen tukipisteeseen yhdistävänä laitteena (Camps-Mur ym., 2013). Tukipisteet pystyvät yhdistämään ja jakamaan tietoa usean laitteen kanssa samanaikaisesti, joten tukipisteinä toimivia laitteita tarvitaan verkon kantaman laajentamiseen (Camps-Mur ym., 2013). Verkon sisällä viestiä välitettäessä laitteet tunnistavat niiden kantaman sisällä olevat toiset laitteet ja muodostavat yhteyden yksi kerrallaan, reitityslogiikan mukaan, osaan tai kaikkiin näistä laitteista. Tiedonsiirron tehokkuuden ja nopeuden takaamiseksi yhdistämisen ja tiedonvälityksen tulisi olla mahdollisimman nopeaa.

Vertaisyhteydet mahdollistavat siis tietojenvälityksen ja viestinnän suoraan kahden mobiililaitteen välillä. Osana mesh-verkkoja tällaisia yhteyksiä muodostetaan vain tarvittaessa tiedonvälitystä varten ja katkaistaan välittömästi tiedonsiirron jälkeen. Yhteyksille kriittistä on sekä yhdistämisprosessin että tiedonsiirron nopeus verkon tehokkaan toiminnan takaamiseksi.

4. VERKON RAKENTAMISEN VAIHEET JA ONGELMAT

Android-laitteilla toimivan langattoman mesh-verkon rakentaminen ja toiminta voidaan jakaa kahteen osaan tätä tutkielmaa varten. Verkon ja reitityksen kannalta ensimmäinen kriittinen vaihe on laitteiden yhdistäminen toisiinsa suoran vertaisyhteyden avulla. Tässä vaiheessa laitteiden pitää olla tietoisia niiden ympärillä olevista muista laitteista sekä kyetä muodostamaan ja katkaisemaan yhteys toiseen laitteeseen. Kun laitteiden välille voidaan luoda yhteyksiä, on toinen osa verkon toimintaa itse reititys eli tiedonsiirto verkon sisällä. Kumpaakin vaihetta tarkastellessa on syytä käsitellä verkoille ja yhteyksille kykyjä ja keinoja reagoida verkon muutoksiin ja yhdistämisen häiriötilanteisiin. Seuraavissa aliluvuissa tarkastellaan näitä osa-alueita.

4.1 Yhteydenmuodostus ja tiedonsiirto

Laitteiden välisten yhteyden luomiseksi ensimmäinen vaihe on havaita kantaman sisällä oleva ja tiedonvälitykseen kykenevät laitteet. Tätä varten laitteet ilmoittavat olemassaolostaan lähettämällä ajoittain ilmoituksen valittua tiedonsiirtokanavaa käyttäen. (Camps-Mur ym., 2013; *Create P2P Connections with Wi-Fi Direct | Connectivity*, ei pvm.; Faccin ym., 2006) Kummankin laitteen on oltava havaitsemistilassa, jotta ne voivat havaita toisensa ja muodostaa yhteyden. Noin kahden minuutin jälkeen vaiheen päättymisestä laite poistuu muiden lähilaitteiden näkyviltä. (Conti ym., 2013) Tämä toimenpide estää kantaman ulkopuolelle siirtyneiden tai sammuneiden laitteiden jäämisen aktiivisten laitteiden listalle, joskin hyvin hitaasti, sillä nämä laitteet eivät kykene itse viestimään kantaman ulkopuolelle siirtymisestä.

Kun solmu on tietoinen sen ympärillä olevista aktiivisista laitteista, voi se lähettää yhdistämispyyntön tälle laitteelle. Wi-Fi Directiä, ja yhdistämiskanavana käytettäessä kohdelaitteen käyttäjän täytyy hyväksyä yhdistämispyyntö laitteiden ensimmäisellä yhdistämiskerralla (Wong ym., 2014). Tämä voi hidastaa ja vaikeuttaa viestien tehokasta välitystä verkossa, ja estää viestien välityksen tai vastaanottamisen kokonaan tilanteissa, joissa käyttäjä ei pysty hyväksymään yhdistämispyyntöä. Näillä yhdistämistekniikoilla yhteyden muodostus muutoinkin voi viedä useita sekunteja (Conti ym., 2013). Toinen mahdollinen ongelmatilanne syntyy, mikäli yhdistämisen kohdelaitte on jo yhteydessä toiseen laitteeseen. Tällöin yhteyttä ei voida muodostaa ja sitä on yritettävä myöhemmin uudestaan. (Conti ym., 2013)

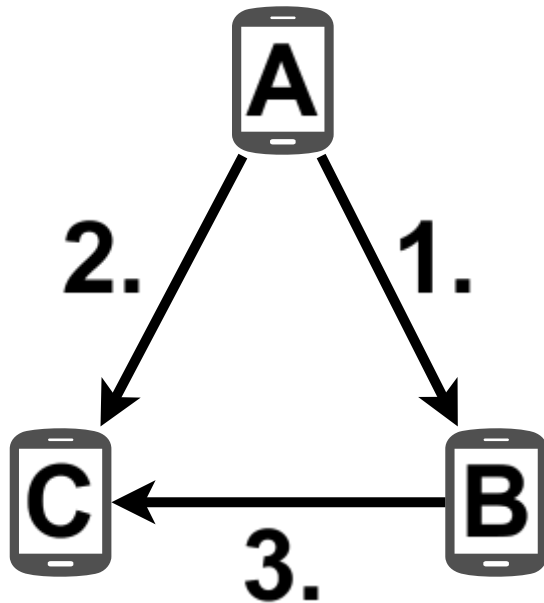
Wi-Fi Direct -teknologiaa käytettäessä yhteyttä muodostettaessa toinen laitteista luo lähiverkkoryhmän ja toimii sen väliaikaisena tukipisteenä eli ryhmänomistajana (Camps-Mur ym., 2013; *Create P2P Connections with Wi-Fi Direct | Connectivity*, ei pvm.). Ryhmän muodostuksen jälkeen nämä kaksi laitetta voivat välittää tietoa keskenään. Tiedonsiirron ja yhteyden katkaisemisen jälkeen ryhmä kuitenkin on edelleen olemassa, mikä saattaa vaikeuttaa seuraavan yhteyden muodostamista. Tällöin yhteyden katkaisemisen jälkeen tukipisteenä toimivan laitteen tulisi lakkauttaa ryhmä, jotta se olisi valmis vastaanottamaan yhteydenmuodostuspyyntöjä.

4.2 Reititys

Tarkasteltavien mesh-verkkojen tärkein ominaisuus on kyky muodostaa uusia viestinvälitysreittejä ja näin mukautua muuttuvaan ympäristöön. Reitityksellä viitataan tässä yhteydessä laitteiden kykyyn lähettää viestejä koko verkon halki. Mesh-verkoille reitityksen suurimmat ongelmat ovat viestien moninkertaisen lähettämisen eli duplikaattireittien välttäminen sekä toisaalta tiedon ja viestien välittäminen synkronointi koko verkon laajuudelta.

Kaikki verkon sisäiset laitteet eivät yleensä ole toistensa kantamalla, joten jokaisen laitteen eli solmun on kyettävä tunnistamaan joko itsenäisesti tai saamansa tiedon perusteella, mille laitteelle viesti täytyy vielä välittää (Akyildiz ym., 2005). Koska verkon rakenne ja sen osana olevat laitteet voivat muuttua jokaisen viestin ja tiedonvälityksen välissä, on reititystaulun ja ketjutusten muutoksiin reagoiminen tärkeää (Misra ym., 2009). Lisäksi tilanteen mukaan laitteiden välisen etäisyyden kasvaessa liian suureksi verkko voi jakautua väliaikaisesti kahteen tai useampaan osaan, jotka eivät pysty kommunikoimaan keskenään. Tällöin vaikka viesti saataisiin onnistuneesti välitettyä yhteen näistä osaverkoista, täytyy verkoilla olla kyky synkronoida jokaisen laitteen välillä viestihistoria.

Naiivein ja samalla tehottomin reititystapa on menetelmä, jossa jokainen solmu lähettää sen kantaman sisäisille laitteille viestin riippumatta siitä, ovatko nämä jo saaneet viestiä toisilta solmuilta. Tällainen reititystapa kuitenkin luo useita tarpeettomia yhteydenottoja ja tiedonsiirtoja solmujen välillä. Vaihtoehtoinen, kohtuullisen yksinkertainen reititysmenetelmä on välittää viestin mukana myös lista laitteista, joille se on jo lähetetty. Tämä ei kuitenkaan estä duplikaattireittien syntymistä kuvan 1 mukaisessa esimerkkitilanteessa, missä solmut A, B ja C ovat kaikki toistensa kantamalla. Esimerkkitalanteessa solmu A lähettää viestin ensin solmulle B ja tämän jälkeen solmulle C. Solmu C on tietoinen viestinvälityksestä solmulle B, mutta solmu B ei ole tietoinen siitä, että viesti on jo lähtenyt solmulle C solmun A kautta.



Kuva 1: esimerkkutilanne moninkertaisesta reitityksestä tilanteessa, jossa kolme solmua on toistensa kantamalla

Tämän tilanteen välttämiseksi viestiin voisi sisällyttää myös tiedon siitä, mitkä solmut ovat lähettäjän kantamalla ja joille lähettäjäsolmu mahdollisesti välittää viestin. Tällainen menetelmä kuitenkin johtaa mahdollisesti häiriöön kuvan 1 mukaisessa tilanteessa, mikäli solmut A ja C siirtyvät toistensa kantaman ulkopuolelle ennen viestinvälitystä. Tällöin solmu C ei saisi viestiä ja reititusketju saattaisi katketa.

Olosuhteisiin ja saatavilla oleviin laitteisiin mukautuvassa mesh-verkossa tehokas ja eheä reititys on tärkeä osa verkon toimintaa, mutta toisaalta siihen liittyy useita haasteita ja ongelmatilanteita. Reititysprotokollat joutuvat siis mahdollisesti tekemään kompromisseja tehokkuuden ja duplikaattien välttämisen sekä viestinvälityksen kattavuuden ja eheyden välillä.

5. SOVELTAMINEN JA MUU KESKUSTELU

Aiemmin todetuista ongelmista huolimatta toimivien mesh-verkkojen rakentaminen Android-alustalla on mahdollista ja käyttökohteita on nykymaailmassa runsaasti. Tässä luvussa käsitellään joitakin käyttökohteita mesh-verkoille, olemassa olevia ratkaisuja Androidille sekä alustan kehittäjien näkökulmasta aihealueita ja seikkoja, joita parantamalla verkkojen kehityksestä saataisiin helpompaa.

5.1 Käyttökohteet

Tässä tutkielmassa tarkastellut verkot perustuvat laajasti saatavilla oleville mobiililaitteille ja erityisesti alueille, joilla kiinteä verkkoinfrastruktuuri on vaurioitunut tai sitä ei ole olemassa. Nämä seikat tekevät Android-laitteille perustuvista mesh-verkoista soveltuvia varsinkin kriisitilanteissa, joissa viestintä pelastus- tai puolustusorganisaatioiden keskuudessa sekä suurille ihmisjoukoille on tärkeää (Yarali ym., 2009). Luonnonkatastrofien kuten suurien maanjäristysten jälkeen toimiva viestintä pelastushenkilöstön keskuudessa on elintärkeää, kuten on myös evakuointiviestien ja muun tiedon välittäminen alueen siviiliväestölle. Vaikka jokaisella alueella olevalla henkilöllä ei välttämättä ole Android-laitetta käytössä, on silti huomattavasti todennäköisempää, että viesti välittyy suuremmalle ihmisjoukolle kuin esimerkiksi vain radiolla viestiessä. Toinen mahdollinen käyttökohde on sotatilanteissa viestintä sotilaiden välillä (Rozner ym., 2009). Tavanomaiset radioviestintävälineet voivat olla kalliita tai niiden saatavuus voi olla rajoitettua, joten sotilaiden omille ja halvalla hankittaville laitteille perustuvalla viestintäsovelluksella voidaan paikata kommunikointikykyä.

Käyttökohteita arvioidessa on hyvä muistaa myös, etteivät mesh-verkot ole välttämättä ainoa viestintäkeino. Verkot toimivat usein muiden kommunikointimenetelmien ohella. Niiden kehittämiseen ja levittämiseen on hyvä panostaa niiden mukautuvuuden vuoksi, mutta tällaiset verkot tuskin syrjäyttävät muita viestintämenetelmiä kokonaan.

5.2 Olemassa olevat ratkaisut

Hitaasta yhteydenmuodostuksesta ja muista esille tuoduista ongelmista huolimatta Android-alustalle on kehitetty toimivia mesh-verkkoja hyödyntäviä kommunikointisovelluksia. *Meshrabiya* on alun perin vuonna 2023 julkaistu avoimen lähdekoodin ohjelmisto, joka hyödyntää Wi-Fi Direct -teknologiaa ja sillä luotuja väliaikaisia tukipisteitä (*Ustad-*

Mobile/Meshrabiya, 2023/2025). Ohjelmiston väitetään kykenevän 300 megabitin sekun-
tinopeuteen (*UstadMobile/Meshrabiya*, 2023/2025), mutta kantamasta tai solmujen mak-
simimäärästä ei ole tietoa.

Bridgefy on Android- ja iOS-alustoille julkaistu ohjelmisto, joka käyttää sekä Wi-Fi- että
Bluetooth-teknologioita mobiililaitteille perustavan mesh-verkon luomiseen. Ohjelmiston
avulla käyttäjät voivat välittää yksinkertaisia viestejä kuten tekstiä tai karttasijainteja toi-
silleen ilman internet-yhteyttä. Ohjelmistoa on mahdollista käyttää täysin ilman internet-
yhteyttä tai hybriditilassa, jolloin yhden käyttäjän ollessa yhteydessä internetiin, voidaan
yhteyttä jakaa rajoitetusti muille käyttäjille. (*Bridgefy SDK Wiki*, ei pvm.) Kahden laitteen
välinen maksimikantama on tavanomaisilla mobiililaitteilla noin 100 metriä (*Bridgefy SDK
Wiki*, ei pvm.), perustuen Wi-Fin ja Bluetoothin rajoituksiin.

Meshtastic on toinen avoimen lähdekoodin ohjelmisto mesh-verkkojen luomiseen, jota
kehitetään sekä Android- että iOS- alustoille. Ohjelmisto käyttää hyväkseen sekä mobiil-
laitteiden Bluetooth-kanavaa että ulkopuolisia, kaupallisesti saatavilla olevia radiomik-
ropiirejä pitkän kanavan *LoRa*-protokollaa käyttäen. *Meshtastic* ei siis toimi ainoastaan
mobiililaitteilla, mutta radioaaltoja käyttäen verkon kantama kasvaa huomattavasti, mah-
dollisesti useisiin kilometreihin. (*Introduction | Meshtastic*, ei pvm.; *meshtastic/Meshtas-
tic-Android*, 2020/2025) Tämän kaltaiset ohjelmistot ovat esimerkki siitä, miten mesh-
verkkoja voidaan rakentaa olemassa olevia tekniikoita käyttäen.

Tutkielmassa esiin nostetuista ongelmista huolimatta mielenkiinto mobiililaitteille perus-
tuviin mesh-verkkoihin on kasvanut. Useita tällaisia sovelluksia on kehitetty ja julkaistu
käyttäjille eikä verkkojen toimintaan näytä liittyvän ylitsepääsemättömiä vaikeuksia. Täl-
laiset valmiit sovellukset voivat hyödyntää Wi-Fi Direct ja Bluetooth teknologioita sekä
mahdollisesti ulkoisia laitteita ja infrastruktuuria.

5.3 Jatkokehitys

Sekä Wi-Fi Directiä että Bluetoothia käyttäessä suurimmat hidasteet ja ongelmat verkon
toiminnan kannalta ovat laitteita yhdistäessä vastaanottajan manuaalisen hyväksynnän
tarve sekä kyky yhdistää vain kaksi laitetta toisiinsa samanaikaisesti. Manuaalisen hy-
väksynnän tarpeen vuoksi yhdistämisprosessi voi viedä useita sekunteja tai estää yhtey-
denmuodostuksen ja tiedonsiirron vastaanottajalaitteelle ja siltä eteenpäin. Vastaavasti
koska normaalisti vain kaksi laitetta pystyvät yhdistämään toisiinsa kerralla, on viestin-
välitys hidasta ja se aiheuttaa usein ongelmatilanteita, mikäli kolmas laite yrittää liittyä
kesken yhdistämisprosessin tai tiedonsiirron.

Wong ja muut esittelevät julkaisussaan ”*Automatic Android-based Wireless Mesh Networks*” menetelmän, jolla laitteiden välinen yhdistämisprosessi voidaan automatisoida Wi-Fi Directillä luomalla *soft access point*, mikä käytännössä muuntaa laitteen väliaikaiseksi palvelimeksi. Luomisen jälkeen laite jakaa siihen yhdistämiseen vaaditun avaimen lähilaitteille. Menetelmä mahdollistaa nopean yhdistämisen ilman manuaalista vahvistusta. (Wong ym., 2014) Menetelmä helpottaa verkon toimintaa suuresti, mutta on altis Wi-Fi Direct -viitekehityksen muutoksille.

Androidin kehittäjänä Googlella on mahdollisuus tehdä huomattavia parannuksia Androidin sisäiseen Wi-Fi Direct- viitekehitykseen. Suurimmat ongelmat liittyvät laitteiden yhdistämisen hitauteen ja manuaalisen vahvistuksen tarpeeseen, ja vaikka näihin on jo olemassa ongelmat kiertäviä ratkaisuja, on vakaampien ja laajempien verkkojen kehityksen kannalta tärkeää itse alustan ja kehitysketjun valmius verkotukseen.

6. YHTEENVETO

Tutkielman tarkoituksena oli perehtyä mobiililaitteille rakennettaviin mesh-verkkoihin eli vertaisverkkoihin, erityisesti niiden toiminnan osa-alueisiin ja näiden ongelmiin. Tavoitteena oli myös perehtyä tällaisten verkkojen rakentamiseen Android-alustalla käyttäen hyväksi esimerkiksi sisäänrakennettuja viestinvälityskanavia. Android-pohjaiset mobiililaitteet ovat käytännöllisiä verkkoja varten, sillä ne ovat laajalti saatavilla ja perinteiseen radio- tai verkkoinfrastruktuuriin verrattuna mukautuvampia ja halvempia.

Mesh-verkot eroavat tavanomaisista tiedonsiirtoverkoista niiden dynaamisuudella ja kyvyllä mukautua verkon muuttuvaan rakenteeseen. Verkoille on ominaista jokaisen osalaitteen eli solmun kyky toimia verkossa sekä vastaanottajana että lähettäjänä, jolloin verkot eivät vaadi erillistä reititin- tai palvelininfrastruktuuria. Tämä mahdollistaa viestinvälityksen ketjutuksen, jolloin verkon kantama on teoriassa rajaton. Mesh-verkkojen rakentamisen ytimessä ovat peer-to-peer- eli vertaisyhteydet laitteiden välillä. Verkossa kaksi laitetta välittää tietoa suoraan toisilleen ilman reitittimiä. Verkot ovat hyödyllisiä erityisesti alueilla, joilla tavanomainen verkko- ja viestintäinfrastruktuuri on puutteellista tai vaurioitunutta. Tällaisia alueita voivat olla esimerkiksi luonnonkatastrofien alueet tai sotatilanteet.

Verkkojen toiminta jaettiin kahteen pääalueeseen, laitteiden väliseen yhteydenmuodostukseen ja tiedonsiirtoon sekä reititykseen. Yhteydenmuodostusvaiheessa laitteet havaitsevat ja pitävät kirjaa ympärillä olevista aktiivisista laitteista, sekä pyrkivät halutessa muodostamaan suoria yhteyksiä muihin laitteisiin tiedonsiirtoa varten. Tämän osa-alueen ongelmiksi havaittiin erityisesti yhdistämisen hitaus sekä Wi-Fi Direct- ja Bluetooth-teknologioilla vastaanottajalaitteen hyväksymisen tarve yhdistämistä varten. Toinen rajoite on kyky yhdistää vain yhteen laitteeseen kerrallaan, mistä johtuen verkon täytyy sietää yhdistämisen vikatilanteita ja pyrkiä mahdollisesti yrittämään yhdistämistä myöhemmin uudelleen. Reitityksen suurimmaksi, mutta ratkaistavissa olevaksi, ongelmaksi muodostui tiedon välittäminen eheästi koko verkon halki ilman moninkertaisia viestejä. Verkon on toisaalta kyettävä välittämään viesti kaikille osalaitteille, mutta myös pyrittävä välttämään viestin välitystä samalle laitteelle useaan kertaan. Tällainen reitityksen ongelma voidaan ratkaista ainakin osittain viestinnän kirjanpidon menetelmillä ja tietovarastojen synkronoinnilla.

Ongelmista huolimatta mesh-verkoille on nykymaailmassa käyttötarkoituksia. Pelastustoimen ja sotilaskäytön näkökulmasta mahdollisimman laajalle kantava ja vaikeissa olosuhteissa toimiva viestintä voi olla kriittistä, ja Android-puhelinten ollessa kaupallisesti saatavilla voivat mesh-verkot olla hyödyllinen lisä kommunikaatiokanaviin. Useita avoimen lähdekoodin sovelluksia on tarjolla sekä Android- että iOS-käyttöjärjestelmille perustuen Wi-Fi Direct- ja Bluetooth-tekniikoihin sekä ulkoisiin radiolähttimiin. Verkon rakentamisen ja yhteydenmuodostuksen ongelmiin on olemassa kiertoratkaisuja, mutta Androidilla toimivien, internetistä riippumattomien verkotusteknologioiden kehitykseen on silti syytä kiinnittää huomiota.

LÄHTEET

- Akyildiz, I. F., Wang, X., & Wang, W. (2005). Wireless mesh networks: A survey. *Computer Networks*, 47(4), 445–487. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2004.12.001>
- Bridgefy SDK Wiki*. (ei pvm.). bridgefy Notionissa. Noudettu 29. toukokuuta 2025, osoitteesta <https://bridgefy.notion.site/Bridgefy-SDK-Wiki-504a12df1abf4fc1b61591ed7ae2ced2>
- Camps-Mur, D., Garcia-Saavedra, A., & Serrano, P. (2013). Device-to-device communications with Wi-Fi Direct: Overview and experimentation. *IEEE Wireless Communications*, 20(3), 96–104. IEEE Wireless Communications. <https://doi.org/10.1109/MWC.2013.6549288>
- Conti, M., Delmastro, F., Minutiello, G., & Paris, R. (2013). Experimenting opportunistic networks with WiFi Direct. *2013 IFIP Wireless Days (WD)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/WD.2013.6686501>
- Create P2P connections with Wi-Fi Direct | Connectivity*. (ei pvm.). Android Developers. Noudettu 23. heinäkuuta 2024, osoitteesta <https://developer.android.com/develop/connectivity/wifi/wifi-direct>
- Faccin, S. M., Wijting, C., Kenck, J., & Damle, A. (2006). Mesh WLAN networks: Concept and system design. *IEEE Wireless Communications*, 13(2), 10–17. <https://doi.org/10.1109/MWC.2006.1632476>
- Hossain, E., & Leung, K. (Toim.). (2007). *Wireless Mesh Networks*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-68839-8>
- Introduction | Meshtastic*. (ei pvm.). Noudettu 29. toukokuuta 2025, osoitteesta <https://meshtastic.org/docs/introduction/>
- Liu, H., & Raychaudhuri, D. (2005). Label switched multi-path forwarding in wireless ad-hoc networks. *Third IEEE International Conference on Pervasive Computing and*

- Communications Workshops*, 248–252.
<https://doi.org/10.1109/PERCOMW.2005.42>
- Mbala, R. M., Nlong, J. M., & Kamdjoug, J.-R. K. (2021). A Framework for Multi-Hop Ad-Hoc Networking over Wi-Fi Direct with Android Smart Devices. *Communications and Network*, 13(4), Article 4. <https://doi.org/10.4236/cn.2021.134011>
- Meshtastic/Meshtastic-Android*. (2025). [Kotlin]. Meshtastic.
<https://github.com/meshtastic/Meshtastic-Android> (Original work published 2020)
- Misra, S., Misra, S. C., & Woungang, I. (Toim.). (2009). *Guide to Wireless Mesh Networks*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-84800-909-7>
- Rozner, E., Seshadri, J., Mehta, Y., & Qiu, L. (2009). SOAR: Simple Opportunistic Adaptive Routing Protocol for Wireless Mesh Networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 8(12), 1622–1635. <https://doi.org/10.1109/TMC.2009.82>
- Schollmeier, R. (2001). A definition of peer-to-peer networking for the classification of peer-to-peer architectures and applications. *Proceedings First International Conference on Peer-to-Peer Computing*, 101–102.
<https://doi.org/10.1109/P2P.2001.990434>
- Shen, X., Yu, H., Buford, J., & Akon, M. (Toim.). (2010). *Handbook of Peer-to-Peer Networking*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-09751-0>
- UstadMobile/Meshrabiya*. (2025). [Kotlin]. Ustad Mobile. <https://github.com/UstadMobile/Meshrabiya> (Original work published 2023)
- Wong, P., Varikota, V., Nguyen, D., & Abukmail, A. (2014). Automatic Android-based Wireless Mesh Networks. *Informatica*, 38, 313–320.
- Yarali, A., Ahsant, B., & Rahman, S. (2009). Wireless Mesh Networking: A Key Solution for Emergency & Rural Applications. *2009 Second International Conference on Advances in Mesh Networks*, 143–149. <https://doi.org/10.1109/MESH.2009.33>