

Tuomas Laatusen

**LANGATON VERKKO LENNONOHJAUS-  
JÄRJESTELMÄN TIEDONSIIRROSSA –  
FLY-BY-WIRELESS**

Kandidaatintyö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Tarkastaja: Jussi Aaltonen  
Huhtikuu 2023

# TIIVISTELMÄ

Tuomas Laatuinen: Langaton verkko lennonohjausjärjestelmän tiedonsiirrossa – Fly-By-Wireless

Kandidaatintyö

Tampereen yliopisto

Teknisten tieteiden kandidaattiohjelma

Huhtikuu 2023

---

Ilma-alusten suorituskykyä pyritään parantamaan jatkuvasti kuitenkin turvallisuudesta tinkimättä. Etenkin kaupallisessa matkustajailmailussa turvallisuus on tärkein elementti lentokoneita suunniteltaessa. Yksikin komponenttirikko tai järjestelmävika voi aiheuttaa vakavia seurauksia. Tämän vuosituhannen matkustajalentokoneissa käytetty Fly-By-Wire (FBW) -järjestelmä on taannut hyvän ja luotettavan lennonohjausjärjestelmän, mutta siitäkin on löydettävissä parannusta kaipaavia kohtia. Langatonta tiedonsiirtoa esiintyy kaikkialla ympärillämme ja se kehittyi huimaa vauhtia. Tulevaisuudessa nähdään varmasti nykyistä enemmän kriittisten järjestelmien muuttuvan langattomiksi.

Tässä tutkielmassa perehdytään kirjallisuustutkielman muodossa ensin nykyajan lennonohjausjärjestelmiin, jotta saadaan pohjaa tutkimukselle uusista mahdollisista järjestelmistä. Sitten tutkimme nykyaikaisten avioniikassa käytettävien tiedonsiirtoväylien nopeuksia ja langallisen tiedonsiirron turvallisuutta. Tämän jälkeen käsittelemme mahdollisia langattoman tiedonsiirron tekniikoita, joilla voitaisiin korvata FBW-järjestelmässä käytetyt tiedonsiirtoväylät ja muuntaa se Fly-By-Wireless -järjestelmäksi. Viidennessä luvussa käsitellään yleisiä langattoman järjestelmän etuja ja haittoja sekä esitetään tarvittavia tutkimuksen kohteita Fly-By-Wirelessin toteuttamiseksi.

Useita hyötyjä on keksittävässä langattomalle järjestelmälle kuten huoltojen helpottaminen, suunnittelun joustavuus ja ilma-aluksen keventäminen. Sen toteuttamisen eteen on kuitenkin tehtävä paljon tutkimusta langattoman tiedonsiirron turvallisuuden ja deterministisyyden selvittämiseksi. Signaalin heikkeneminen lentokoneen rakenteissa on yksi suurimmista ongelmista langattomassa lähetyksessä. Lupaavimpana teknologiana aikaherkän avioniikan vaatimuksiin esiintyy Ultra Wide-Band (UWB) -teknologia. UWB-lähetyksellä on parempia kykyjä vastustaa häiriöitä kuin perinteisillä WLAN-ratkaisuilla, eikä se resonoi niin vahvasti rakenteiden kanssa. Kuitenkin paljon tutkimusta on tehtävä, jotta UWB-teknologiaa saadaan implementoitua ilmailun tarkoituksiin ja korkeisiin aikakriittisen avioniikan turvallisuusvaatimuksiin ylletään.

Avainsanat: Lennonohjausjärjestelmä, Fly-By-Wireless, langaton tiedonsiirto

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

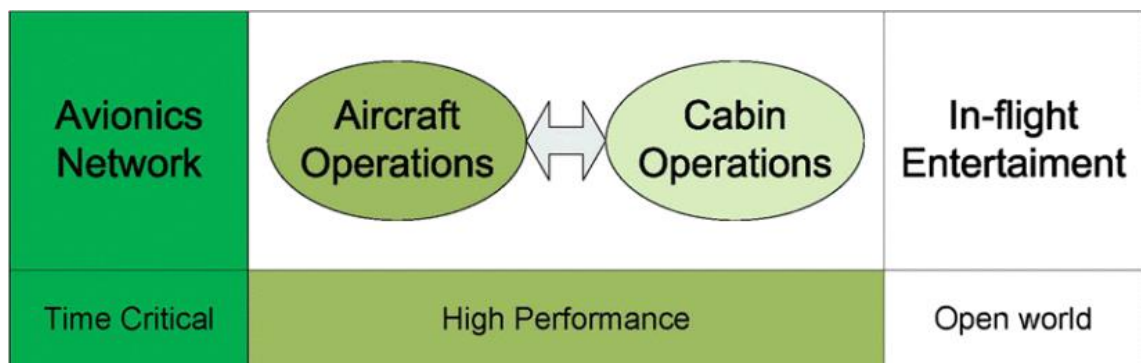
1. JOHDANTO .....	1
2. LENNONOHJAUSJÄRJESTELMÄT NYKYPÄIVÄNÄ.....	3
3. SUORITUSVAATIMUKSET LENNONOHJAUSJÄRJESTELMÄLLE .....	6
3.1    Erilaiset tiedonsiirtoväylät FBW-järjestelmissä .....	6
3.2    Lennonohjausjärjestelmän luotettavuus .....	7
4. LANGATTOMAN TIEDONSIIRRON VAIHTOEHDOT JA TURVALLISUUS .....	8
4.1    Potentiaaliset teknologiat .....	8
4.2    Langattoman tiedonsiirron uhat.....	10
5. FLY-BY-WIRELESS MAHDOLLISUUDET JA ONGELMAT .....	12
5.1    Langattoman järjestelmät edut .....	12
5.2    Tekniikan puutteita ja kehityskohtia kohti langatonta järjestelmää .....	12
6. YHTEENVETO.....	14
LÄHTEET .....	15

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

AFDX	Avionics Full-Duplex Switched Ethernet
FBW	Fly-By-Wire
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
UWB	Ultra-Wideband
WAIC	Wireless Avionic Intracommunications
WLAN	Wireless Local Area Network

# 1. JOHDANTO

Lentokoneet ovat hyvin monimutkaisia mekatronisia kokonaisuuksia, joilla on korkeat turvallisuusvaatimukset. Korkeisiin turvallisuusluokituksiin päästäkseen on lentokoneiden kriittisiä järjestelmiä huollettava tiheästi. Ohjausjärjestelmät ja varaohjausjärjestelmät ovat sokkeloisia johtojen ja kaapeleiden verkkoja, joita on hankala ja kallis huoltaa. Tyypillisessä leveärunkoisessa matkustajakoneessa voi olla jopa 240 km kuparijohtoa (Furse & Haupt 2001). Tällaista määrää johtoja on vaikea valvoa ja vielä vaikeampi vaihtaa, sillä järjestelmät on rakennettu sisälle osaksi konetta. Suurin osa aiemmin mainitusta johtojen määrästä on osa muita järjestelmiä kuin lennonohjausjärjestelmää. Ohjausjärjestelmiksi voidaan kutsua muitakin lentokoneeseen kuuluvia järjestelmiä, kuten lentokoneen kunnonvalvontajärjestelmää ja niistä käytetään englannin kielessä nimitystä Wireless Avionics Intracommunications (WAIC). Tässä työssä käytetään lentokoneen ohjainpintojen liikutteluun käytettävästä järjestelmästä nimitystä lennonohjausjärjestelmä (eng. Flight Control System, FCS). Kuvassa 1 on eroteltu joitakin ohjausjärjestelmiä, joista tässä työssä keskitytään kuitenkin vain aikakriittiseen eli lennonohjausjärjestelmään.



**Kuva 1.** Lentokoneen ohjausjärjestelmien jaottelu (Dang et al. 2012)

Pitkän matkan lentokoneessa ohjaussignaaleja lähettävien johtojen määrä on merkittävä. Ne voivat olla painoltaan jopa 700 kg (Zahmati et al. 2011). Nämä ohjaussignaaleja lähettävät reitit ovat potentiaalisesti vaihdettavissa langattomiksi, ja tähän mahdollisuuteen perehdymme tässä tutkielmassa. Matkustajalentokoneet käyttävät langattomia yhteyksiä kommunikointiin lennonjohdon kanssa sekä tarjotakseen matkustajille internetyhteyden lennon aikana. Seuraavana askeleena voisi olla langattoman verkon rakentaminen lentäjän ohjaimen ja lentokoneen ohjainpintojen välille. Langaton ohjausjärjestelmä voitaisiin suunnitella modulaariseksi, mikä helpottaisi koneen huoltoja. Järjestelmä

koostuisi useista avioniikkapesäkkeistä, joita olisi helpompi vaihtaa ja huoltaa kuin tämänhetkisiä järjestelmiä. Langattomuus vähentäisi myös koneen painoa ja vähentäisi sähköjohdoista johtuvaa tulipalon riskiä (Dang et al. 2012). Langattomuudesta herää usein huoli yhteyden vakauudesta ja turvallisuudesta, eikä tämä huoli ole täysin aiheeton. Langattomat verkot ovat alttiita elektroniselle häirinnälle, ja matkustajien turvallisuus pitää olla taattu. Tätä ongelmaa tämä teksti pyrkii myös pohtimaan.

Aihe on mielenkiintoinen sen uutuuden takia. Tätä konseptia ei ole juurikaan pohdittu tieteellisissä teksteissä vielä suomeksi. Ensimmäisiä tieteellisiä tekstejä aiheesta on vuoden 2007 tienoilta. Yksityisjettejä valmistava Gulfstream on testannut langatonta järjestelmää varaohjausjärjestelmänä jo vuonna 2008 ja saanut silloin lupaavia tuloksia järjestelmän toiminnasta (Aviationpros, 2008). Yritys ei kuitenkaan sittemmin ole raportoinut edistyksestään tällä osa-alueella. Erilaisia hybridimalleja langattoman ja langallisen järjestelmän välille on esitetty muutamissa konferenssijulkaisuissa, mutta niin sanottua ”dominant designia” ei ole vielä esiintynyt. Kattavaa tutkielmaa varten tulisi aihetta opiskella valtavasti enemmän ja ymmärtää lentokoneiden järjestelmiä kokonaisvaltaisesti. Pääsin kuitenkin perehtymään avioniikkaan ja sen arkkitehtuuriin, mikä oli erittäin mielenkiintoista. Aihe saatteli minut myös perehtymään langattoman tiedonsiirron maailmaan, josta en aiemmin tiennyt paljoakaan.

Tutkielma on toteutettu kirjallisuustutkielman muodossa ja se pyrkii selventämään nykyisin käytössä olevien matkustajalentokoneiden lennonohjausjärjestelmien toimintaa, niiden suorituskykyä ja langattoman tiedonsiirron kykyjä. Lopuksi yritämme näitä tietoja yhdistämällä pohtia langattoman tiedonsiirron mahdollisuutta lennonohjausjärjestelmässä.

Ensimmäisessä luvussa perehdytään ensin lyhyesti matkustajalentokoneiden tämänhetkisiin lennonohjausjärjestelmiin ja esitellään nopeasti uusi ohjausjärjestelmäkonsepti Fly-By-Wireless. Tämän jälkeen käsitellään matkustajalentokoneiden ohjausjärjestelmien suoritus- ja turvallisuusvaatimuksiin luvussa 3. Luvussa 4 tarkastellaan langattoman tiedonsiirron ominaisuuksia ja niiden sovelluksia ilmailussa. Lopuksi luvussa 5 pohditaan langattoman ohjausjärjestelmän mahdollista tulevaisuutta ilmailussa ja sen hyötyjä ja haittoja.

## 2. LENNONOHJAUSJÄRJESTELMÄT NYKYPÄIVÄNÄ

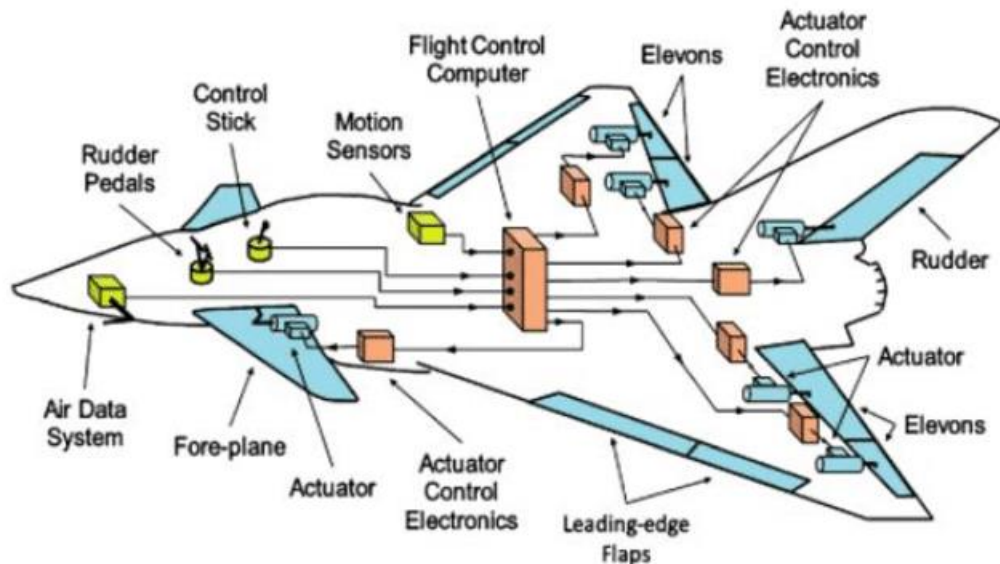
Lennonohjausjärjestelmällä tarkoitetaan mekaanista tai mekatronista kokonaisuutta, jolla välitetään lentäjän ohjausliikkeet ohjainpinnoille. Myös moottorin ohjaus kuuluu tämän järjestelmän alle. Ohjainpinnat tarkoittavat lentokoneen siivissä sijaitsevia laippoja ja takana sijaitsevia peräsimiä, joilla säädetään siiven ja perän nostovoimaa ja siten lentokoneen kallistusta ja lentokorkeutta.

Lennonohjausjärjestelmät ovat alun perin olleet mekaanisia. Mekaaniset järjestelmät välittävät lentäjän ohjaimien liikkeet vaijereiden ja työntötankojen avulla ohjainpinnoille asti ilman elektronisia signaaleja tai vahvistuksia. Tällaisen järjestelmän huoltaminen on helppoa, ja sen toiminta on varmaa, mutta varajärjestelmän lisääminen voi olla vaikeaa. Mekaanisia ohjausjärjestelmiä käytetään vieläkin joissain pienkoneissa. Suurempien ja nopeampien lentokoneiden kehittyessä ohjainpintojen liikutteluun on kehitetty hydraulijärjestelmiä, sillä ohjainpinnat vaativat suurempia voimia. Näillä hydraulijärjestelmillä päästiin suurempiin voimiin ja niihin pystyttiin kytkemään useita aktuaattoreita varotoimenpiteinä. Hydraulijärjestelmät olivat kuitenkin raskaita ja alltiita vikaantumiselle. Nykyään toimilaitteiden ohjaukseen käytetään sähköisiä signaaleja ja mekaanisia ohjainjärjestelmiä käytetään vain harvoissa koneissa varajärjestelminä. (Hoffren & Saarela 2008, s. 152–158)

Nykypäivän matkustajalentokoneissa on lähes poikkeuksetta käytössä Fly-By-Wire (FBW) -järjestelmä, joka on osoittautunut monen vuosikymmenen aikana toimivaksi ja turvallisiksi. Tämä FBW-järjestelmä perustuu sähköiseen tiedonsiirtoon sähköjohtinten välityksellä lentäjän sauvasta lentotietokoneen kautta ohjainpinnoille. FBW:n etuja vanhempiin järjestelmiin nähden on sen keveys, vakaus ja turvallisuus. (Dang et al. 2012)

FBW-järjestelmässä lentotietokone käsittelee lentäjän ohjaimelta saapuvat käskyt ja tulkitsee, mitä ohjausliikkeellä halutaan tehdä. Tietokone sitten luo ja lähettää signaalit ohjainpinnoille ja halutut ohjausliikkeet suoritetaan optimaalisella tavalla monen ohjainpinnan yhteistyönä. Tietokoneen ohjaamat liikkeet ovat sulavampia ja siten energiatehokkaampia kuin ihmisen tekemät liikkeet. Ohjainpinnat välittävät jatkuvasti takaisinkytketynä signaalia asemastaan tietokoneelle, minkä lisäksi tietokone saa tietoa antureilta ympäri lentokonetta sen positiosta, kohtauskulmasta sekä nopeudesta. Näiden tietojen avulla tietokone pystyy pitämään ohjaajan viimeiseksi määräämän lentosuunnan ja kalistuksen, vaikka lentokoneen luontainen reaktio olisikin suoristua tai kääntyä muualle.

Tämä tekee lentämisestä sulavampaa, helpompaa ja energiatehokkaampaa. Lentotietokone pitää huolen myös siitä, että ohjausliikkeet pysyvät lentokoneen rakenteille turvallisissa rajoissa. Tämä parantaa turvallisuutta ja pidentää lentokoneiden elinikää. (Tooley 2013, s. 182) Kuvassa 2 esitetään FBW järjestelmien arkkitehtuuria suurpiirteisesti.



**Kuva 2.** FBW-ohjausjärjestelmän peruselementit (Chowdhury et al. 2013)

Nykyisessä ohjausjärjestelmässä on kuitenkin vaatimuksena useita kymmeniä tai jopa satoja kilometrejä sähköjohtoja, jotka painavat paljon ja saattavat aiheuttaa ylikuumentumista. Lentoelektronikkaa pystytään muuten vaihtamaan lentokoneissa useinkin otteeseen sen eliniän aikana, mutta sähköjohtimet ovat usein alkuperäiset, mikäli kriittisiä vikoja ei huomata. Sähköjohtimien huollon uupuminen voi johtaa kipinäintiin ja tulipaloihin johdinten hiertymisen seurauksena. (Flight Safety Foundation Editorial Staff 2005) Kuparijohdot ovat myös alttiita elektroniselle häirinnälle. Näitä johtimia voidaan suojata häirinnältä erinäisillä suojakerroksilla (Furse & Haupt 2001). Tämän suojaamisen haittapuoli on lisämateriaalin tuoma lisäpaino.

FBW:ssä käytössä olevien tietokoneohjauksen periaatteita voitaisiin soveltaa myös langattomissa ohjausjärjestelmissä: täten ei langattoman järjestelmän luomisessa tarvitsisi keskittyä kuin ohjaimen, tietokoneen ja ohjainpintojen väliseen informaation siirtoon. Tutkimuksen alla oleva langaton ohjausjärjestelmä kulkee toistaiseksi nimellä Fly-By-Wireless. Tämä teknologia edistäisi entisestään lentokoneen painon pudottamista, koska fyysiset yhteydet tietokoneiden ja toimilaitteiden välillä olisivat tarpeettomia. Dangin et al. (2012) mukaan nykypäivänä langattomat verkot ovat kustannustehokkaimpia ratkaisuja moniin ohjauslaitteisiin niiden yleisyyden ja helpon käytettävyyden takia. Niitä on testattu



ja sovellettu teollisuudessa jo useissa aikakriittisissä tapauksissa ja näistä on saatu lupaavia tuloksia (Willig et al. 2005). Erilaisia arkkitehtuureja langattomille lennonohjausjärjestelmille on esitetty, mutta yhtä johtavaa valintaa tai standardia Fly-By-Wireless -järjestelmälle ei ole vielä löytynyt. Tähän aiheeseen palataan vielä luvussa 5.

### **3. SUORITUSVAATIMUKSET LENNONOHJAUSJÄRJESTELMÄLLE**

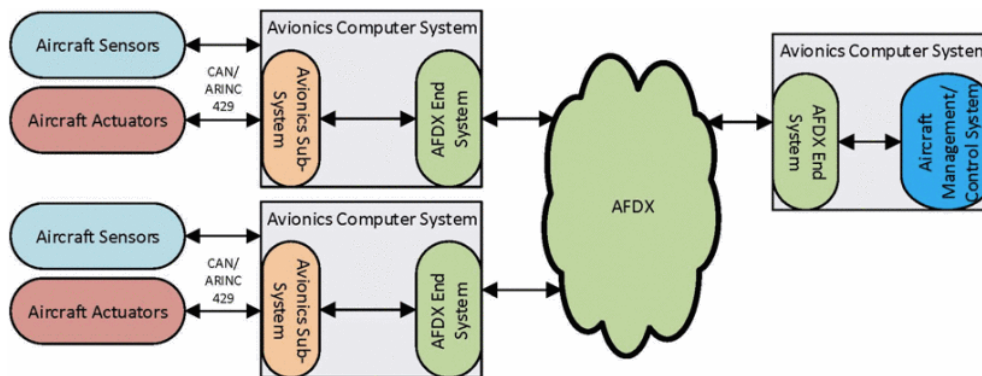
Viralliset turvallisuusstandardit lentoelektronikalle ovat riippuvaisia alueellisista määräyksistä. Euroopan unionin lentoturvallisuusvirasto (EASA) on määritellyt lennonohjausjärjestelmiä hyvin suurpiirteisesti, mutta voimme tarkastella tämänhetkisen FBW-järjestelmän suorituskykyä ja turvallisuutta, ja siten asettaa vaatimuksia langattoman järjestelmän luotettavuudelle. Yleisiä ilmailussa käytettäviä standardoituja tiedonsiirtoväyliä ovat muun muassa ARINC 429, ARINC 664, MIL-STD-1553 ja CAN (Tooley 2013, s. 50). Seuraavissa kappaleissa ei kuitenkaan käsitellä MIL-STD-1553 väylää, sillä se ei ole tavanomainen matkustajalentokoneissa.

#### **3.1 Erilaiset tiedonsiirtoväylät FBW-järjestelmissä**

Tooleyn (2013, s. 194) mukaan nykyisen FBW-järjestelmän tiedonsiirron runko eli päälentotietokoneelta lähtevät yhteydet on toteutettu AFDX protokollan avulla. Tämä on Airbusin patentoima dataverkko, joka perustuu IEEE 802.3(Ethernet) mukaiseen tiedonsiirron standardiin ja käyttää ARINC 664 väylää. Tämä standardi tunnetaan paremmin nimellä Ethernet ja täten siihen perustuva järjestelmä on muodostettavissa yleisesti saatavilla olevista komponenteista (Tooley 2013, s. 194). Englanniksi tällaisista komponenteista käytetään nimitystä ”commercial off-the-shelf (COTS) components”. Tooleyn (2013, s. 194) mukaan tämän AFDX runkoverkon tiedonsiirron nopeus on 100 Mbps. AFDX verkossa alijärjestelmät on kytketty tuplalinkeillä tiedonsiirtoväyliin. Näissä linkeissä on puskurimuistit, jonka avulla dataa voidaan säilöä hetken aikaa, mikäli tiedonsiirtoväylät ovat hetkellisesti täynnä. (Tooley 2013, s. 195) Langattoman lennonohjausjärjestelmän runkoverkon nopeuden vaatimukseksi voidaan siis asettaa 100 Mbps. Isona etuna voidaan pitää COTS-komponenttien käyttöä ja vaatia sitä myös langattomalta järjestelmältä. Lennonohjausjärjestelmältä vaaditaan myös determinististä käyttäytymistä, eli ennalta arvattavaa tiedonsiirtokykyä (Tooley 2013, s. 195). Tiedon lähetyksissä voi siis esiintyä viiveitä, mutta niiden pitää olla sovittujen rajojen sisällä aina ja taatusti.

Alijärjestelmien yhdistäminen sensoreille ja ohjainpinnoille on toteutettu CAN tai ARINC429 dataväylien avulla. CAN lyhenne tulee sanoista Controller Area Network ja tarkoittaa automaatiöväylä protokollaa, jota käytetään usein ajoneuvoissa ja teollisuudessa. CAN väylän tiedonsiirtonopeus on noin 1 Mbps. (Dang et al. 2012) Tooleyn (2013) mukaan ARINC429 on yhdysvaltalaisen AEEC:n (Airlines Electronic Engineering Committee) kehittämä ja standardoima kaksijohtiminen väyläprotokolla ilmailua varten.

Väylän nopeus on maksimissaan 100 Kbps ja se tukee enintään 20 päätelaitetta. Tämä väyläteknikka kykenee vain yhdensuuntaiseen tietoliikenteeseen, jonka takia kaksinkertainen väylä vaaditaan, mikäli päätelaitteelta toivotaan myös lähetys takaisin tietokoneelle (Tooley 2013, s. 45). Voimme siis vaatia muilta kuin runkoyhteyksiltä noin 1 Mbps nopeutta ja kykyä noin 20 yhteyteen. Kuvassa 2 esitetään nykyisen lennonohjausjärjestelmän tietoverkon rakenne, joka selventää näiden tietoväylien käyttötarkoitusta.



**Kuva 3.** Lennohjausjärjestelmän tietoverkon rakenne. (Akram et al. 2015)

### 3.2 Lennohjausjärjestelmän luotettavuus

Turvallisuuden puolesta lennohjausjärjestelmän tulisi olla tiukasti valvottu ja suojattu luvottomien käyttäjien varalta. Tämän takia verkon pitäisi olla selkeästi eroteltu matkustajien käyttämästä verkosta. Verkon tulee pystyä takaamaan, että lähetetty tieto pysyy muuttumattomana lähetysten ajan. Verkon tulee käyttäytyä ennustettavalla tavalla eli lähetysten tulee olla determinististä; järjestelmässä saa esiintyä viivettä, mutta sen tulee olla tietyissä rajoissa. Turvallisuuskriittisessä lentoelektroniikan verkossa vikojen ilmaantumisen todennäköisyyden pitäisi olla pienempi kuin  $10^{-9}$  tapausta per lentotunti. Tällaiseen turvallisuuteen päästäkseen avioniikka tietoverkon on pystyttävä tunnistamaan ja estämään vikaantumiset. Lennohjausjärjestelmän tulee toimia kovissa olosuhteissa, joissa esiintyy värinää, kosteutta, lämpötilan muutoksia ja intensiivistä radiokohinaa. (Dang et al. 2012) Varajärjestelmien kytkeminen on hyvin yleistä ja monissa uusissa koneissa on monikertaiset väylät tai perustavan ohjauksen mahdollistavat mekaaniset järjestelmät mahdollisen vikaantumisen varalta (Tooley 2013, s. 182).

## 4. LANGATTOMAN TIEDONSIIRRON VAIHTOEHDOT JA TURVALLISUUS

Langattoman ohjausjärjestelmän luomiseen halutaan käyttää valmiita teknologioita, eikä suunnitella kokonaan uusia tiedonsiirtometodeja. Runkoverkon suurempiin datan siirtomääriin soveltuvia valmiita teknologioita on esimerkiksi Ultra Wide Band (UWB) -teknologia, jota on käsitelty monessa muussa WAIC-järjestelmiin liittyvissä kirjallisuustutkimuksissa. Tässä luvussa tarkastellaan myös IEEE 802.11 -teknologiaa mahdollisena vaihtoehtona, joka tunnetaan kansanomaisemmin nimellä Wi-fi. Myös Bluetooth yhteyttä harkitaan mahdolliseksi tiedonsiirtokeinoksi. Nämä tiedonsiirtokeinot valittiin tutkittavaksi, sillä UWB on näistä tekniikoista lupaavin ja Wi-fi sekä Bluetooth ovat tunnetuimpia langattomia teknologioita. Tulevissa kappaleissa keskitytään teknologioiden nopeuksiin ja luotettavuuteen. Salaustapoja tai tarkempia fysikaalisia teorioita teknologioille ei käsitellä.

Vuonna 2015 International Telecommunication Union—Radiocommunication (ITU-R) julkisti kaistan 4,2–4,4 GHz viralliseksi taajuusväliksi langattomien avioniikkajärjestelmien käyttöön (ITU-R 2015). Vaikka Bluetooth ja IEEE 802.11 toimivat tyypillisesti 2,4GHz tai 5GHz taajuudella, ne ovat muokattavissa haluttuun ITU-R:n julkistamaan kaistaan sopiviksi melko helposti. Virallisesti sovitun taajuusalueen käytöllä pyritään luomaan yhtenäistä tutkimusta ja yhteensopivia teknologioita langattomalle ohjaukselle ilmailuun. Sovitut taajuusalueet myös vähentävät vahingossa aiheutuvia häiriöitä. (Park et al. 2021)

### 4.1 Potentiaaliset teknologiat

UWB-teknologia perustuu lähetettävän tiedon jakamiseen suuremmalle kaistan leveydelle eli lähetyksen taajuus vaihtelee yli 500 MHz. Tämä takaa paremman suojan häirintäiskujavastaan, joissa usein häirintä kohdistetaan tiettyyn taajuuteen. UWB-lähetys ei perustu perinteiseen kanta-aallon modulointiin vaan lyhytkestoisten pulssien lähetykseen. Pulssit lähetetään määrätyn, mutta satunnaiselta vaikuttavien väliajoin, jolloin lähetyks ei resonoi ympäristön kanssa yhtä voimakkaasti kuin perinteinen radiolähetys. (Ultra Wideband for Your Fastest Computing Experience 2013) Tämä on tärkeä ominaisuus, sillä lentokoneen rakenteet aiheuttavat suuria tehohukki langattomalle lähetykselle. UWB-teknologialla tiedonsiirtonopeudet ovat 110, 200 ja 480 Mbps etäisyyksillä 10, 6 ja 2 metriä. Suurin osa aikakriittisistä alijärjestelmistä sijaitsee kahdessa avioniikkatilassa,

joista toinen on lentokoneen ohjaamon alla ja toinen koneen keulan yläosassa. Kummankin tilan halkaisija on alle kuusi metriä ja täten UWB-tekniikalla voidaan luottaa keskinopeuteen 200Mbps. UWB tekniikan sovelluksessa on kuitenkin muutamia ongelmia. Leveä kaistanleveys ei mahdu ITU-R:n määrittämään toimintaväliin, ja sen kaventaminen laskee sen toimintakykyä huomattavasti. UWB-tekniikka voi myös aiheuttaa kohinaa ja häiriöitä esimerkiksi GPS-laitteistoihin. (Park et al. 2021) Mahdollisia lisätutkimuksia vaadittaisiin tämän tekniikan soveltamiseen kansainvälisten sopimusten puitteissa. UWB-tekniikan standardointi edistäisi sen soveltamista ilmailuun huomattavasti. Tekniikan kyvykyys kestää häirintää on kuitenkin suuri etu muihin vaihtoehtoihin nähden. Myös tiedonsiirtonopeus olisi tarvittavan suuri.

IEEE 802.11 on Institute of Electrical and Electronics Engineers -järjestön spesifioima tekniikka langattomalle lähiverkolle eli WLAN:lle. Tästä tekniikasta on paljon käyttökokemuksia ja sen avulla järjestelmää voisi rakentaa COTS-komponenteilla. Tekniikalle on myös hyvät salaustekniikat, sillä se on ollut kaupallisessa käytössä pitkään. Vaikka uudemmat versiot tekniikasta, kuten Wi-fi 6, lupaavat yhteysnopeuksia jopa 10Gbps asti, Wi-fi:n tehokkuuteen ei voida täysin luottaa ja yhteysnopeudet ovat usein paljon luvattua maksimia alhaisempia. Yhteysnopeudet ovat ailahtelevia, eikä aikakriittisiin vaatimuksiin yllätä viiveen takia. Yleisimmät kotitalouksissa käytettävät versiot tästä tekniikasta eivät takaa vaadittua determinististä käytöstä järjestelmälle. (Park et al. 2021) Kapeakaistainen ja melko korkeataajuuksinen säteily resonoi myös metallirakenteiden kanssa vahvasti ja siksi saattaa kriittisesti vaimeta lentokoneen rakenteiden sisällä. IEEE 802.11 voisi soveltua muihin WAIC-järjestelmiin kuin aikakriittiseen lennonohjausjärjestelmään.

Bluetooth on matalatehoinen langattoman tiedonsiirron keino, jota yleisimmin käytetään mobiililaitteiden yhdistämiseen. Se mahdollistaa laitteiden autentikoinnin ja tiedon lähetyksen salauksen. Nopeus Bluetooth yhteydellä voi olla 3Mbps, joka riittäisi antureiden ja alijärjestelmien yhdistelemiseen, mutta myös tämän tekniikan tiedonsiirtonopeus riippuu monesta tekijästä, kuten käytettävistä komponenteista ja ympäristöntekijöistä. Rondon et al. (2017) analysoi teoksessaan Bluetoothin ominaisuuksia aikakriittisiä teollisia ratkaisuja varten. Rondon et al. (2017) saavuttamista tuloksista voidaan päätellä, että lähetyksen luotettavuus ja matala viive saadaan saavutettua erikseen, mutta samanaikaisesti kaikkia kaupallisen ilmailun vaatimuksia ei saisi täytettyä. Coelho et al. (2006) esittelee konferenssijulkaisussaan miehittämättömän ilma-aluksen ohjausjärjestelmää, joka on toteutettu Bluetooth yhteyksin. Tämän ohjausjärjestelmän hyötyinä kokeilussa huomattiin sen joustavuus rungon suunnittelun yhteydessä. Tässä julkaisussa toki haettiin puhua järjestelmän puolesta, eikä haittapuolia juurikaan mainittu. Vaikka Bluetooth

teknologia on todettu tässä tapauksessa toimivaksi, se ei välttämättä riitä ihmishenkiä kuljettavan aluksen ohjaukseen. Yleisesti Bluetooth laitteet tukevat alle kymmentä aktiivista yhteyttä ja tämäkään ei riitä vastaamaan ARINC 429 ominaisuuksia.

## 4.2 Langattoman tiedonsiirron uhat

Radiolähetykset ovat hyvin alttiita sähkömagneettiselle häirinnälle. Häirintä ja kyberhyökkäykset voivat kohdistua ohjausjärjestelmään lentokoneen sisältä matkustajan toimesta tai jopa maasta asti. Korkeiden taajuusalueiden häirintä on kuitenkin vaikeampaa pidemmiltä matkoilta, koska korkeammilla taajuuksilla radioaallot eivät kanna kovin pitkälle ilman valtavaa lähetystehoja. Täten matkustajalentokoneet ovat melko turvassa luontaisella lentokorkeudellaan yli kymmenen kilometrin korkeudella.

Oleelliset kolme kyberhyökkäysten tyyppiä langatonta lentoelektroniikkaa kohtaan Sampigethayan et al. (2008) mukaan ovat:

Häirintäiskut (eng. Jamming attacks): Ilma-aluksen langattomia yhteyksiä voidaan sulkea tai keskeyttää lähettämällä vastaanottimelle saman taajuuksista lähetystä kuin laite normaalisti käyttää, mutta suuremmalla teholla. Vaikka ulkopuolisten signaalien vastaanottamista pystytään rajoittamaan, tämän tyyppistä hyökkäystä ei voida täysin estää. Paras puolustuskeino häirintäiskua vastaan on keskittyä häirinnän aikaiseen havaitsemiseen.

Väliintulohyökkäys (eng. Man-in-the-Middle attack): Ilma-aluksen turvallisuutta tai lentoyhtiön yritystoimintaa uhatakseen vihollistaho voi muunnella, korruptoida tai lisätä tietoa yhteyspisteiden välillä liikkuvaan signaaliin. Hyökkääjä voi esimerkiksi yrittää estää antureiden vikailmoituksia tai muuttaa navigaatiojärjestelmän tuottamaa tietoa. Tällaisia uhkia estetään rajoittamalla fyysistä pääsyä lähetinlaitteiden luo, jolloin niihin ei voida asettaa ulkopuolisia lähteitä. Tämä voidaan ottaa huomioon lentokoneen arkkitehtuurin suunnittelussa.

Väärät hälytykset (eng. False Alarm): Harhaan johtavat vikailmoitukset eivät ole välttämättä uhka ilma-aluksen turvallisuudelle, mutta voivat johtaa suuriin taloudellisiin tappioihin. Esimerkiksi väärät vikailmoitukset moottoreilta voi aiheuttaa turhia hätälaskuja ja ylimääräisiä huoltokäyntejä.

Häiriötä langattomiin signaaleihin voi aiheutua muutenkin kuin tarkoituksen mukaisesti jonkin vihamielisen tahon aiheuttama. Radiotaajuuksia on säädelty käyttötarkoitustensa mukaisesti melko tarkasti, joten ISM-taajuudet (eng. industrial, scientific and medical) eivät häiritse 4,2–4,4 GHz taajuuskaistalla toimivaa ohjausjärjestelmää. Kuitenkin muut

lentokoneet käyttäisivät samoja taajuuksia ja saattaisivat aiheuttaa toinen toisellensa ongelmia. Ilmassa ollessaan lentokoneet lentävät vähintään 300 m etäisyydellä toisistaan ja eivät siten aiheuta häiriötä. Maassa lentokoneita parkkeerattaessa saattaisi kuitenkin esiintyä joitakin päällekkäisyyksiä tietyillä taajuuksilla ja siksi vierekkäisten koneiden käyttämiä taajuuksia pitäisi säännöstellä. (Park et al. 2021) Tämä olisi yksi muuttuja lisää lentokenttien järjestelyihin.

Matkustajakoneiden avioniikan tulee kestää rajuissa olosuhteissa värinää, kosteutta ja lämpötilan muutoksia. Kaikkein relevanteimmat luonnolliset häiriötekijät ovat ilmakehän kaasut, kosteus ja sähköiset varaukset kuten salamointi. Myös aurinkotuulet voivat vaikuttaa sähkömagneettisen säteilyn etenemiseen ja sen vastaanottamiseen. (Aglaroz & Spangenberg 2014) Sähkömagneettinen säteily kokee vaimenemista lentokoneen runkorakenteista. Jatkuva lähetys voi resonoida vahvasti seinien kanssa ja vaimentua tunnistamattomaksi. UWB-tekniikan pulssilähetys on parempi vaihtoehto tiiviisiin tiloihin, sillä se läpäisee pintoja paremmin. Lentokoneen rakenteissa sähkömagneettisen signaalin lähettämistä tulisi tutkia vielä tarkemmin.

## 5. FLY-BY-WIRELESS MAHDOLLISUUDET JA ONGELMAT

Mikäli Fly-By-Wireless järjestelmä saataisiin toteutettua, voitaisiin ilmailussa säästää rahaa, luontoa ja jopa ihmishenkiä. Tutkimusta on kuitenkin tehtävä runsaasti, jotta järjestelmä uskalletaan implementoida kaupalliseen liikenteeseen.

### 5.1 Langattoman järjestelmät edut

Langattoman järjestelmän etuihin kuuluu etupäässä taloudelliset säästöt. Kaapeleiden asennus ja huoltokustannukset muodostavat huomattavan osan valmistajien ja lentoyhtiöiden menoista. Tyypillisesti sensorin tai muun toimilaitteen asennus piuhoinen lentokoneeseen maksaa moninkertaisesti enemmän kuin toimilaitte itse. Sähköjohtimien asetelun suunnittelu on myös suuri kustannuserä lentokonevalmistajille. Tämän lisäksi kuparin hinnan nousu aiheuttaa selkeästi kustannuksia lentokoneiden valmistuksessa nyt ja tulevaisuudessa. Kaikki nämä edellä mainitut kulut laskevat langattoman järjestelmän onnistuessa. Langaton järjestelmä voi pudottaa matkustajalentokoneen painoa merkittävästi ja täten säästää polttoainetta ja luontoa. (Park et al. 2021)

Avioniikkajärjestelmiltä vaaditaan korkeaa turvallisuustasoa, jotta katastrofaalisilta tapaturmilta vältytään. Särkyneet liitännät johdoissa ovat yleisiä ja voivat aiheuttaa merkittävää häirintää laitteisiin lentokoneen sisällä indusoimallaan kentillä (Furse & Haupt, 2001). Ilman johdin viidakoita voitaisiin välttyä huoltokustannuksilta ja pitää useampi lentokone toimintakykyisenä. Modulaarisen rakenteen avulla vikaantuneiden toimilaitteiden vaihtaminen olisi nopeampaa ja helpompaa, sillä sähkötöitä liittimien kanssa ei tarvittaisi. Huoltojen ollessa halvempia, niitä voitaisiin myös suorittaa tiheämmin ja taata lennon turvallisuus. Modulaarinen rakenne avaisi uusia ovia myös lentokoneen arkkitehtuurille. Joustavuus suunnittelussa voisi mahdollistaa erityyppisten uusien mallien, kuten sulautettusiiپی-lentokoneiden, kokeilun.

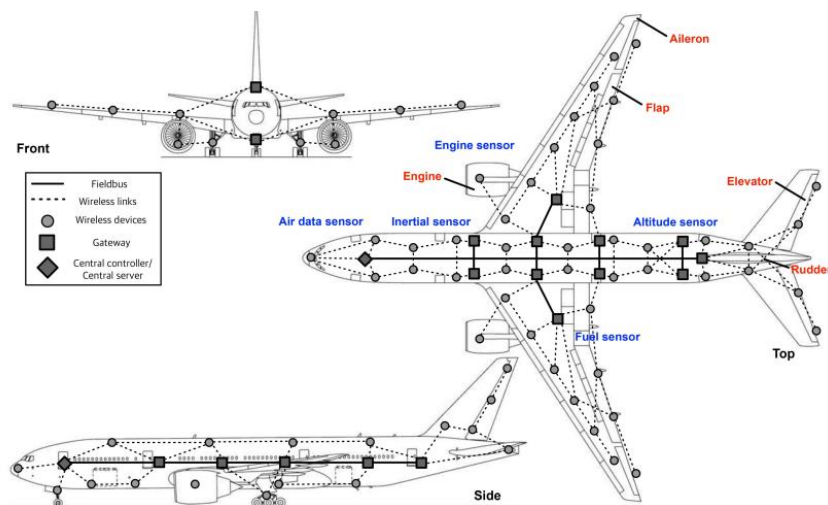
### 5.2 Tekniikan puutteita ja kehityskohtia kohti langatonta järjestelmää

Ongelmana on teknologian standardoimattomuus. UWB teknologia olisi sopiva tiedonsiirtokeino ilmailun ympäristöön, mutta se vaatii laajan lähetykskaistan ja saattaa siten häiritä muita laitteita ilma-aluksessa. Mikäli matkustajalentokoneen muut järjestelmät



pystyttäisiin suojaamaan UWB-lähetykseltä tai lähetys saataisiin rajattua hieman kaapeammalle alueelle ja pidettyä tiedonsiirtonopeus tarvittavissa rajoissa, järjestelmä voisi olla toteutettavissa. Dwivedin et al. (2020) tutkimuksessa testattiin UWB-teknologiaa matalan tiedonsiirron vaatimuksiin matkustamon sisällä. Tässä tutkimuksessa käytettiin WAIC standardeihin suodatettua kaistanleveyttä, ja sillä päästiin vain 100kbps nopeuteen. Tämä nopeus riitti kyseisen tutkimuksen vaatimuksiin matkustamon valojen ohjaukseen, mutta se ei ole läheskään tarpeeksi lennonohjausjärjestelmän tarpeisiin. Kaistan kaventaminen vaatisi siis merkittävästi reitittimien välimatkojen lyhentämistä tai lähetystehon kasvattamista, mikä taas aiheuttaa samat ongelmat kuin sähköjohtimet, joista pyritään eroon. Yhtenä vaihtoehtona voisi olla lähetysten suuntaaminen. Muut tutkielmassa mainitut teknologiat eli IEEE 802.11 ja Bluetooth eivät takaa tarpeeksi determinististä lähetystapaa ja tarpeeksi hyvää suojaa ulkoisia häiriöitä vastaan.

Mahdollisia hybridiratkaisuja on mietitty Parkin et al. (2021) tutkielmassa ja näillä voitaisiin edetä lähemmäs langattoman tiedonsiirron hyödyntämistä. Tällainen arkkitehtuuri on esitetty kuvassa 4. Tässä vaihtoehdossa runkoverkko olisi toteutettu langallisesti ja yhteydet alijärjestelmiltä sensoreille ja toimilaitteille langattomasti. Hybridiratkaisu vaatisi vielä tutkimusta ja kokeiluja, sillä se on vielä konseptitasolla.



**Kuva 4.** Konseptuaalinen hybridiarkkitehtuuri ohjausjärjestelmälle (Park et al. 2021)

Usein uudet teknologiat kehitetään ensin sotilaskäyttöön, ja vasta sen jälkeen niitä implementoidaan siviilikäyttöön. Näin kävi myös ensimmäisen FBW-järjestelmän kanssa. Ensimmäinen täysin digitaalinen FBW-järjestelmä otettiin käyttöön F-16 hävittäjässä ja vasta yli kymmenen vuotta myöhemmin ensimmäisen kerran A320 matkustajalentokoneessa (Tooley 2013). On hyvin todennäköistä, että suuret sotilasteknologian valmistajat ovat kehittäneet Fly-By-Wireless järjestelmää jo hyvin pitkälle, mutta näiden tutkimusten tulokset pysyvät salassa siviiliyleisöltä.

## 6. YHTEENVETO

Ideana Fly-By-Wireless on hyvä ja valmiille ratkaisulle on löydettävissä paljon etuja. Taloudelliset ja ympäristölliset säästöt voisivat olla merkittävät. Käytännön toteutuksessa on kuitenkin vielä paljon tutkittavaa. Tällä hetkellä langattomien yhteyksien tutkimukset keskittyvät ei-aikakriittisiin järjestelmiin.

Tässä tekstissä tutkittiin FBW-järjestelmän tiedonsiirtoväyliä ja niihin verraten mietittiin langattomia tiedonsiirtokeinoja lennonohjausjärjestelmää varten. UWB-teknologia esiintyy lupaavimpana vaihtoehtona perinteisten Wi-fi:n ja Bluetooth:n rinnalla. UWB:n isoimmat edut ovat ulkoisten häiriöiden sieto ja lähetyksen nopeus. Kuitenkin viranomaisten säätämät taajuuksienkäyttörajoitteet WAIC-järjestelmille estävät UWB-teknologian käytön sen koko mahdollisella taajuuskaistalla, mikä laskee sen lähetyksenopeutta merkittävästi. IEEE 802.11 sekä Bluetooth kärsivät signaalin heikkenemisestä, eivätkä takaa tarpeeksi determinististä käytöstä järjestelmälle. Nämä teknologiat ovat kuitenkin ideaali tilanteessa tarpeeksi nopeita ja tarkkoja koneiden ohjaukseen. Mahdolliset miehittämättömien ilma-alusten ohjaukset tai matkustajakoneiden vähemmän tärkeät järjestelmät voitaisiin toteuttaa Wi-fi:n tai Bluetooth:n avulla.

Tutkimusta on tehtävä vielä muun muassa radiolähetyksen resonoinnista lentokoneen rakenteissa, vaikka UWB esiintyykin tässä hyvänä vaihtoehtona. Myös UWB-lähetyksen sovelluksesta muiden langattomien laitteiden läheisyydessä tulisi tutkia. UWB-teknologia on jatkuvassa kehityksessä esimerkiksi usean matkapuhelINVALMISTAJAN tutkimuksen alla. Teknologian kehittyessä tulevana vuosina on hyvin mahdollista, että isot kehityshankkeet saavat alkunsa ja sitä aletaan soveltaa enemmän ilmailun piiriin.

## LÄHTEET

Aglargoz A. & Spangenberg H. 2014 "Safety and reliability analysis of wireless data communication concepts for flight control systems," IEEE/AIAA 33rd Digital Avionics Systems Conference (DASC), Colorado Springs, CO, USA, pp. 2E2–1–2E2–12.

Akram R. N. et al. 2015 "Challenges of security and trust in Avionics Wireless Networks," 2015 IEEE/AIAA 34th Digital Avionics Systems Conference (DASC), Prague, Czech Republic.

Aviationpros, 2008, "Gulfstream Demonstrates Fly-by-wireless Aircraft Control System", saatavilla(viitattu 19.3.2023): <https://www.aviationpros.com/home/press-release/10403052/gulfstream-demonstrates-flybywireless-aircraft-control-system>.

Chowdhury, Tonoy & Linda, Rewzana & Garg, Atul, 2013, "Evolution of Flight Control System & Fly-By-Light Control System", International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering (IJETA); ISSN 2250–2459, ISO 9001:2008 Certified Journal. Volume 3.

Coelho T. E. et al. "A Fly-By-Wireless UAV Platform Based on a Flexible and Distributed System Architecture," 2006 IEEE International Conference on Industrial Technology, Mumbai, India, 2006, pp. 2359–2364.

Dang D., Mifdaoui A. & Gayraud T. 2012, "Fly-By-Wireless for next generation aircraft: Challenges and potential solutions," 2012 IFIP Wireless Days, Dublin, Ireland, pp. 1–8.

Dwivedi A., Zoppi S., Kellerer W., Neubauer F. & Schupke D. "Wireless Avionics Intra-Communication (WAIC) QoS Measurements of an Ultra-Wideband (UWB) Device for Low-Data Rate Transmissions," 2020 AIAA/IEEE 39th Digital Avionics Systems Conference (DASC), San Antonio, TX, USA, 2020, pp. 1–10.

Flight Safety Foundation Editorial Staff, 2005, "Aircraft wiring incidents persist in aging systems", Avionics News, pp. 41–43.

Furse, C. & Haupt, R. 2001, "Down to the wire [aircraft wiring]," in IEEE Spectrum, vol. 38, no. 2, pp. 34–39.

Hoffren, J. & Saarela, O. 2008, Lentotekniikan perusteet. Helsinki: Opetushallitus.

ITU-R, 2015 "Final acts WRC-15 – World Radiocommunication Conference" Geneve, s. 320–321, saatavilla(viitattu 15.3.2023): [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/act/R-ACT-WRC.12-2015-PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/act/R-ACT-WRC.12-2015-PDF-E.pdf).

- Park P., Di Marco P., Nah J. & Fischione C., 2021 "Wireless Avionics Intracommunications: A Survey of Benefits, Challenges, and Solutions", IEEE Internet of Things Journal, vol.8, no.10, pp.7745–7767.
- Rondon R., Gidlund M. & Landernäs K., 2017, "Evaluating Bluetooth Low Energy Suitability for Time-Critical Industrial IoT Applications" International Journal of Wireless Information Networks. 24. pp. 1–13.
- Sampigethaya K., Poovendran R. & Bushnell L. 2008 "Secure Operation, Control, and Maintenance of Future E-Enabled Airplanes," in Proceedings of the IEEE, vol. 96, no. 12, pp. 1992–2007.
- Tooley M. H. 2013 Aircraft digital electronic and computer systems. 2nd ed. [Online]. Abingdon, Oxon, Routledge.
- Ultra-Wideband for Your Fastest Computing Experience. 2013. Saatavilla(Viitattu 19.3.2023): <https://alok30m.wordpress.com/2013/12/29/> .
- Willig A., Matheus K. & Wolisz A. 2005, "Wireless Technology in Industrial Networks." Proceedings of the IEEE.
- Zahmati A. S., Fernando X. & Kojori H. 2011, "Emerging wireless applications in aerospace: Benefits, challenges, and existing methods," 4th Annual Caneus Fly by Wireless Workshop, Montreal, Canada, pp. 1–4.