



TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN TOIMIALA

Tietotekniikka

Tietoliikennetekniikka

INSINÖÖRITYÖ

IRIS-JÄRJESTELMÄN SUORITUSKYKY FORMULA-TYYPPISEN KILPA-AUTON TELEMETRIARATKAISUNA

**Työn tekijä: Joni Himanen
Työn valvoja: Lehtori Timo Kasurinen**

Työ hyväksytty: 14.11. 2008

**Timo Kasurinen
lehtori**



ALKULAUSE

Tämä insinöörityö on tehty Helsingin ammattikorkeakoulu Stadialle, nykyiselle ammattikorkeakoulu Metropolialle. Kiitän työni valvojaa lehtori Timo Kasurista työn ammattitaitoisesta ohjauksesta. Erityis kiitoksen haluan esittää Stadia Formula Engineering Teamille ja etenkin Mikko Aholalle avoimesta suhtautumisesta ja arvokkaasta tiedonjaosta tämän insinöörityön eteen.

Helsingissä 14.11.2008

Joni Himanen

INSINÖÖRITYÖN TIIVISTELMÄ

Tekijä: Joni Himanen	
Työn nimi: IRIS-järjestelmän suorituskyky formula-tyyppisen kilpa-auton telmetriaratkaisuna	
Päivämäärä: 14.11.2008	Sivumäärä: 35 s. + 3 liitettä
Koulutusohjelma: Tietotekniikka	Suuntautumisvaihtoehto: Tietoliikennetekniikka
Työn valvoja: lehtori Timo Kasurinen	
Työn ohjaaja: lehtori Timo Kasurinen	
<p>Tämä insinöörityö käsittelee formula-tyyppisen kilpa-auton telmetriaratkaisuja. Työn tavoitteena on tutkia, voiko kaupallinen valvontajärjestelmä IRIS (Industry Resource Internet Supervision) toimia kilpa-auton langattomana tiedonsiirtojärjestelmänä.</p> <p>Työn vertailukohtana käytetään Stadian Formula Engineering Teamin rakentamaa HPF008-kilpa-autoa sekä HPF008:n nykyistä Bluetooth-tekniikkaan perustuvaa telemetriaratkaisua. Työssä pyritään tarkasti kartoittamaan ympäristö, jossa järjestelmät toimivat sekä vertaamaan järjestelmien suorituskykyä puolueettomassa ympäristössä.</p> <p>Suoritetuilla testeillä pyrittiin testaamaan järjestelmien avainominaisuuksia toimintaympäristössään. Nämä testit sisältävät mittaukset kantamalle, tiedonsiirtonopeudelle ja yhteyskatkosta palautumisen viipeelle. Lisäksi arvioitiin järjestelmien yleistä soveltuvuutta tutkimalla kestävyyttä, asennettavuutta ja liitettävyyttä.</p> <p>Järjestelmän tärkein ominaisuus on sen luotettavuus, joka koostuu kaikista testatuista ominaisuuksista, joten yksittäisille testeille ei asetettu painoarvoja. Kvantitatiivisten tulosten saaminen suoritetuista testeistä osoittautui vaikeaksi. Tutkimuksen lopputuloksena voidaan kiistatta pitää IRIS-järjestelmän soveltumattomuutta testattuun ympäristöön. Nykyinen HPF008:n telemetrijärjestelmä ei kuitenkaan ole optimaalinen ratkaisu langattomaan tiedonsiirtoon ratakilpa-autourheilussa.</p>	
Avainsanat: telemetria, etämittaus, langaton tiedonsiirto, FSK, ECU, HPF008, Formula Student, IRIS	

ABSTRACT

Name: Joni Himanen	
Title: Performance of an IRIS-system as a telemetry solution for formula-type racing car.	
Date: 14.11.2008	Number of pages: 35 pages + 3 attachments
Department: Computer Science	Study Programme: Telecommunications
Instructor: lecturer Timo Kasurinen	
Supervisor: lecturer Timo Kasurinen	
<p>This graduate study consists of a telemetry solution of a formula-type racing car. The aim of the study was to research whether a commercial surveillance system IRIS (Industry Resource Internet Supervision) could work as a wireless telemetry solution for a racing car.</p> <p>The baseline for the study was the HPF008 formula car and the Bluetooth-based telemetry system built for the HPF008 by the Stadia Formula Engineering team. The characteristic of the working environment was first mapped and then the systems tested in respect to these characteristics.</p> <p>The tests were designed to benchmark the key properties of the systems in the operational environment. These tests included measurements for range, transmission rate and reconnect delay caused by a sudden drop of connection. Moreover, the overall applicability was studied by examining the durability, mounting and connectivity of the systems.</p> <p>The key property of the system is its reliability, which consists of all the tested properties. Therefore, no weighting was applied to the tests. Obtaining results from the quantitative tests was proved to be difficult. Nevertheless, the conclusion of the study can be stated as undisputed: The IRIS system can not be recommended for the tested environment. However, the current telemetry system of HPF008 was also proved to be imperfect solution for a wireless data transfer in car race environment.</p>	
Keywords: telemetry, remote metering, wireless data transfer, FSK, ECU, HPF008, Formula Student, IRIS	

ALKULAUSE

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYS

LYHENTEET JA KÄSITTEET

1	JOHDANTO	1
2	LANGATON TIEDONSIIRTO	2
2.1	Historia	2
2.2	Langattoman tiedonsiirron haasteet	2
2.2.1	<i>Yhteystien vaimennus</i>	2
2.2.2	<i>Kohina</i>	4
2.2.3	<i>Radiotaajuusspektrin jakaminen</i>	4
2.2.4	<i>Doppler-ilmio</i>	7
2.3	Langattoman tiedonsiirron tehostaminen	9
2.3.1	<i>Kanavakoodaus</i>	9
2.3.2	<i>Linjakoodaus</i>	10
2.3.3	<i>Antennitekniikka</i>	11
2.4	Tietoliikenne autourheilussa	12
2.4.1	<i>Tiedonkeruu</i>	12
2.4.2	<i>ECU – Engine Control Unit</i>	12
2.4.3	<i>Telemetry</i>	13
2.4.4	<i>Säännöstö</i>	14
3	LANGATTOMAN YHTEYDEN VAATIMUKSET	15
4	NYKYINEN TELEMETRIAJÄRJESTELMÄ HPF008:SSÄ	17
5	IRIS-JÄRJESTELMÄ	19
5.1	Yleiskuvaus	19
5.2	Järjestelmän osat	20
5.3	Radiolähetin-vastaanotin	21
5.4	Järjestelmän konfigurointi	22
5.5	IRIS Starter Kit	24
6	TESTAUS	25
6.1	Yleiskuvaus tutkimuksen testeistä	25
6.2	Testiympäristön kuvaus	25

6.3	Suoritetut testit	27
6.3.1	<i>Uudelleenyhdistyvyys</i>	27
6.3.2	<i>Kantama</i>	27
6.3.3	<i>Tiedonsiirtonopeus</i>	28
6.3.4	<i>Kestävyys, asennettavuus, liitettävyys</i>	29
7	TESTIEN TULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI	32
8	TUTKIMUKSEN LOPPUTULOS	34
	VIITELUETTELO	35

LYHENTEET JA KÄSITTEET

CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor. Mikropiiriteknikka, joka perustuu kanavatransistoreidenkäyttöön.
CRC	Cyclic Redundancy Check. Virheentarkistusalgoritmi datasiirrossa.
ECU	Engine Control Unit. Moottorinohjausyksikkö, jolla tarkkaillaan ja ohjataan polttomoottorin eri osa-alueita, kuten polttoainesyöttöä, sytytystä, eri lämpötiloja sekä kierrosnopeuksia reaaliaikaisesti.
ETSI	European Telecommunications Standards Institute. Vuonna 1988 perustettu riippumaton Euroopan telealan standardointijärjestö.
FSK	Frequency Shift Keying eli vaihtotaajuusavainnus on digitaaliseen tiedonsiirtoon tarkoitettu taajuusmodulointitekniikka.
ISI	Inter-Symbol Interference. Digitaalisella siirtotiellä tapahtuva häiriö, jossa peräkkäiset symbolit häiritsevät toisiaan.
LOS	Line-Of-Sight. Esteettömän radiotie-etenemisen määrite.
NLOS	Non-Line-Of-Sight. Fyysisiä esteitä sisältävän radiotien määrite.
RS-232	Recommended Standard 232. Yleinen sarjamuotoisen datasiirron standardi. Signaalin tasot ovat tyypillisesti +/- 12 V, mutta kaikki itseisarvoltaan alle 25 V tasot ovat hyväksytyjä.
SNR	Signal-to-Noise ratio eli signaalikohinasuhde ilmaisee hyötysignaalin voimakkuutta vallitsevaan häiriöön. Ilmoitetaan tyypillisesti desibeleinä.
TTL	Transistor-to-Transistor Logic.

1 JOHDANTO

Tämä insinööri työ käsittelee langatonta tiedonsiirtoa kilpa-auton ja varikon välillä. Työssä tutkitaan myös langattomaan tiedonsiirtoon perustuvan IRIS-järjestelmän soveltuvuutta kilpa-autourheilun tarpeisiin.

Etämittaus, eli telemetria, on nykykilpamoottoriturheilussa erittäin keskeisessä roolissa. Kilpailun tai harjoittelun aikana lähetetyn tiedon määrä voi nousta hyvinkin suureksi. Insinöörit käyttävät tätä tietoa optimoidessaan kilpa-autoa joko reaaliaikaisesti käyttäen samaa tiedonkeruukanavan paluusuuntaa tai varikolla seuraavan mahdollisuuden tullen.

Työn vertailukohtana käytettiin Helsingin ammattikorkeakoulu Stadian Formula Engineering Teamin rakentaman HPF008-kilpa-auton nykyistä telemetriajärjestelmää. Formula-tyyppinen HPF008 on suunnattu vuoden 2008 Formula SAE/Student Racing Class -luokan kilpailuihin USA:ssa, Englannissa, Saksassa ja Alankomaissa.

Tämän insinööri työn vaiheet etenevät seuraavasti: kappaleissa 2 ja 3 esitetään ympäristö ja haasteet, joihin testattavien järjestelmien on sovittava, kappaleissa 4 ja 5 kuvataan nykyinen HPF008:n telemetriajärjestelmä ja haastajajärjestelmä IRIS, kappaleet 6 ja 7 kuvaavat testi ympäristön, suoritettut testit ja saadut tulokset ja kappaleessa 8 esitetään tutkimuksen lopputulos.

2 LANGATON TIEDONSIIRTO

2.1 Historia

Perustuen vuonna 1873 julkaistuihin ns. Maxwellin yhtälöihin Heinrich Hertz todisti vuonna 1888 ensimmäisenä maailmassa elektromagneettisten aaltojen olemassaolon synnyttämällä kipinän vastaanottimessa muutaman metrin päässä 600 MHz:n lähettimellään. Tätä alkeellista koetta pidetään langattoman tiedonsiirron syntyhetkenä. [1, s. 9]

Vuonna 1901 suoritettiin ensimmäinen langaton yhteys Atlantin yli italialaisen insinöörin Guillermo Marconin toimesta. Tästä eteenpäin kaupallinen kehitys kasvoi nopeasti ja langattomia järjestelmiä asennettiin paljon muun muassa valtamerialuksiin.

Nykyään langaton tiedonsiirto on arkipäivää ja kehitys viimeisen kymmenen vuoden aikana on ollut nopeaa. GSM-verkkojen ja langattomien lähiverkkojen valtava kasvu on siirtänyt suuren määrän langallista tiedonsiirtoa ilmaan. Tulevaisuuden haasteina ovatkin hyvin rajallisen ilmarajapinnan tehokas jakaminen sekä pienemmällä teholla parempaan suorituskykyyn pystyvien tekniikoiden kehittäminen. Ilmarajapinnan fyysisiä haasteita käsitellään seuraavassa kappaleessa.

2.2 Langattoman tiedonsiirron haasteet

2.2.1 Yhteystien vaimennus

Ilmarajapinta, kuten mikä tahansa muukin rajapinta, aiheuttaa vaimennusta lähetettyyn signaaliin. Niin kutsutun vapaantilan vaimennuksen tapauksessa, jossa lähetin ja vastaanotin ovat esteettömästi näköyhteydessä toisiinsa, voidaan radiotien aiheuttama vaimenema L laskea seuraavasta kaavasta, jossa l on lähettimen ja vastaanottimen välinen etäisyys, λ lähetteen aallonpituus, f lähetteen taajuus sekä c valon nopeus tyhjiössä.

$$L = \left(\frac{4\pi l}{\lambda} \right)^2 = \left(\frac{4\pi f l}{c} \right)^2 \quad (1.)$$

Puhdas heikkeneminen on vain yksi tekijä signaalin vaimentumisessa. Suuret esteet kuten talot ja mäet aiheuttavat heijastumia signaaliin. Heijastumat aiheutuvat muuten tasaiseen siirtolinjaan tulevasta epäjatkuvuuskohdasta tai epäpuhtaudesta. Hyötysignaalin amplitudi heikkenee ja heijastunut aalto syntyy, kun signaali törmää epäjatkuvuuskohtaan.

Signaali voi myös siirtää kohdatessaan esteen tai tiheyden muutoksen matkalla lähettimestä vastaanottimeen. Sironnassa signaali muuttaa suuntaansa ja mahdollisesti energiaansa kohdatessaan esteen. Sironnan voimakkuus ja suunta riippuvat signaalin taajuudesta sekä kappaleen koosta ja muodosta.

Diffraktoituminen tapahtuu, signaalin kohdatessa sopivan raon, kiteen tai huonoimmassa tapauksessa vain sopivan kappaleen reunan. Vaikka diffraktiota tapahtuu aina, kun signaali törmää esteeseen, johtuen kiinteän aineen luonteesta, on ilmiö voimakkaimmillaan, kun esteen tai raon koko on suhteellinen saapuvan signaalin aallonpituuteen. Diffraktiossa signaali taipuu poiketen alkuperäisestä kulkusuunnasta.

Johtuen heijastumisesta, sironnasta ja diffraktiosta, lähetetty signaali kulkee monia eripituisia reittejä pitkin lähettimestä vastaanottimeen. Jokainen eripituisuista reittiä kulkenut signaali on hieman vaiheeltaan ja viipeeltään muuttunut kopio alkuperäisestä signaalista. Ilmiötä kutsutaan monitie-etenemiseksi. Ilmiöllä on kaksi haitallista vaikutusta: Interferenssi ja ISI (Inter-Symbol Interference) eli symbolien välinen keskinäisinterferenssi. Vastaanotettu signaali on siis aina summa eri reittejä kulkeneista signaaleista. Nämä signaalit voivat vahvistaa tai heikentää toisiaan. Ilmiöistä käytetään nimityksiä konstruktiiivinen ja destruktiiivinen interferenssi. ISI:ssä monitie-etenemisestä johtuen vastaanottimeen pidempää reittiä saapunut symboli menee päällekkäin myöhemmin lähetetyn symbolin kanssa. Toisin sanoen, signaali alkaa häiritä itseään. Ilmiötä voidaan parhaiten hallita lisäämällä vastaanottimen päähän ohjelmoitava ekvalisaattori. Ekvalisaattori korjaa vastaanotinta datan joukossa lähetetyn, ennalta tiedetyn sekvenssin perusteella adaptoitumalla ympäristön aiheuttamiin muutoksiin. [1, s.9-15]

2.2.2 Kohina

Signaalin tason heikentyminen voidaan vastaanottimen vahvistimien avulla korjata varsin yksinkertaisesti. Pelkkä heikentyminen ei siis tee signaalin havaitsemisesta vaikeaa. Suurimman haasteen tuovat ympäristön kohina ja muut häiriötekijät. Yhteyden tasoa tarkastellaan vertaamalla signaalin tehoa ympäristön kohinan tehoon vastaanottimessa. Tuloksena on signaalikohtainen suhde, Signal-to-Noise-Ratio eli SNR:

$$SNR = \frac{P_s}{P_n} \quad (2.)$$

Kohinaa aiheuttaa usea eri tekijä. Tunnettuja ilmiöitä ovat lämpökohina, ilmakehäkohina, avaruuskohina ja tekninen kohina. Oleellisimpia tämän tutkimuksen kannalta ovat lämpökohina sekä tekninen kohina. Lämpökohina aiheutuu hiukkasten lämpöliikkeestä, joka on suhteellinen vallitsevaan lämpötilaan. Lämpökohina on luonteeltaan valkoista, mikä tarkoittaa tehospekttrin jakautumista tasaisesti kaikille taajuuksille. Teknisellä kohinalla tarkoitetaan muiden laitteiden aiheuttamaa kohinaa. Tämä on oleellista tutkimuksen kannalta, sillä muun muassa auton sytytystulppien ja sähköisten kytkimien synnyttävät impulssiluonteista suurelle kaistanleveydelle vaikuttavaa kohinaa.

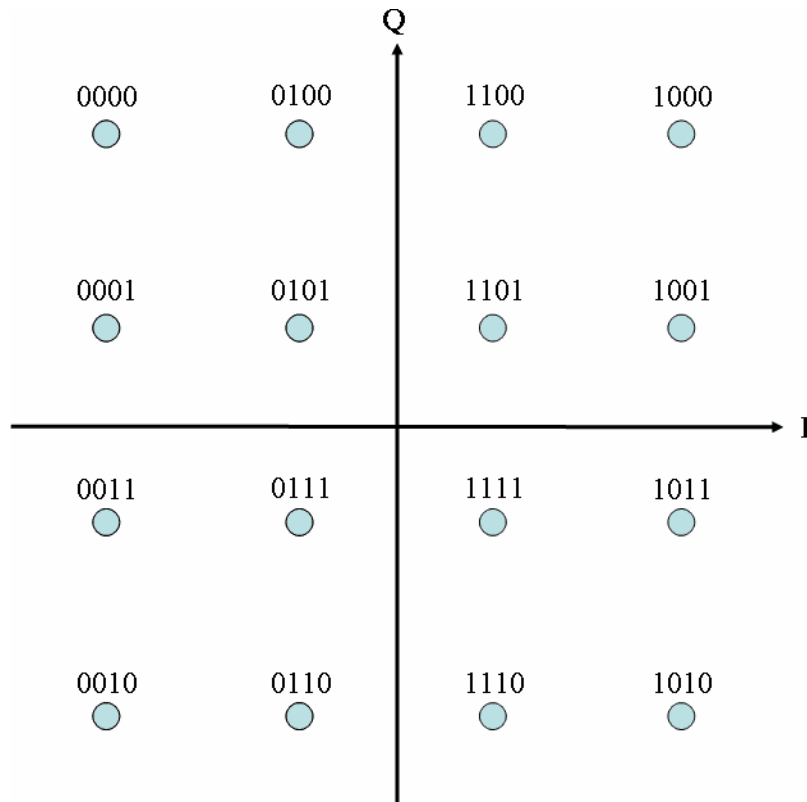
2.2.3 Radiotaajuusspektrin jakaminen

Sähkömagneettisen säteilyn taajuus on erittäin rajallinen luonnonvara, jonka käyttö on tiukasti säänneltyä. Samalla taajuudella toimivat lähettimet häiritsevät toinen toisiaan. Vertauksena voidaan ajatella ihmisiä täynnä oleva sali: kaikkien puhuessa yhtä aikaa on yhden tietyn ihmisen sanomaa vaikea tulkita. Radiotaajuuksia hallinnoidaan alueellisesti. Suomessa taajuusspektrin käyttöä hallinnoi Liikenne- ja viestintäministeriön alainen Viestintävirasto, joka asettaa yhteistyössä eurooppalaisten ETSI:n (European Telecommunications Standards Institute), CEPT:n (European Conference of Postal and Telecommunications Administrations) sekä kansainvälisen, YK:n alaisen, ITUn (International Telecommunication Union) kanssa säännöt radioliikenteelle Suomen alueella. [2]

Haluttu, tai useammissa tapauksissa sallittu taajuuskaista saadaan käyttöön moduloimalla alkuperäinen lähete. Lähes kaikki digitaalinen tieto on kuljetuksen aikana moduloitu, riippumatta siirtotiestä. Yksinkertaisin modulaatiomenetelmä on käytössä esimerkiksi lennättimessä, jossa yhtä kanta-aaltotaajuutta katkotaan ja vastaanottaja tulkitsee tauot ja lähetteet symboleiksi, eli tässä tapauksessa kirjaimiksi.

Analogisessa modulaatiossa alkuperäinen lähete moduloidaan jatkuvana virtana, jolloin alkuperäinen tieto on luettavissa milta kohtaa lähetettä tahansa. Esimerkkejä analogisesta moduloinnista ovat taajuusmodulointi FM ja amplitudimodulointi AM. Amplitudimodulaatiossa alkuperäinen viesti välitetään kanta-aallon voimakkuuden, eli amplitudin vaihteluna. Taajuusmodulaatiossa alkuperäinen viesti on luettavissa moduloidun lähetteen taajuuden vaihtelusta.

Digitaalisissa modulointitekniikoissa kanta-aalto on moduloitu digitaalisella symbolivirralla. Muutokset kanta-aallon vaiheessa, amplitudissa, taajuudessa tai näiden tietyissä yhdistelmissä tulkitaan vastaanottimessa eri symboleiksi. Tyypillisiä modulointitekniikoita digitaalisille lähetille ovat vaihtoamplitudiavainnus ASK, vaiheavainnus PSK sekä vaihtotaajuusavainnus FSK. Yhdistämällä vaihtoamplitudi- ja vaiheavainnus voidaan yhdellä kanta-aallon pulssilla määrittää useampi bitti kerrallaan. Tuloksena on kvadratuuriamplitudimodulaatio QAM, jossa vastaanotetusta läheteestä luetaan signaalin vaihe-ero ja amplitudi. Saadut arvot tulkitaan bittijonoiksi konstellaatiokuvasta. Kuva 1 esittää esimerkkitapausta 16-QAM-modulaatiosta, jossa Q-akselilla esitetään kvadratuurikomponentin arvo ja I-akselilla samanvaiheisen komponentin arvo.



Kuva 1. 16-QAM gray-koodattu konstellaatiokuvaaja.

Kuvassa 1 on havainnollistettu QAM-päätöksentekoprosessia. Q- ja I-komponentit muodostavat asteikolle leikkauspisteen, jonka mukaisesti tietty bittisarja tulkitaan halutuksi vastaanotetusta signaalista. Kuvan tapauksessa yhdellä signaalin arvolla voidaan vastaanottaa neljä bittiä. Kuvan esittämät bittiarvot ovat gray-koodattu konstellaatioon. Gray-koodauksella saavutettava etu havaitaan virhetulkinnan tapauksessa: vaikka vastaanotettu leikkauspiste tulkittaisiin viereiseen bittisarjaan, ei virhe ole koskaan yhtä bittiä suurempi. [3]

Moduloidessa sinimuotoinen kantaalto modulointisignaaliilla muodostuu uusi signaali kahdesta eri signaalista, joista toinen on samassa vaiheessa ja toinen $\pi/2$ radiaania alkuperäisen kantaaltosignaalin kanssa. Samassa vaiheessa olevaa komponenttia kutsutaan samanvaiheiseksi ja vaiheeltaan eroavaa komponenttia kvadratuurikomponentiksi. [4] Kaava 3 havainnollistaa samanvaiheisen ja kvadratuurikomponentin. $\sin[2\pi ft + \phi(t)]$ on sinimuotoinen kantaaltokomponentti, joka moduloidaan alkuperäisellä lähetteellä $A(t)$.

$$A(t) \sin[2\pi ft + \phi(t)] = I(t) \sin(2\pi ft) + Q(t) \cos(2\pi ft) \quad (3.)$$

2.2.4 Doppler-ilmiö

Doppler-ilmiöllä tarkoitetaan lähettäjän, vastaanottajan tai molempien liikkeestä aiheutuvaa siirtymää aallon taajuudessa ja siten myös aallonpituudessa. Lähettimen ja vastaanottimen liikkeessä suhteessa toisiaan kohden on vastaanotettu taajuus korkeampi kuin alun perin lähetetty taajuus. Vastaavasti lähettimen ja vastaanottimen suhteessa loitontuessa toisistaan on vastaanotettu taajuus alkuperäistä matalampi.

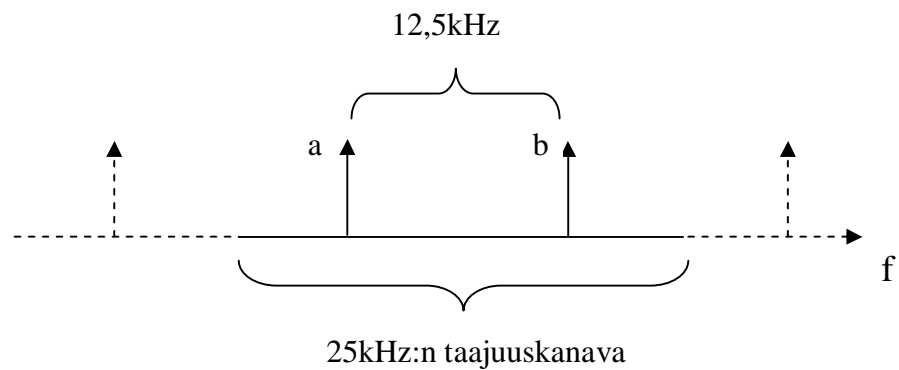
Tämän työn kohdalla on tärkeää selvittää, aiheuttaako kilpa-auto merkittävää taajuuden siirtymää, joka saattaisi aiheuttaa tiedonsiirtovirheitä ilmarajapinnassa. Doppler-siirtymä on laskettavissa seuraavalla kaavalla, jossa f_0 on alkuperäinen lähetettävä taajuus ja v lähetteen etenemisnopeus, v_v ja v_l vastaanottimen ja lähettimen nopeuksien toisiaan kohden olevat komponentit.

$$f = f_0 \frac{v + v_v}{v - v_l} \quad (4.)$$

Itse Doppler-siirtymä saadaan vähentämällä kaavalla 3 saatu uusi taajuus alkuperäisestä lähetetystä taajuudesta.

Kuten kappaleessa 2.2.3 on selitetty, tiedonsiirto missä tahansa mediassa on usein moduloitu halutulle taajuuskaistalle. IRIS-järjestelmä käyttää vaihtotaajuusavainnusta taajuusmodulointimenetelmää, jossa digitaalisen tiedon symbolit lähetetään jokainen omalla taajuudellaan 433 MHz taajuusalueella. IRIS-järjestelmä on jaettu 25 kHz:n taajuuskanaviin. Kaksitasoisessa vaihtotaajuusavainnuksessa yhdellä 25 kHz:n kanavalla on kaksi taajuutta käytettäville symboleille, toisin sanoen loogisille ykkösille ja nolille. Symbolitaajuudet sijoitetaan taajuuskaistalle tapauskohtaisesti jättäen kuitenkin suojataajuuden seuraavaan taajuuskaistaan. Oletetaan seuraavaksi tapaus, jossa taajuudet on sijoitettu mahdollisimman kauaksi toisistaan sekä seuraavaan taajuuskaistan symbolitaajuuksista. Tällä oletuksella voimme kaavan 3 avulla arvioida Doppler-siirtymän vaikutusta tiedonsiirtoon.

Kuvattua optimaalista tilannetta voidaan havainnollistaa seuraavalla kuvaajalla, jossa x-akselilla kuvataan taajuutta ja y-akselilla taajuuden suhteellista tehotiheyttä. Taajuudet a ja b kuvaavat binäärisymbolien taajuuksia radiotiellä.



Kuva 2. IRIS-järjestelmän taajuuskaistojen jakautuminen

Kuten kuvaajasta voidaan huomata, jää kahden binäärisymbolin taajuuksien väliin 12,5 kHz:n taajuuskaista, jolla vastaanotetut signaalit tulkitaan joko symboliksi a tai b. Käytännössä vaihtotaajuusavainnuksen taajuusvaste on hieman monimutkaisempi, mutta kuvaajan avulla voidaan arvioida, tarvitseeko doppler-siirtymää ottaa huomioon.

Vastaanottimen voidaan olettaa olevan täysin liikkumaton suunnitellussa ympäristössään. Käytännössä suurin nopeus, jonka Formula SAE –luokan kilpa-auto saavuttaa, on noin 120 km/h. [5] Käyttäen kaavaa 3 saadaan suurimmaksi Doppler-siirtymäksi noin 48 Hertziä. Tämä siirtymä voidaan suurilakin marginaaleilla jatkossa olettaa häviävän pieneksi.

HPF008:n nykyinen telemetrijärjestelmä perustuu Bluetooth-tekniikkaan, joka on moduloitu gaussisella vaihtotaajuusavainnuksella, GFSK:lla. GFSK käyttäytyy muutoin kuten tavallinen vaihtotaajuusavainnus, mutta moduloiva signaali kulkee gaussisen suodattimen läpi, jolloin sen taajuusvaste kapeenee. Toisin kuin IRIS-järjestelmän käyttämä protokolla, Bluetooth on avoin standardi, jonka kaikki ominaisuudet ovat kehittäjien toimesta mitattu.

Standardin julkaisusta [7] voidaan suoraan tarkistaa taajuuden maksimipoikkeama, joka on määritelty ± 75 kHz:n suuruiseksi. GFSK:n keskitaajuus saa poiketa maksimissaan 75 kHz kantoaallon taajuudesta. Käyttämällä kaavaa 3 saadaan ilmoitetussa 120 km/h –maksiminopeudessa taajuuden doppler-ilmion maksimipoikkeamaksi 267 Hz, joka voidaan myös jatkossa olettaa häviävän pieneksi suhteessa sallittuun 75 kHz:n poikkeamaan.

2.3 Langattoman tiedonsiirron tehostaminen

Vaikean ilmarajapinnan käyttöä voidaan tehostaa monin keinoin: kanava- ja linjakoodauksella, antenni- ja modulaatiotekniikoilla sekä virheenkorjauksella ja –tunnistamisella. Seuraavissa kappaleissa käydään läpi periaatteet näiden tekniikoiden toteuttamiseen. Modulaatiotekniikoista on kerrottu enemmän kappaleessa 2.2.4.

2.3.1 Kanavakoodaus

Kanavakoodauksella tarkoitetaan tyypillisesti toistokorjausta ja bittien lomittusta. Toistokorjauksessa läheteeseen lisätään ylimääräisiä bittejä, joiden avulla siirron aikana läheteeseen aiheutuneet virheet voidaan havaita ja korjata. Lisättävät bitit kaventavat hyötykuorman tiedonsiirtokaistaa, mutta vähentävät tarvetta tiedon uudelleenlähetykselle. Tehokkaimmillaan toistokorjaus on siten suhteellisen suurikaistaisilla ja pitkälatenssisilla yhteyksillä kuten satelliittiyhteyksissä, joissa pitkät välimatkat aiheuttavat väistämättä suuren viipeen signaaliin. Toistokorjausta käytetään kuitenkin lähes kaikissa tiedonsiirtoyhteyksissä sekä datatallenteissa.

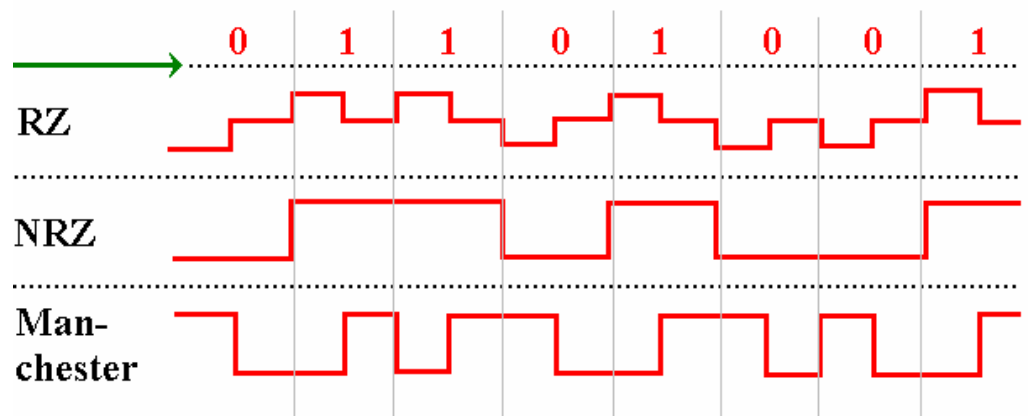
Toistokorjauksen ohella yksinkertaisempi tapa tiedonsiirron tehostamiseen on virheentunnistus. Tyypillisesti virheentunnistus toteutetaan kuten toistokorjauksessa lisäämällä bittejä läheteeseen. Lisätyt bitit ovat tarkiste lähetetylle datalle. Tarkisteeksi voidaan esimerkiksi määrittää lähetepurskeen bittien summa. Vastaanottimessa lähetteen bitit lasketaan yhteen ja verrataan tulosta vastaanotettuun tarkisteeseen.

Jos tulokset eriyvät, lähetetään uudelleenlähetysoyhteyksellä lähettäjälle. Tunnetuin virheentunnistusalgoritmi on CRC, Cyclic Redundancy Check, jossa lä-

hetteen tarkisteen muodostaa siirrettävän datan ja ennalta valitun polynomin jakojäännös. Suositettu CRC-algoritmi on CRC-16, jossa jakajapolynomi on kuvattu seuraavasti: $P(x) = x^{16} + x^{15} + x^2 + 1$. Toisin sanoen, 17 bittiä pitkän tarkisteen kaksi ensimmäistä, kolmanneksi viimeinen ja viimeinen bitti, ovat arvoltaan 1. Loput bitit ovat arvoltaan 0.

2.3.2 Linjakoodaus

Linjakoodauksella määritetään tiedon muoto siirtotiellä. Käytännössä linjakoodauksella määritetään fysikaaliset suureet digitaalisen tiedon lähettämiseksi tiettyä rajapintaa hyödyntäen. Toisin sanoen määritetään loogiset 1:t ja 0:t tietyiksi, tyypillisesti jännitearvoiksi. Muita tavoitteita linjakoodaukselle ovat epäsuotuisan tasavirtakomponentin poistaminen, kellopulsstinjohtaminen datavuosta ja pieni kaistanleveyden tarve.[8] Erilaisia linjakoodausmetodeja ovat muun muassa RZ Return to Zero, NRZ Non-Return to Zero, Manchester ja 2B1Q. Kuva 3 esittää erot RZ:n, NRZ:n ja Manchester-koodauksien välillä:



Kuva 3. RZ-, NRZ- ja Manchester -koodaustekniikoiden erot.

2.3.3 Antennitekniikka

Antennitekniikan oikealla valinnalla saavutetaan olosuhteisiin nähden paras kantama, vastaanottoherkkyys ja tehonkäyttö. Antennitekniikan valinnassa olennaisia tekijöitä ovat antennin tyyppi, käytettävissä oleva teho ja taajuusalue. Antennisuunnittelun lähtökohtana voidaan pitää antennin pituutta, jonka tulee tavallisessa maatasoantennissa olla vähintään $\frac{1}{4}$ käytettävän taajuusalueen aallonpituudesta. 433 MHz taajuusalueella pienin antennin pituus on siten noin 17 cm.

Antennin suunnittelu tiettyyn tarpeeseen on erittäin monimutkainen prosessi, jonka parametreina ovat muun muassa resonointitaajuus, impedanssi, vahvistus, apertuuri, polarisaatio ja kaistanleveys. Myös moniantennitekniikat ovat kehittyneet nopeasti. Langattoman verkon standardi 802.11n ottaa ensimmäistä kertaa itsessään huomioon moniantennitekniikan, jolla saavutetaan edeltäjiä huomattavasti suurempi tiedonsiirtonopeus ja pidempi kantama yhdellä tukiasemalla.

2.4 Tietoliikenne autourheilussa

2.4.1 Tiedonkeruu

Tiedonkeruun lähtöpisteenä on sensori, joka muuttaa fyysisen suureen sähköiseksi signaaliksi. Sähköinen signaali voi joko vaihdella ennaltamäärättyjen arvojen välillä tai saada minkä tahansa arvon odotetulla vaihteluvälillä. Jatkovaa signaalia, joka voi saada minkä tahansa arvon tietyllä vaihteluvälillä kutsutaan analogiseksi signaaliksi. Diskreettiä, ennalta määrättyjen arvojen välillä vaihtelevaa signaalia kutsutaan digitaaliseksi.

Sensorit, jotka käyttävät digitaalista signaalia, ovat esimerkiksi moottorin kierrosnopeus ja renkaiden pyörimisnopeudet. Kaikki muut sensorit, kuten potentiometrit ja lämpösensorit käyttävät analogisia signaalilähtöjä, joista haluttu tieto voidaan lukea niin tarkasti kuin on tarpeellista. Käytännössä nämä sensorit muuttavat mitatun suureen jännitteeksi, joka voidaan lukea jännitemittarilla.

Jotta tieto voitaisiin siirtää sensoreilta analysoinnin suorittavalle tietokoneelle, on kaikki tieto kuitenkin muunnettava digitaaliseen muotoon. Tyypillisesti muunnoksen tekee automaattisesti kilpa-auton tiedonkeruuyksikkö, josta kerrotaan seuraavassa kappaleessa.

2.4.2 ECU – Engine Control Unit

ECU on elektroninen hallintayksikkö, jolla hallitaan polttomoottorin eri toimintoja. Näitä toimintoja ovat muun muassa polttoaineensyöttö, sytytyksen ajastus, muuttuva venttiilin ajoitus sekä muiden oheislaitteiden hallinta. ECU kerää tietoa kilpa-auton eri sensoreilta ja joko muuttaa moottorin toimintaa keräämänsä tiedon mukaisesti tai lähettää kerätyn tiedon eteenpäin. Esimerkiksi suurempi kierrosluku voidaan asettaa automaattisesti muuttamaan polttoaineen koostumusta rikkaammaksi.

ECU sisältää liitännän tiedonsiirtoa varten, jolloin ECU:n keräämä tieto voidaan myös välittää reaaliaikaisesti esimerkiksi varikolle, jossa kerätty tieto voidaan analysoida ja hyödyntää kilpa-auton säätämässä joko seuraavalla varikkopysähdyksellä tai välittömästi hyödyntäen samaa tietoliikenneyhteyttä toiseen suuntaan. Tämän yhteyden toteuttaminen on tämän työn keskeisiä tavoitteita.

ECU:ssa on tyypillisesti RS-232-liitäntä tiedonsiirtoa varten. Tavallisesti tämä sarjamuotoinen yhteys toteutetaan kaapelilla, jonka maksimikantama on muutamia metrejä. Langaton yhteys varikolle tulisi siten suunnitella läpinäkyväksi sarjaliikennekaapelin jatkoksi. Läpinäkyvyydellä tarkoitetaan, ettei vastaanottavaan tai lähettävään järjestelmään tarvitse tehdä muutoksia, ja koko tietoliikenneyhteys vaikuttaa päätejärjestelmistä katsottuna yhdeltä kaapelilta.

2.4.3 *Telemetry*

Telemetrialla eli etämittauksella tarkoitetaan tekniikkaa, jonka avulla voidaan tarkkailla, kerätä ja analysoida tietoa etäkohteista. Telemetriaa käytetään muun muassa teollisuudessa, maataloudessa, lääketieteessä, meteorologiassa, lainvalvonnassa, sotilaskäytössä sekä moottoriurheilussa.

Yksisuuntaisella telemetrialla tarkoitetaan tiedonkeruuta kaukomitattavasta kohteesta. Etämitattavaa kohdetta tai mittauskalustoa ei siis voida tai saada hallita yhteyden yli. Kaksisuuntaisessa telemetriassa yhteyttä voidaan käyttää molempiin suuntiin: kerätyn tiedon perusteella voidaan esimerkiksi maataloudessa säädellä viljelyksen kastelujärjestelmää tai autourheilussa säätää moottorin lambda-arvoa kisan kuluessa varikolta käsin. Tämä keskittyy kaksisuuntaisen telemetriayhteyden toteuttamiseen IRIS-järjestelmällä.

2.4.4 Säännöstö

Kilpa-autosarjojen edelläkävijä Formula1 on rajoittanut telemetrian käytön yksisuuntaiseksi. Tämä tarkoittaa käytännössä tietoliikenteen tapahtuvaksi vain autosta varikolle, poikkeuksena radioyhteys kuljettajaan. Muissa kilpasarjoissa säännöt vaihtelevat suuresti. Formula SAE –sarjassa rajoitteita telemetrialle ei ole määrätty, mikä mahdollistaa auton moottorinohjauksen säätämisen sekä muiden komponenttien hallinnan kesken ajon.[9]

3 LANGATTOMAN YHTEYDEN VAATIMUKSET

Yhdistettävyys

Yhteyden nopea ja varma muodostuminen on elintärkeää lajin luonteelle. Mahdollisen häiriön, katveen tai kantaman riittämättömyyden aiheuttamasta yhteyskatkosta tulee selvitä nopeasti, ja ennen kaikkea automaattisesti. Yhteydenmuodostuksen tulisi olla selkeä ja yksinkertainen, jolloin yhdistymistä hidastavat toiminnot kuten kättelyrutiinit, mahdollinen parittaminen sekä reitittäminen täytyy voida kutistaa minimiin tai tapahtua lähes viipeettömästi.

Järjestelmän tulee myös olla helposti liitettävä nykyisiin järjestelmiin, toisin sanoen moottorinohjausyksikköön sekä analysointisovellusta pyörittävään päätteeseen. Tämä tarkoittaa käytännössä vaadetta läpinäkyvälle yhteydelle, jolloin kaikki radiotiehen vaikuttavat tekijät ovat lähetäville ja vastaanotaville päätelaitteille näkymättömiä.

Tiedonsiirtonopeus

Tarvittavan tiedonsiirtonopeuden voidaan olettaa olevan suhteellisen pieni. Käytännössä tiedonsiirtotarve muodostuu sensoreiden resoluutiosta ja niiden päivitysnopeudesta. Stadian HPF008-kilpa-auto tuottaa dataa n. 2 megabittia 10-15 minuutin rata-ajosta. [5] Maksimaaliseksi tiedonsiirtonopeudeksi voidaan täten laskea n. 3500 bittia sekunnissa. Käytännössä yhteyden läpäisykyvyn tulisi ylittää tämä raja-arvo, jotta mahdolliset purskemuotoiset läheteet saadaan luotettavasti siirrettyä.

Kantama

Katkeamattoman yhteyden takaamiseksi tulee verkon peittää koko radan alue. Radasta riippuen saattaa osa kilparadasta olla täysin katveessa varikolta tai vastaanottimesta. Käytännössä Formula SAE –luokan radat on järjestetty avoimille radoille, jolloin useiden lähetimien tai toistimien käyttö ei riittävän kantaman puitteissa ole välttämätöntä.

Sarjassa arvioidaan auton toteutusta kokonaisuutena, joten varsinainen kilpa-ajo on vain osa koko joukkueen suoritusta. Käytännössä tämä tarkoittaa suhteellisen pieniä ratoja, jolloin yli 300 metrin kantaman voidaan katsoa kattavan koko kilpailualue.

Kantaman yhteydessä tulee huomioida mahdolliset rajoitteet kisa-alueen taajuuksien ja lähetystehon käytössä. Käytettävä taajuus tulisikin olla niin sanotulta vapaalta tai mahdolliselta lajiliiton osoittamalta alueelta, jolloin vältetään toisten lähettimien häirintävaikutukselta.

Tietosuoja

Tiedon yksinkertaisesti toteuttava suojaus radiotiellä on tärkeää. Tietosuoja voidaan toteuttaa joko autentikoimalla tietty päätelaite toisen päätelaitteen tai keskitetyn palvelimen kanssa, jonka jälkeen päätelaite sallitaan käyttämään tiettyä mediaa, tässä tapauksessa radiotietä tai salaamalla, eli kryptaamalla viesti siten, että vain vastaanottaja ja lähettäjä tietävät avaimen, jolla kryptatusta läheteestä saadaan haluttu viesti purettua. Tehokkain suojaus saadaan hyödyntämällä molempia tekniikoita samanaikaisesti. Monet olemassa olevat järjestelmät kuten HPF008:ssä käytetty Bluetooth-tekniikka tarjoaa valmiiksi sisäänrakennetun salaus- ja autentikointipalvelut.

Asennettavuus

Järjestelmän asentaminen kilpa-auton tiiviiseen ympäristöön voi tuottaa haasteita: tilaa suurille päätteille tai lähetin-vastaanottimille ei ole. Lisäksi järjestelmän ulkoisen suojauksen tulee kestää rata-ajon aiheuttamia ympäristö-rasitteita kuten likaa, pölyä, vettä sekä tärinää ja G-voimien vaihteluita.

Järjestelmän virransaanti on järjestettävä kilpa-autossa akustosta, jolloin suuritehoiset tai verkkovirtalaitteet eivät sovellu käytettäväksi suunnitellussa ympäristössä.

4 NYKYINEN TELEMETRIAJÄRJESTELMÄ HPF008:SSÄ

Stadian HPF008-kilpa-auto hyödyntää kaksisuuntaista telemetriaa Tatech moottorinohjausjärjestelmän kautta. Free2Move RS232-Bluetooth –sovitin on kytketty moottorinohjausjärjestelmän sarjaliikenneporttiin. Lisäksi adapteri tarvitsee +5 V:n käyttöjännitteen, joka voidaan kytkeä ulkoisesti virtalähteellä tai kuten HPF008:ssa suoraan adapterin D9-liittimen nastaan 9. Vastaanottimen päässä on analysointiohjelmaa suorittavaan kannettavaan tietokoneeseen kytkettynä kuvassa esitetty Ezurio-merkkinen USB-liitäntäinen Bluetooth –sovitin.



Kuva 4. Vasemmalla kuvassa Free2Move RS-232 -Bluetooth-adapteri ja oikealla Ezurio Bluetooth –sovitin.

Molemmat sovittimet ovat pitkän kantaman Bluetooth-laitteita, joilla luvattu yhteys on n. 250 metriä. Järjestelmä toimii läpinäkyvänä, jolloin molemmista päistä lähetetty data siirtyy sellaisenaan toiseen päähän ilman ohjelma- tai ajurirajapintoja.

Bluetooth-tekniikka vaatii paritusprosessin toimiakseen. Free2Move-sovittimen mukana toimitettavalla ohjelmistolla paritetaan sovitin halutun laitteen kanssa. HPF008:ssa Free2Move on asetettu isännäksi, joka ottaa yhteyden analysointipään sovittimeen. Ratkaisun etuna on automaattinen yhteyden muodostus yhteyskatkon jälkeen. Bluetooth-tekniikan etuna on myös automaattinen autentikointi sekä tiedon salaust.

Järjestelmän vahvuus on yksinkertainen asennettavuus sekä suhteellisen suuri tiedonsiirtonopeus. Heikkouksina voidaan pitää Bluetooth paritusprosessia, joka automaattisenakin aiheuttaa viivettä yhteydenmuodostukseen kahdesta kolmeen sekuntia yhteyden palattua. Heikkoutena voidaan pitää myös tarkoitukseen lyhyttä kantamaa, joka ei radasta riippuen riitä kattamaan koko kilpailualueita.

Järjestelmä on mainittu hieman epäluotettavana [5], ja varikolta annettavia säätökäskyjä pyritään välttämään suurten nopeuksien aikana. Todennäköinen syy epävarmaan toimintaan suurilla auton nopeuksilla on suurehko tiedonsiirtonopeus ja lyhyt kantama, jotka aiheuttavat suuren virhetodennäköisyyden yhteyteen.

5 IRIS-JÄRJESTELMÄ

5.1 Yleiskuvaus

IRIS on lyhenne sanoista Industry Resource Internet Supervision. IRIS järjestelmä on kehitetty turvalliseksi ja kustannustehokkaaksi tavaksi valvoa useita teollisia kohteita yhtäaikaaisesti. IRIS-järjestelmä koostuu joukosta puurakenteessa olevista IRIS-yksiköistä, jotka ovat kytkettyinä toisiinsa radioteitse.

Järjestelmän eri yksiköillä on erilaisia toimintoja. Näitä toimintoja ovat mm. analogiset ja digitaaliset syötteet, digitaaliset lähteet, ajastimet ja laskurit. Yksinkertaisimmillaan järjestelmän radiotie on läpinäkyvä: IRIS-yksikkö vastaanottaa tietoa ulkoisista syötteistä ja lähettää tiedon muuttumattomana radiotien yli toiseen IRIS-yksikköön ja edelleen toiseen ulkoiseen laitteeseen.

IRIS Base -yksikkö on IRIS-järjestelmän perusrakennuskappale, jossa on radiotierajapinnan lisäksi liitännät syötteille, lähteille sekä nollaukselle. Yksikön lähettimeen kytketään 50 ohmin dipoliantenni, jolla saavutetaan korkeimmalla 10 mW lähetysteholla yli kilometrin kantama.

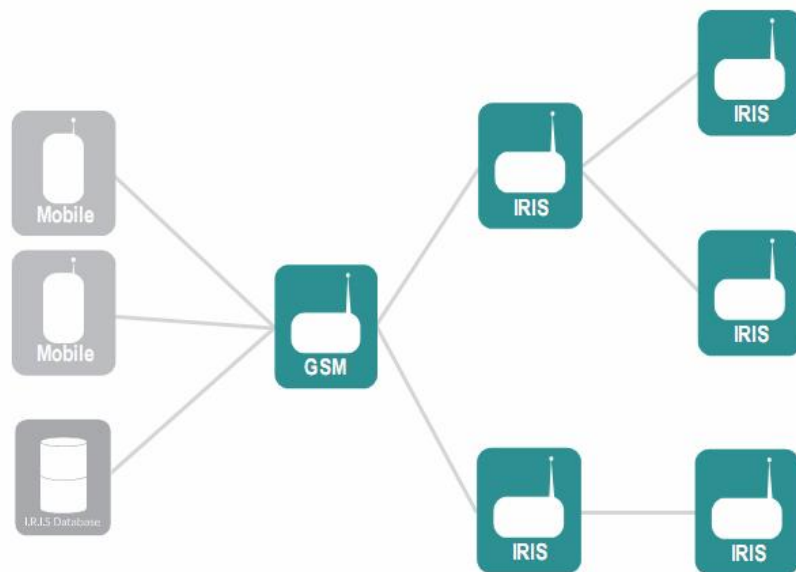


Kuva 5. IRIS Base -yksikkö

Järjestelmässä olevat laitteet voidaan ohjelmoida toimimaan toistimena, jolloin langattoman yhteyden kantamaan voidaan kasvattaa käytännössä loputtomasti. Jokaiselle laitteelle ilmoitetaan puussa ylempänä ja alempana olevat laitteet sekä halutaanko, että kyseinen järjestelmän osa toimii toistimena.

5.2 Järjestelmän osat

Järjestelmän perusyksikkö on IRIS Base, jolla voidaan toteuttaa kaikki yleiskuvauksessa mainitut toiminnot, mukaan lukien puhtaana toistimena toimiminen. IRIS-järjestelmään voidaan kytkeä myös GSM-, WEB-, RS-232 ja RS-485-moduuleja, joiden yhteinen tekijä on samaan IRIS-radioverkkoon kytkeytyminen. Kuvassa 2 on kuvattu IRIS Base –yksikön yksinkertainen rakenne. Ilman antennia yksikön koko on 42 x 52 mm.



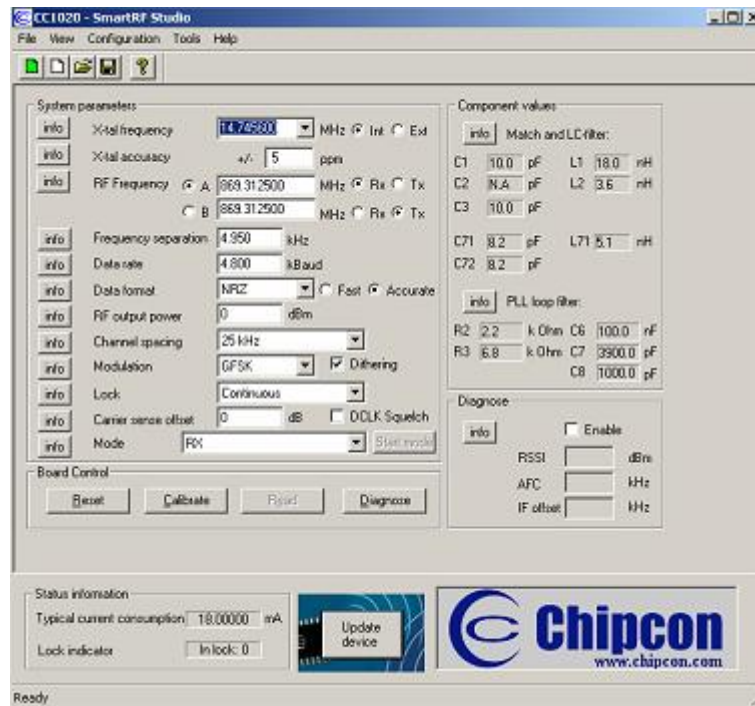
Kuva 6. Havainnekuva eri IRIS-yksiköistä toimimassa yhdessä IRIS-verkossa.

5.3 Radiolähetin-vastaanotin

IRIS-järjestelmän radiopiiri on toteutettu nykyisin Texas Instrumentsin omistaman Chipconin CC1020 matalatehoisella RF-lähetin-vastaanotin-monoliittipiirillä. Piiri on monipuolinen ja suunnattu kapeakaistaisille ISM-järjestelmille (Industry, Scientific, Medical). Piiriltä on valittu käyttöön FSK-modulaatio ja 4800 bps datansiirtonopeus. IRIS-järjestelmä toimii 433 MHz taajuusalueella ja valittavana on 69 ennalta määrättyä taajuuskaistaa 25 kHz:n välein. Alhaisella datansiirtonopeudella saavutetaan yhden kilometrin maksimikantama optimimiolosuhteissa, mikä sopii suurta läpäisyä paremmin teollisen valvonnan tarpeisiin.

CC1020-monoliittipiiri on suunniteltu kapeakaistaisten järjestelmien radiolähetin-vastaanottimeksi. Tuetut taajuusalueet ovat 402-470 MHz ja 802-940 MHz. Vastaanottimen -121 dBm:n herkkyys mahdollistaa hyvin pienten lähetystehojen käytön. Tuettuja modulaatiotekniikoita ovat vaihtoamplitudiavainnus ASK, vaihtotaajuusavainnus FSK, sekä gaussinen vaihtotaajuusavainnus GFSK. CC1020:n tukemat linjakoodaustekniikat ovat Non-Return-to-Zero NRZ tai Manchester-koodaus. Kanavakoodaus on suoritettava erillisellä piirillä ennen CC1020:n suorittamia operaatioita. Tyypillisessä järjestelmäsovelluksessa CC1020-piiriä käytetään yhteistyössä juuri mikrokontrollerin kanssa, jolloin mikrokontrolleri hoitaa lähetteen kanavakoodauksen ja CC1020-piiri linjakoodauksen sekä modulaation.

CC1020-piiriä, kuten IRIS-järjestelmääkin, voidaan konfiguroida graafisella käyttöliittymällä, jolla voidaan määrittää muun muassa lähetysteho, lähetystaajuudet sekä modulointi- ja linjatekniikat. Kuva 7 havainnollistaa Chipcon CC1020 -piirin graafista konfigurointisovellusta.



Kuva 7. CC1020-piirin konfigurointiohjelma.

5.4 Järjestelmän konfigurointi

IRIS-järjestelmän konfigurointi perustuu toiminteisiin, jotka tietty tapahtuma IRIS-järjestelmässä laukaisee.

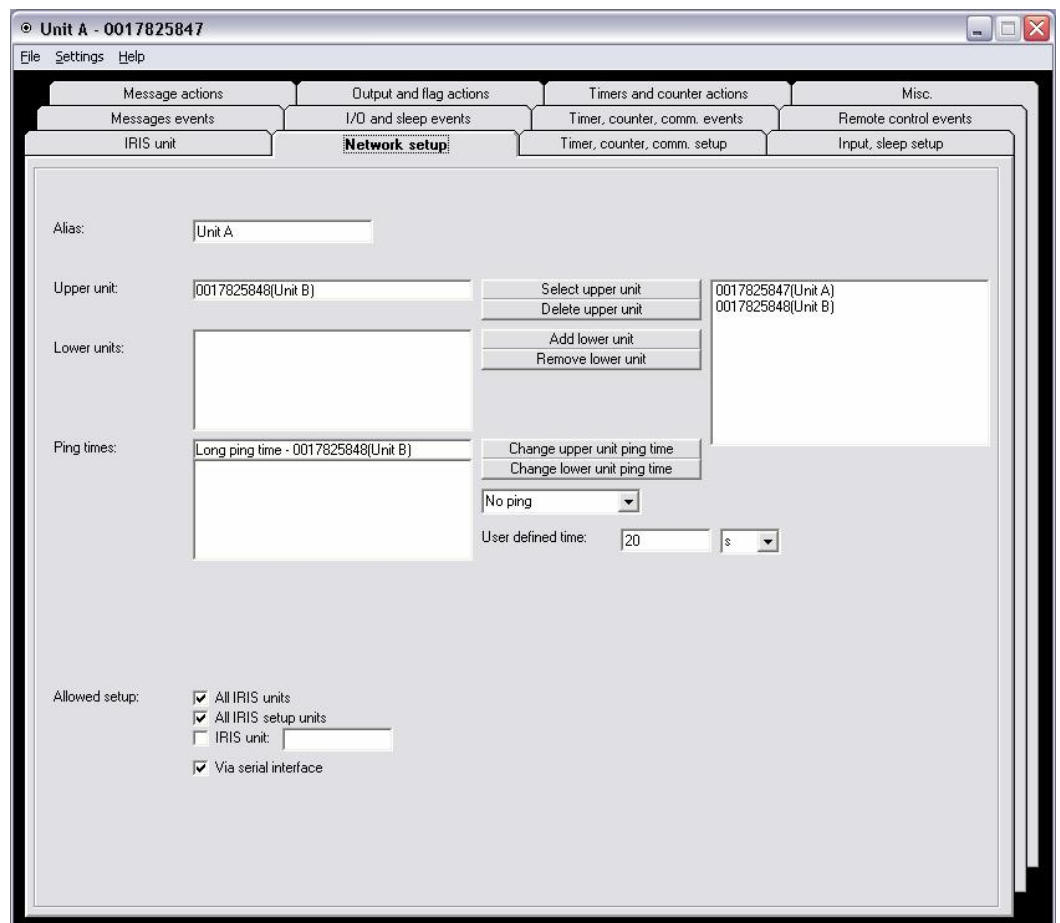
Näitä tapahtumia voivat olla:

- digitaalisten syötteiden tilojen muutokset, yksi portti tai peitetekniikalla useiden yhdistelmä.
- analogisen syötteen raja-arvon ylitys tai alitus
- verkkotapahtumat: yksikön liittyminen verkkoon tai sieltä poistuminen
- laskurin raja-arvon kohtaaminen
- ajastimen aikarajan kohtaaminen
- radioteitse tai sarjayhteydellä välitetty ennaltamääritely komento.

Toiminteita, joita yksi tai useampi edellä mainituista tapahtumista voidaan asettaa aktivoimaan ovat:

- lokaalin tai toisen yksikön digitaalisten syötteen tilan muutos
- viestin lähettäminen sarjaporttiin tai radioteitse tietylle yksikölle
- laskurin arvon muuttaminen
- ajastimen käynnistys, pysäytys tai nollaus.

Järjestelmän konfigurointi tapahtuu IRIS Configuration –ohjelmalla, jossa halutut muutokset määritetään graafisesti ja lähetetään halutulle yksikölle sarjayhteydellä tai radioteitse.



Kuva 8. IRIS Configuration –ohjelman ulkoasu.

5.5 IRIS Starter Kit

Tutkimuksessa käytettiin yhtä IRIS Starter Kit -sarjaa, johon sisältyvät seuraavat järjestelmän osat:

- 2 kpl IRIS Base
- 2 kpl antenni
- 2 kpl Evaluation Board
- 2 kpl sarja-kaapeli
- 2 kpl virtalähde AC/DC muuntimella
- 1 kpl ohjelmisto-CD.

Evaluation Board on suunniteltu tavaksi testata IRIS-järjestelmän ominaisuuksia ja toimivuutta käytännössä. IRIS Base -yksikkö on kiinnitetty Evaluation boardiin 28-jalkaisella liittimellä. Evaluation Boardiin voidaan kytkeä virtaliitin, sarjakaapeli sekä analogiset ja digitaaliset syötteet kaapelein. Levyllä on myös kuusi painiketta sekä vastaavat led-valot, joilla voidaan suorittaa testejä sekä paikallisesti että radiotien yli.

Kuva 7 esittää Evaluation Boardiin kytkettyä IRIS Base -yksikköä, jotka yhdessä muodostavat IRIS Starter Kitin toisen lähetin-vastaanotinjärjestelmän. Kuvan yläreunassa on havaittavissa sarjaliikenneportti tiedonsiirtoa sekä järjestelmän konfigurointia varten. Alareunassa ovat analogiset ja digitaaliset syötteet, joiden käyttöä voidaan simuloida kuudella vasemmassa reunassa sijaitsevalla painikkeella.



Kuva 9. IRIS Starter Kit. IRIS Base -yksikkö on kytketty Evaluation Boardiin.

6 TESTAUS

6.1 Yleiskuvaus tutkimuksen testeistä

Tutkimuksessa suoritetuissa testeissä verrattiin IRIS-järjestelmää Stadian HPF008:ssa olemassa olevaa järjestelmää vasten. Testisarjan perusteella pyrittiin saamaan tuloksia, jotka voivat osoittaa toisen järjestelmän sopivan paremmin rata-autoilukäyttöön. Testatut ominaisuudet pyrittiin valitsemaan mahdollisimman hyvin käyttökohdettaan palvelevaksi. Testatut ominaisuudet olivat signaalin kantama näköyhteydellä, signaalin kantama esteisessä ympäristössä, uudelleenyhdistymisen nopeus yhteyden katkeamisen jälkeen sekä tiedonsiirtonopeus. Lisäksi tutkimuksen lopussa arvioidaan molempien järjestelmien kestävyyttä, asennettavuutta, liitettävyyttä sekä yleistä sopivuutta kaksisuuntaiseen telemetriaan formula-sarjoissa.

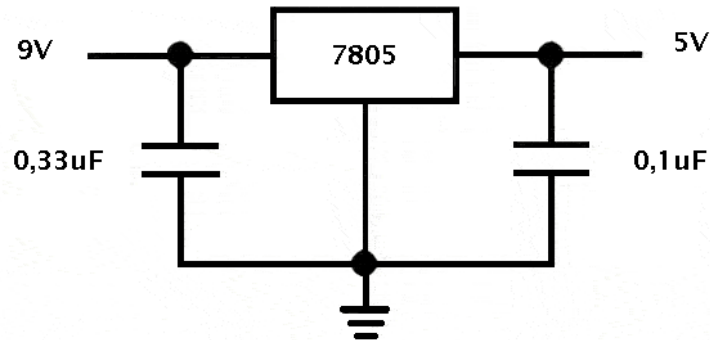
6.2 Testiympäristön kuvaus

Testit suoritettiin Etelä-Vantaalla, jossa pitkä, yli kilometrin mittainen suora tie tarjosi hyvän testiympäristön kantamatestiin näköyhteydellä. Kantamatestaus esteisessä ympäristössä suoritettiin tiuhaan rakennetulla kerrostaloalueella. Uudelleenyhdistyvyys- ja tiedonsiirtonopeustestit pyrittiin tekemään optimiolosuhteissa lähettimien ollessa noin metrin päässä toisistaan.

Molemmat laitteet tarvitsivat kantamamittauksia varten kevyen virtalähteen. IRIS Base -yksikkö sekä Free2Move -adapteri käyttävät molemmat viiden voltin virtalähdettä ja IRIS Evaluation Board 12 voltin virtalähdettä. Stadian HPF008:n telemetriajärjestelmää varten rakennettiin viiden voltin reguloitu virtalähde, ja IRIS-järjestelmää varten kahdentoista voltin virtalähde. Jos IRIS Base -yksikköä oltaisiin testattu ilman Evaluation Boardia, olisi testit voitu suorittaa käyttämällä kaikkiin mittauksiin samaa viiden voltin virtalähdettä. Käytännössä tämä olisi kuitenkin vaatinut piirin, joka suorittaa täysin samat asiat kuin testaamiseen tarkoitettu Evaluation Board.

Free2Move-adapteri käyttää aktiivisena alle 100mA:n virtaa, joten virtalähteeksi valittiin testien ajaksi 9 voltin paristosta reguloitu virtalähde. Paristo kytkettiin kahdella kondensaattorilla vakautettuun STMicroelectronicsin L7805ACV regulaattoriin [10], josta saatiin tasainen viiden voltin jännite. Regulaattorilta saatu viiden voltin jännite kytkettiin Free2Move-adaptorin liitinastan yhdeksän. Kuvassa 7 on havainnollistettu Free2Move-adapterin vir-

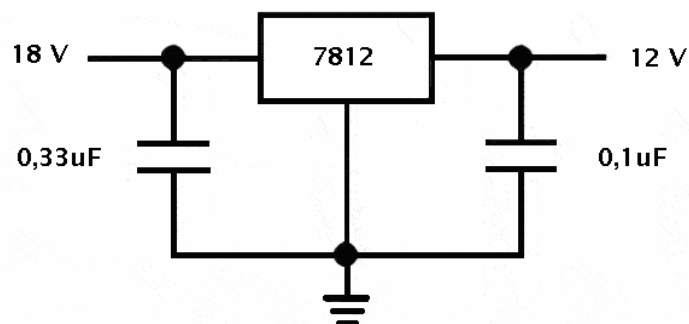
talähdekytkentä, jossa ottopuolen 9 voltia reguloidaan 7805-regulaattorilla viideksi voltiksi.



Kuva 10. Free2Move-adaptoria varten rakennetun virtalähteen kytkentä.

IRIS-järjestelmän virtalähde

IRIS Starter Kit -järjestelmän mukana toimitettiin virtapistoke jännitteenmuuntimella. Virtapistoke jouduttiin kuitenkin korvaamaan ratkaisulla, jota voisi kuljettaa laitteen mukana. Ratkaisuksi valittiin STMicroelectronicsin regulaattori L7812CV, jolla kahden 9 voltin pariston sarjaankytkennällä tuotettu 18 voltin jännite reguloitiin 12 voltiksi. L7812-piirin stabilointi voitiin suorittaa samoilla kondensattoreilla kuin L7805 kuvassa 7. Kuva 8 havainnollistaa IRIS-järjestelmän kantamatestauksissa käytettyä virtalähdekytkentää.



Kuva 11. IRIS-järjestelmän virtalähteen kytkentä.

6.3 Suoritetut testit

6.3.1 Uudelleenyhdistyvyys

Mahdollisen katveen, häiriön tai kantaman aiheuttaman tietoliikennekatkon jälkeen automaattinen uudelleenyhdistyminen on järjestelmälle elintärkeää. Molemmissa järjestelmissä mitattiin aikaa, joka yhteydellä kestää katkon jälkeen saavuttaa datansiirtovalmius. Kummatkin järjestelmät tukivat automaattista uudelleenyhdistymistä. HPF008:n Bluetooth-tekniikka vaatii lähetinyksiköiden parittamisen jokaisella yhdistämiskerralla. HPF008:n asennettu Free2Move RS-232-Bluetooth -adapteri on määrätty Bluetooth-yhteyden isännäksi, jolloin yhteys muodostuu automaattisesti adapterin tullessa varikolle tai muualla olevan USB-Bluetooth-sovittimen kantaman sisäpuolelle. Parittaminen aiheuttaa yhteyden muodostumiseen viipeen, jonka pituuden selvittäminen on työn kannalta erittäin oleellista.

IRIS-järjestelmä tunnistaa automaattisesti peittoalueelle liittyneet IRIS-yksiköt. Järjestelmään kuuluu heräte peittoalueelta poistuville ja liittyville yksiköille. Toinen IRIS-yksikkö ohjelmoitiin reagoimaan kantoalueelle liittyneeseen uuteen IRIS-yksikköön lähettämällä string-muotoinen viesti verkkoon liittyneen yksikön sarjaporttiin.

6.3.2 Kantama

Signaalin kantamamittaukset suoritettiin kahdessa eri ympäristössä. Ensimmäinen mittaus tehtiin näköyhteydellä esteettömällä suoralla tiellä. Toinen mittaus suoritettiin jättämällä varikkoa simuloiva lähetin sisätiloihin, noin kahdeksan metrin korkeuteen toisesta lähettimestä maanpinnalla. HPF008:n Bluetooth-järjestelmän mittauksissa varikolla sijaitseva Ezurio USB-Bluetooth-adapteri kytkettiin tietokoneen virtuaaliseen sarjaporttiin. Tietokone ohjelmoitiin lähettämään string-muotoinen viesti luotuun virtuaaliseen sarjaporttiin 100 ms:n välein. Kun Free2Move-adapteri kytkettiin kannettavaan tietokoneeseen, voitiin järjestelmän kantama selvittää tarkasti tarkkailemalla saapuvia viestejä liikkuen samalla ympäristössä.

IRIS-järjestelmän ohjelmitavuus mahdollisti järjestelmän joustavan testaamisen. Toinen yksiköistä ohjelmoitiin reagoimaan sarjaportista saapuvaan string-herätteeseen "aloita", joka suoritti järjestyksessä seuraavat toimenpiteet:

- Käynnistetään ajastin 1.
- Kun ajastin saavuttaa 100 ms, suoritetaan:
 - Lähetetään string-muotoinen viesti toiselle yksikölle radio-
teitse muotoa "testiX", jossa X arvo saadaan laskurista 1.
 - Kasvatetaan laskurin arvoa yhdellä.
 - Nollataan ajastin 1.
- Käynnistetään ajastin 1 uudelleen.

Käytännössä molemmat kantamamittaukset voitiin siis suorittaa samalla perusajatuksella tarkkailemalla missä vaiheessa viestipaketit eivät enää saavu vastaanottavaan järjestelmään.

Komennolla "lopeta" voitiin lopettaa ajastimen 1 toiminta. IRIS-järjestelmässä on sisäänrakennettu yhteyden tilaa tarkkaileva toiminne, jota voitiin myös kutsua testauksen aikana. Komennolla "dbm" linkin toisen pään yksikkö palautti viestin "Connected, X dBm", jossa X on yhteyden laatu dBm-asteikolla. Käytännössä toiminne ei kuitenkaan toiminut ja molemmat yksiköt palauttivat arvon 13 dBm aina, jos yhteys oli muodostettu kantamasta tai esteistä riippumatta.

6.3.3 Tiedonsiirtonopeus

Molempien järjestelmien toimiessa läpinäkyvänä sarjaliikennekanavana suoritettiin tiedonsiirtonopeustestaukset myös sarjaliikenteenä. Sarjaliikenteen tiedonsiirtoprotokollaksi valittiin Z-Modem, jonka muuttuva ikkunakoko mahdollistaa käytössä olevan kaistan tehokkaan käytön nopeudesta riippumatta [11]. Käytännössä Z-Modem protokolla pilkkoo lähetettävää dataa sitä pienemmiksi yksiköiksi, mitä heikompi yhteys on. Käytännössä tämä luo enemmän rasitetta, (Eng. overhead) heikommille yhteyksille, mutta tiedonsiirron kannalta yhteys on aina optimaalinen.

Jotta mahdollinen heikompien yhteyksien datamäärä ei vääristäisi tutkimustuloksia, tehtiin testaukset myös vanhemmalla, kiinteäpakettikokoisella Y-Modem-protokollalla. Käytännön eroja protokollien välillä ei kuitenkaan syntynyt. Testeissä siirrettiin 128, 256, 512 ja 1024 kilotavun tiedostot radiotien yli ja mitattiin tiedonsiirtoon kuluva aika. Tästä ajasta laskettiin keskimääräinen tiedonsiirtonopeus.

6.3.4 *Kestävyys, asennettavuus, liitettävyys*

HPF008 Bluetooth

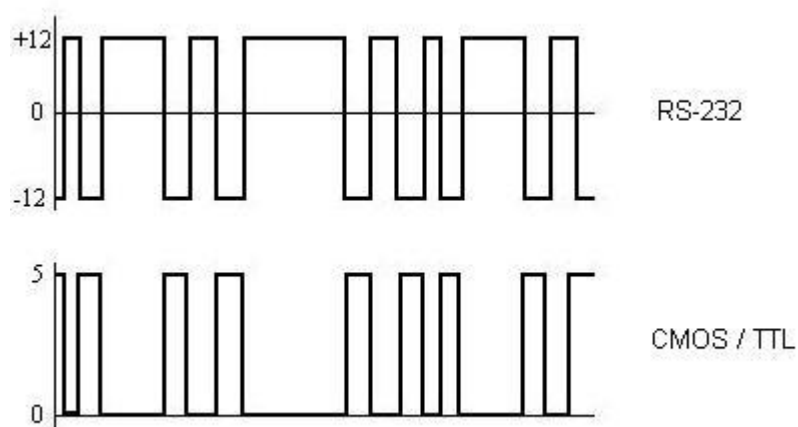
Free2Move–adapterille ei valmiista ulkokuorestaan riippumatta ole myönnetty IP-standardin mukaista kestävyysluokkaa. Pienikokoisessa adapterissa ei kuitenkaan ole irtonaisia osia, eivätkä laitteen kuoret avaudu helposti. Laitteeseen ei myöskään ole asennettu tai saatavilla kiinnityssarjaa, käytännössä pieni laite on kuitenkin asennettavissa haluttuun paikkaan. Free2Moven fyysinen liitettävyys on hyvä: laite saa virtansa joko virtalähteestä tai sarjaportin liittimestä. Jälkimmäisessä tapauksessa adapteri ei tarvitse kuin yhden sarjaliikennekaapelin. Asennusta hankaloittaa valmistajan oma ohjelmisto, jolla adapteriin tallennetaan halutut määreet kuten laitteet, joihin halutaan olla yhteydessä, slave / master–valinta, Bluetooth-avaimet sekä sarjaliikenneasetukset. Ohjelmisto osoittautui testatessa varsin epävakaaksi, joskin halutut asetukset saatiin lopulta toimimaan adapterissa. Kun adapteri on ohjelmoitu, voidaan se liittää haluttuun sarjaliikennesyötteeseen. Kytkemisen jälkeen adapteri toimii itsenäisesti ja lähettävälle syötteelle täysin läpinäkyvästi.

IRIS-järjestelmä

IRIS-järjestelmä on tarkoitettu jatkojalostettavaksi jokaisen asiakkaan omiin tarpeisiin. IRIS Base -yksikköön liitetty Evaluation Board on nimensä mukaisesti tarkoitettu vain IRIS-järjestelmän suorituskyvyn ja ominaisuuksien arviointiin. Tutkimuksen kohdetta vastaavaan käyttöön tulisi IRIS Base -yksikön oheen suunnitella seuraavat asiat:

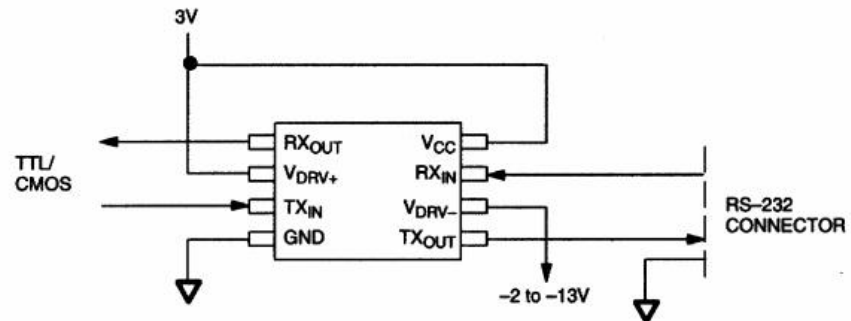
- ulkokuori
- elektroniikka ulkoisten järjestelmien kytkemiseksi IRIS Baseen
- CMOS/TTL-jännitetason muuttaminen RS-232 standardin mukaiseksi

Lopullisen ulkokuoren kannalta olennaisia seikkoja ovat haluttu asennuspaikka ja -tapa. Ulkoisten järjestelmien liittäminen ei ole välttämätöntä, mutta IRIS-järjestelmällä olisi mahdollista tarkkailla sensoreita ilman moottorinohjausyksikköä sekä reagoida muutoksiin vastavaikutteisesti. Jotta järjestelmästä saataisiin läpinäkyvä radiorajapinta sarjaliikenteelle, tulee IRIS Base -yksikön käyttämä CMOS-jännitetaso muuttua RS-232 standardin mukaiseksi. RS-232 standardissa looginen 1 on ilmaistu negatiivisella jännitearvolla ja looginen nolla positiivisella jännitearvolla. CMOS- tai TTL-standardissa looginen 1 on määritelty positiiviseksi jännitehuipuksi ja looginen 0 nollajännitteeksi. Seuraava kuva havainnollistaa CMOS- ja RS-232-tekniikoiden eron.



Kuva 12. RS-232 ja CMOS/TTL-jännitetasojen erot

Jännitetason muuttamiseen on markkinoilla useampi valmispiiri tarkoitusta varten. Seuraavassa on esitetty ratkaisu käyttäen Maxim Integrated Productsin DS276 sarjaliikenne lähetin-vastaanotin –piiriä.



Kuva 13. CMOS/TTL-tason muunnos RS-232 standardin mukaiseksi

Käytännössä DS276-piiriä voidaan käyttää myös ilman virtalähdettä, jolloin piirin tarvitsema virta varastetaan RS-232-puolen syöttöjohtimesta. Lähetinjohdin on toimenkuvastaan huolimatta suurimman osan ajastaan passiivinen, jolloin johtimen jännite on -12 voltia. Tätä jännitettä voidaan käyttää hyväksi piirissä. Koska IRIS Base -yksikkö vaatii joka tapauksessa reguloitua virtalähteen toimiakseen, on yksinkertaisemman, virtalähteellisen kytkennän käyttö DS276-piirin kanssa perusteltua.

7 TESTIEN TULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI

Kantama

Taulukossa 1 on esitetty molempien järjestelmien kantamat kahdessa eri mittausympäristössä. Ensimmäisessä sarakkeessa ovat tulokset näköyhteydellä suoritetusta testistä (Line-Of-Sight, LOS) ja toisessa sarakkeessa esteisessä ympäristössä suoritettujen testien tulokset (NLOS).

	LOS (m)	NLOS (m)
HPF008 Bluetooth	160	30
IRIS -järjestelmä	900	350

Taulukko 1. Kantamatestin tulokset

Yhteyshäiriön aiheuttama viive

HPF008 Bluetooth –adapterin uudelleenyhdistämisenopeus vaihteli hieman, joten testeissä käytettiin kymmenen mittauksen keskiarvoa. Käytännössä mitatut arvot olivat kahdesta kolmeen sekuntia kantaman palaamisesta. Yhteyden katkeamista voitiin simuloida katkaisemalla virransyöttö Free2Move –adapterista ja mittaamalla aikaa sarjamoitoisen tiedonsiirron jatkumiseen virran takaisinkytkemisen jälkeen. Taulukossa 2 näkyvät mitatut arvot Free2Moven uudelleenyhdistymisajoista.

	AIKA (s)
testi 1	2,70
testi 2	5,44
testi 3	2,77
testi 4	2,80
testi 5	5,59
testi 6	5,13
testi 7	5,05
testi 8	2,68
testi 9	2,47
testi 10	5,35
KA	4,00

Taulukko 2. Free2Move –adapterin uudelleenyhdistymisajat

IRIS-järjestelmässä uudelleenyhdistymisajat osoittautuivat liian pieniksi mitauksille. Liittymiseen kuluvat ajat voidaan olettaa olevan mahdollisen katkosta toipumisen kannalta mitättömän pieniä.

Tiedonsiirtonopeus

	AIKA [s]	NOPEUS [kbps]	NOPEUS [kts]
128kt	24,29	42,157	5,269
256kt	46,88	43,686	5,460
512kt	92,00	44,521	5,565
1024kt	183,50	44,643	5,580
KA	-	43,75	5,47

Taulukko 3. Tiedonsiirtonopeustestin tulokset Free2Move-adapterilla ja Ezurio Bluetooth –sovittimella.

Yhteenveto testien tuloksista

Lähtökohdat tulosten analysointiin olivat vaikeat. Suoritettuja testejä leimasi kauttaaltaan epätasaisuus. Ainoa testikohde, josta molemmat järjestelmät tuottivat vertailukelpoiset tulokset oli yhteyden kantaman testaus. Loput testatut kvantitatiiviset ominaisuudet tuottivat tuloksen, jossa toinen järjestelmä epäonnistuu täysin tai saavuttaa tuloksen, jonka onnistunutkaan mittaus ei tuo ylivoimaisuudessaan lisäarvoa työlle.

Syiden selvittäminen järjestelmien pettämiseen tietyissä testeissä on mielenkiintoinen tutkimuksen kohde, mutta ajautuu tämän työn laajuuden ulkopuolelle. Tutkimusta hankaloittavat järjestelmien yksinoikeudella valmistetut osat, joiden dokumentoinnit eivät ole yleisesti saatavilla. Esimerkiksi IRIS-järjestelmän ilmarajapintaa ohjaavan IRIS-protokollan teknistä kuvausta tai mitään teknistä dokumentaatiota ei pyynnöistä huolimatta onnistuttu saamaan työn käyttöön.

8 TUTKIMUKSEN LOPPUTULOS

Tässä tutkimuksessa pyrittiin arvioimaan IRIS-järjestelmän suorituskykyä kaksisuuntaisen telemetrian tarpeisiin formula-tyyppisen kilpa-auton ja varikon välillä sekä vertaamaan saatuja tuloksia jo olemassa olevaan järjestelmään Stadian HPF008-kilpa-autossa.

Suoritetuista testeistä saadut tulokset jakoutuivat tasaisesti molempien tekniikoiden hyväksi. Olemassa olevan Bluetooth-tekniikan eduksi voidaan laskea testitulokset asennettavuudesta ja tiedonsiirtonopeudesta. Vastaavasti kantama- ja uudelleenyhdistyvyydestä osoittautuivat selvästi IRIS-järjestelmää suosiviksi.

Ratkaisevaksi tekijäksi paljastui tiedonsiirtonopeus, jota ei pienelläkään siirtomäärillä saatu IRIS-järjestelmässä toimimaan luotettavasti. Vaikka käyttö tutkimuksen ympäristössä vaatii nykytoimituksella erittäin pientä läpäisykykyä, ei IRIS-järjestelmää voi suositella tämän puutteen vuoksi aiottuun ympäristöön. Muita tulokseen vaikuttavia tekijöitä ovat vaadittava työ, jotta IRIS-järjestelmän lähetin-vastaanottimista tulisi asennuskelpoinen kilpa-auton päässä ja virtalähteen pakollisuus myös varikon lähetin-vastaanottimessa. IRIS-järjestelmän konfigurointisovellukseen on myös jätetty useita virheitä. Eräs näistä virheistä yksikölle lähetettynä lamauttaa koko yksikön toiminnan täydellisesti. IRIS-järjestelmän konfigurointikäskyt olisivat myös lähetettävissä suoraan sarjaliikenneteitse ilman konfigurointiohjelmia, jolloin koko IRIS-verkon parametreja voitaisiin muuttaa hyötykuorman ohessa adaptiivisesti vastaamaan verkon tarpeita sillä hetkellä. Näitäkään käskyjä ei pyynnöistä huolimatta saatu työn käyttöön.

HPF008:n nykyinen telemetriajärjestelmä on myös IRIS-järjestelmää hieman edullisempi. IRIS-järjestelmässä hintaan vaikuttaa kehitys, joka on jouduttu tekemään valmistettaessa yksinoikeustuotetta tiedonsiirtoprotokollasta lähtien. Bluetooth-pohjaisessa järjestelmässä hintaan voidaan tehokkaasti vaikuttaa laajan tarjonnan avulla. Tietokoneeseen kiinnitettäviä USB-Bluetooth-sovittimia on markkinoilla eri valmistajilta erittäin paljon.

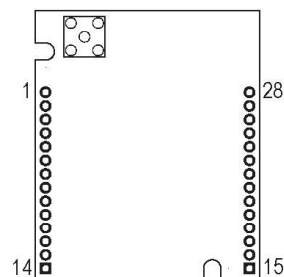
VIITELUETTELO

- [1] Ahlin, Lars, Principles of Wireless Communications, 2. painos, 1998. Chapter 1.
- [2] Viestintävirasto, kansainvälinen yhteistyö [verkkodokumentti, viitattu 5.5.2008]. Saatavissa: <http://www.ficora.fi/index/viestintavirasto/esittely/kansainvalinenyhteisty.html>
- [3] Vitthaladevuni, P.K. ja Alouini, M.-S, Exact BER computation for the cross 32-QAM constellation [verkkodokumentti, viitattu 7.9.2008] Saatavissa: <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?url=/iel5/9085/28825/01296484.pdf?temp=x>
- [4] Langton, Charan, Intuitive Guide to Principles of Communications, 2005. [verkkokoaineisto, viitattu 7.9.2008] Saatavissa: <http://www.complextoreal.com>
- [5] Ahola, Mikko, Haastattelu, 8. helmikuuta 2008.
- [6] Texas Instruments, Technical Document [verkkodokumentti, viitattu 28.08.2008] Saatavissa: <http://www.ti.com/lit/gpn/cc1020>
- [7] Bluetooth: technology for short-range wireless apps [verkkodokumentti, viitattu 7.9.2008] Saatavissa: <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?url=/iel5/4236/20242/00935183.pdf?temp=x>
- [8] Granlund Kaj, Tietoliikenne. Tietoliikennetekniikan peruskirja. Gummerus kirjapaino, Jyväskylä 1999.
- [9] Formula Sae Rules 2008 [verkkodokumentti, viitattu 7.9.2008] Saatavissa: <http://students.sae.org/competitions/formulaseries/rules/rules.pdf>
- [10] STMicroelectronics, L7805-regulointipiirin tekninen kuvaus [verkkodokumentti, viitattu 8.9.2008] Saatavilla: <http://www.st.com/stonline/products/literature/ds/2143/l7805c.pdf>
- [11] Z-modem –protokollan tekninen kuvaus. [verkkodokumentti, viitattu 28.08.2008] Saatavissa: <http://gallium.inria.fr/~doligez/zmodem/zmodem.txt>

IRIS Base



IRIS-Base - Pinout



Pin number	Function
1	Gnd
2	N/A (I2C SDA)*
3	N/A (I2C SCL)*
4	Gnd
5	N/A (GPIO 2)*
6	TXD (from uP) (connect to RXD)*
7	RXD (from uP) (connect to TXD)*
8	Sleep activation (GPIO 1)*
9	Reset (active low, only uP)*
10	N/A (SPI SCK)*
11	N/A (SPI MISO)*
12	N/A (SPI MOSI)*
13	N/A (SPI SS)*
14	Power +5 Volt**
15	Power +5 Volt**
16	Analogue/Digital in 6
17	Analogue/Digital in 5
18	Analogue/Digital in 4
19	Analogue/Digital in 3
20	Analogue/Digital in 2
21	Analogue/Digital in 1
22	Gnd
23	Gnd
24	Digital out 4
25	Digital out 3
26	Digital out 2
27	Digital out 1
28	Gnd

* Used only for special applications and should normally not be connected.

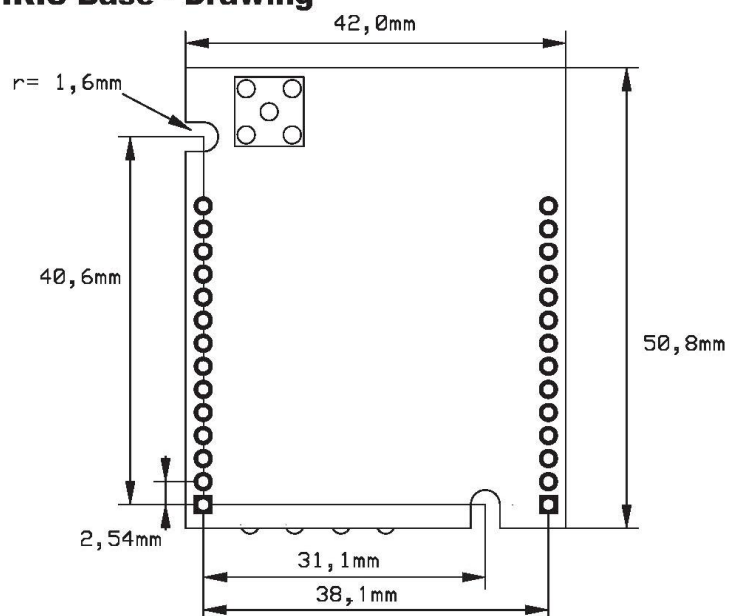
** Must be regulated and well filtered against high frequent noise.

All pins are connected to the microprocessor (Atmel Mega32).
See datasheet for specifications and limitations regarding voltage levels.
http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2503.pdf



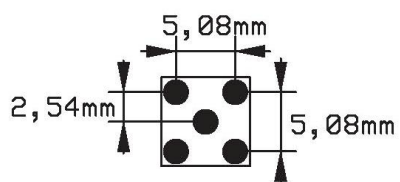


IRIS-Base - Drawing



Antenna

50 ohm



Connections

2 x 14 pin header (2.54mm pitch)

For more information: www.irisnetwork.se, info@irisnetwork.se

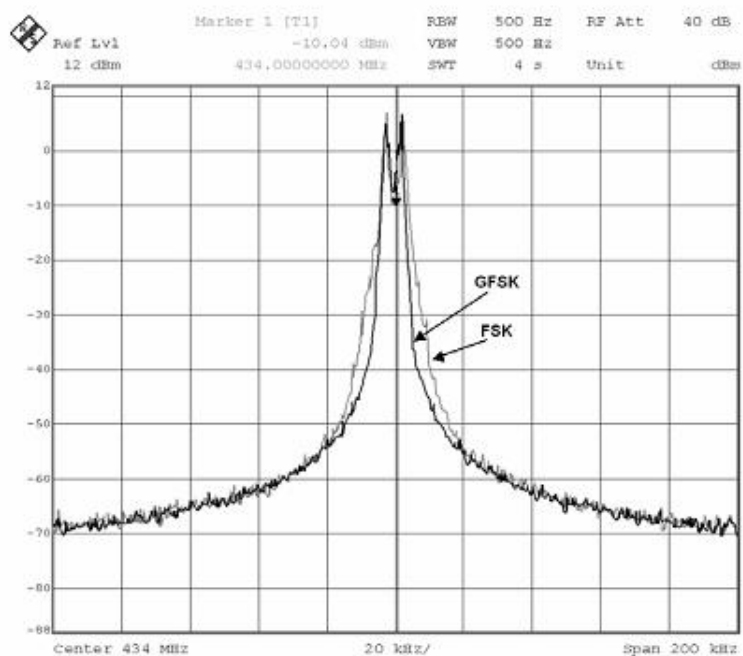

SmartRF[®] CC1020


Figure 14. FSK vs. GFSK spectrum plot. 2.4 kBaud, NRZ, ± 2.4 kHz frequency deviation.

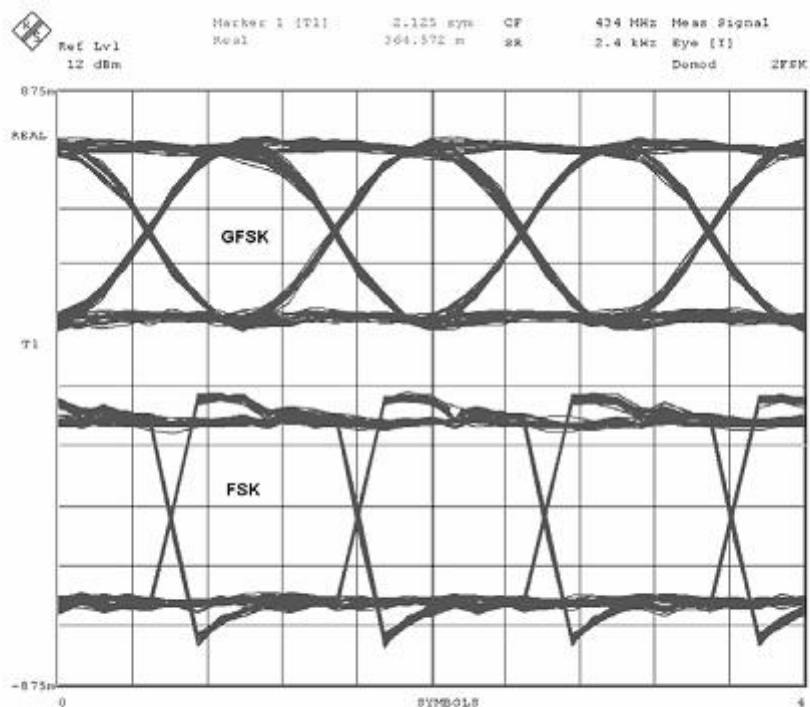


Figure 15. FSK vs. GFSK eye diagram. 2.4 kBaud, NRZ, ± 2.4 kHz frequency deviation.