

Teknillinen korkeakoulu

Elektronikan ja sähkötekniikan osasto

Jussi Hämäläinen

**RADIOSONDINELEKTRONIIKAN VAIHTOEHTOISET
TOTEUTUSTAVAT**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytetyönä tarkastettavaksi diplomi-
insinöörintutkintoa varten Espoossa 28.07.2008

Työnvalvoja

Professori Kari Halonen

Työnohjaaja

DI Jon Währn

Alkulause

Diplomityöni tehtiin Vaisalan lahjoittamalla stipendillä. Haluan kiittää työni ohjaajaa diplomi-insinööri Jon Währniä ja muitakin vaisalalaisia, jotka auttoivat ja opastivat minua tarvittaessa. Haluan kiittää myös työni valvojaa professori Kari Halosta työhöni saamasta avustajapastuksesta sekä jänteisyydestä.

Lisäksi kiitokset perheelleni opiskelujen ja diplomityönaikan saamasta kannustuksesta ja tuesta sekä erityiskiitos henkisestä tuesta rakkailleeni Natalialle ja myös hänen perheelleen.

Helsingissä 28.07.2008

Jussi Hämäläinen

TEKNILLINEN KORKEAKOULU**Diplomityöntiivistelmä****Tekijä:**Jussi Hämäläinen**Työn nimi:** Radiosondinelektroniikan vaihtoehtoisten toteutusten vertailu**Päivämäärä:**28.07.2008**Sivumäärä:**59**Osasto:**Sähkötekniikan osasto**Laitos:**Piiriteknikan laitos**Työnvalvoja:** Professori Kari Halonen**Työnohjaaja:** Diplomi-insinööri Jon Währn

Radiosondi on kertakäyttöinen elektroninen laite, jota käytetään pääasiassa ilmakehän suureiden, ilmanpaineen, lämpötilan ja ilmankosteuden määrittämiseen. Tässä työssä tarkasteltiin radiosondin elektroniikkaan sisältyviä toiminnallisia lohkoja, niiden tehtäviä sondin toiminnan kannalta sekä erilaisia vaihtoehtoja elektroniikan toteuttamiseen. Toteutustapojen ääripäinä olivat täysin kaupallisilla komponenteilla toteutettu vaihtoehto sekä vaihtoehto, jossa elektroniikan integrointiasteolinostettumahdollisimman korkeaksi.

Toteutustapojen vertailua varten määriteltiin useita kriteerejä, joiden perusteella toteutustapoja vertailtiin. Kriteereiden avulla pyrittiin määrittämään eri toteutusvaihtoehtojen edut ja haitat sekä löytämään kolme optimaalisinta vaihtoehtoaradiosondinelektroniikan toteutukselle.

Kolme optimaalisinta vaihtoehtoa pystyttiin määrittämään. Työn edetessä kuitenkin havaittiin, että näiden kolmen vaihtoehdon osalta olisi tehtävä vielä huomattavasti lisätutkimusta, ennen kuin niistä voitaisiin aloittaa tuotekehitysprojekteja. Tähän johtopäätökseen tultiin, koska huomattiin työn laajuus niin suureksi, ettei eri toteutustapojen tutkimusta voitu tehdä kovin syvällisellä tasolla.

Avainsanat: Radiosondi, elektroniikka, toteutus

HELSINKI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY Abstract of the Master's Thesis

Author: Jussi Hämäläinen	
Name of the thesis: Alternative implementation method of radiosonde electronics	
Date: 28.07.2008	Pages: 59
Faculty: Electronics, Communications and Automation	
Professorship: S-87 Electronic circuit design	
Supervisor: Professor Kari Halonen	
Instructor: M.Sc. Jon Währn	
<p>Radiosonde is a disposable electronic device, which is mainly used for measuring upper atmosphere variables, defining air pressure, temperature and air humidity. In this thesis, the functional blocks which are entered into radiosonde electronics were examined. Functions of those blocks from radiosonde operational point of view and alternative implementation methods of those blocks were defined. On extremity of alternative implementation methods were a method, which uses only commercially available components and on the other end a method, which has maximal integration level.</p> <p>To be able to compare alternative implementation methods, we defined various criteria, for which comparison of different methods was based on. Those criteria were used to define the benefits and disadvantages of different implementation methods and finally to find three most optimal implementation methods for radiosonde electronics.</p> <p>Three most optimal methods could be defined. Although during the thesis it was realized that remarkably more detailed analysis of these three implementation methods should be done before starting a development project. This conclusion was done, because during the thesis work range of this thesis was realized to be so large, that it was not possible to do enough detailed analysis of these implementation methods.</p>	
Keywords: Radiosonde, electronics, implementation	

Sisällysluettelo

ALKULAUSE	i
TIIVISTELMÄ	ii
ABSTRACT	iii
SISÄLLYSLUETTELO	iv
LYHENTEETJAMERKINNÄT	vi
1 JOHDANTO	1
2 RADIOSONDI	2
2.1 Radiosondi yleisesti	2
2.2 Merkitsevätasiatradiosondinsuunnittelussa	5
3 RADIOSONDINELEKTRONIIKKA	6
3.1 Lohkojako	6
3.2 Lohkojenosat,toiminnatjatehtävät	7
3.2.1GPS	7
3.2.2DSPjamuistit	8
3.2.3Mittauselektroniiikka	9
3.2.4Lähetin	11
3.2.5Tehonsyöttö	12
4 RADIOSONDINELEKTRONIIKANERILAISETTOTEUTUSTAVAT ..	134
4.1 Radiosondinspesifikaatiot	14
4.1.1GPS	14
4.1.2DSP	15
4.1.3Lähetin	16
4.1.4Mittauselektroniiikka	18
4.1.5Tehonsyöttö	19
4.2 Toteutusvaihtoehdot	20
4.2.1Vaihtoehto1	21
4.2.2Vaihtoehto2	22
4.2.3Vaihtoehto3	24
4.2.4Vaihtoehto4	25
4.2.5Vaihtoehto5	27
4.2.6Vaihtoehto6	28

4.2.7Vaihtoehto7	30
4.2.8Vaihtoehto8	31
5 RADIOSONDINELEKTRONIIKANTOTEUTUSTAPOJEN	
VERTAILUKRITEERIT.....	33
5.1 Kustannusjaottelu	33
5.2 Aikataulujaresurssit	35
5.3 Tekninenriskitaso	38
5.4 Elektroniikanhinta	40
5.5 Muunneltavuus	42
5.6 Muutkriteerit	43
5.7 Yhteenvetovertailukriteereistä	45
6 TOTEUTUSTAPOJENVERTAILU.....	46
6.1 Kustannusjaottelu	46
6.2 Aikataulujaresurssit	47
6.3 Tekninenriskitaso	49
6.4 Elektroniikanhinta	51
6.5 Muunneltavuus	52
6.6 Muutkriteerit	54
6.7 Parhaidentoteutusvaihtoehtojenvalinta	55
7 POHDINNAT	58
LÄHDELUETTELO.....	59

Lyhenteetjamerkinnät

A	ASIC
ASIC	ApplicationSpecificintegratedcircuit
BB	Baseband(Kantataajuus)
DI	Diskreettikomponentti
DSP	Digitalsignalprocessing
ETSI	Europeantelecommunicationsstandardsinstitut e
GPS	Globalpositioningsystem
IC	Integratedcircuit;integroituipiiri
ME	Mittauselektronikka
MK	Mikrokontrolleri
MPW	MultiprojectWafer
PA	Tehovahvistin
RAM	Randomaccessmemory
RF	Radiofrequency(Radiotaajuus)
ROM	Read-onlymemory
SPI	Serialperipheralinterface
SSI	Synchronousserialinterface
TX	Lähetin
U	Ulkoisestitoteutettu,jokokaupallinentaiASIC
UART	Universalasynchronousreceiver/transmitter

1 Johdanto

Sääpalveluiden tarjoamisesta on tullut nykyaikana t uottavaa bisnestä. Paikkakuntakohtaiset sääennusteet ovat saatavissa m atkapuhelimeen toimitettuna tekstiviestinä lähes paikkaan kuin paikkaan ainakin Suomen alueella. Sääennusteita tekeviä yrityksiä on muitakin kuin vain Ilmatieteen laitos. Sääennusteiden tekoperustuu pitkälti laskettuihin malleihin, jotka perustuvat odennäköisyyteen. Palveluistamaksavat kuluttajathaluavat, että sääennusteet olisivat mahdollisimman tarkkoja. Sääennusteiden tarkkuuteen vaikuttaa hyvin paljon ilmakehästä saad un datan määrä sekä tarkkuus. Radiosondion laite, jolla tuotatarvittavaa dataa on mahdollista saada.

Radiosondion laite, jolla määritellään ilmakehästä ilman kosteus, lämpötila, ilmanpaine sekä tarvittaessa tuulen suunta sekä voimakkuus. Radiosondi voi olla joko kaasupallon mukana ylöspäin nouseva tai lentokoneesta pudotettava. Vaisalan perustaja Vilho Väisälä kehitti radiosondin 1930-luvun alkupuolella. Myytäväksi tuotteeksi radiosondi saatiin kehitettyä vuonna 1936. Tuosta alkaen Vaisala on toiminut edelläkävijänä radiosondien kaupassa ja kehityksessä. Vaisalan tarjoama tuotevalikoima on kasvanut alkuajoista merkittävästi ja nykyisin on tarjolla kaikkea yksittäisistä antureista ja radiosondeista tai muistamittalaitteista aina täydellisiin mittausjärjestelmiin asti. Tämä tuotevalikoima ja mittalaitteiden ja järjestelmien ammattitaitoinen kehitys sekä kehittynyt teknologia on tehnyt Vaisalasta maailman laajuisen markkinajohtajan monilla mittauksiin liittyvillä alueilla. [1]

Diplomityön pääasiallisena tarkoituksena oli tutustua radiosondin toimintaan ja sondin elektroniikkaan sekä tutkia erilaisia mahdollisuuksia elektroniikan toteuttamiseksi. Sondin elektroniikka jaettiin lohkoihin eri lohkojen toiminnallisuuden perusteella. Lohkojen toiminnallisuudet selvitettiin ja kaikille lohkoille määritettiin tekniset spesifikaatiot. Tavoitteena diplomityössä oli määrittää kolme optimaalista vaihtoehtoa radiosondin elektroniikan toteuttamiseen sekä sopivien työn aikana määriteltyjen kriteereiden perusteella löytää niiden optimaalisten vaihtoehtojen toteutustapoihin sisältyvät edut ja haitat. Lisätavoitteena oli tehdä tarkempaa lisäselvitystä niiden kolmen vaihtoehdon osalta.

Yleisessä osassa esitellään radiosondi, käydään läpi radiosondin toiminta sekä jaetaan radiosondin elektroniikka toiminnallisuuden perusteella eri lohkoihin. Eri lohkoille määritellyt spesifikaatiot ja kaikki työssä käsitellyt elektroniikan vaihtoehdot toteutustavat sekä toteutustapojen vertailuun käytettyjen kriteereiden määrittely on esitetty omassa luvussa. Lopuksi ovatesiteltynä vertailutulokset sekä niihin liittyvät johtopäätökset. Työhön ja sen tarkkuuteen ja laajuuteen liittyvät pohdinnat on esitetty omassa luvussa.

2 Radiosondi

Tässä luvussa käsitellään radiosondin valmistusta, perustoimintaa ja käyttötarkoitusta, jotta lukijalle tulisi selkeä käsitys siitä mihin tarkoitukseen radiosondi on valmistettu, miten radiosonditoimii ja kuinka radiosondiä käytetään.

2.1 Radiosondiyleisesti

Radiosondeja käytetään pääasiassa yläilmakehän ilmapaineen, -kosteuden ja lämpötilan mittauksiin. Suurin osa radiosondiläutauksista suoritetaan maan- tai vesitasoilla, mutta osaluotauksista tapahtuu lähettämällä radiosondi ilmaan joko laivaltai saareen sijoitetulta automaattiasemalta, jotta saataisiin reaaliaikaista tietoa ilmakehästä merialueiden yläpuolelta. Merialueiden osalta sääennusteet kuitenkin perustuvat pääosin satelliitteista saatuun dataan. Radiosondeille saadut mittaustulokset ovat hyvin keskeisessä osassa sääennustemallien luomisessa ja kehittämisessä sekä itse jokapäiväisten sääennusteiden laadinnassa.[2] Radiosondeja käytetään vain lähettämällä niitä nousemaan ylöspäin ilmakehästä, vaan on olemassa myös oma pudotuskäyttöön oleva sondityyppi, joka pudotetaan varjon kanssa lentokoneesta. Vaisalan RS-92 radiosondi-tuoteperhe kuvassa 1.



Kuva 1: Vaisalan RS-92 tuoteperhe. [3]

Radiosondeja käytetään mittaamaan ilmakehän arvoja jopa 35 kilometrin korkeuteen asti. Radiosondien mittaussysteemien lämpötilamittauksen epätarkkuuden selkeä kasvaminen hyvin matalassa ilmapaineessa kuitenkin rajaa useimmat mittaukset 25 kilometrin korkeuteen. Lisäksi kaasupallot, joilla on mahdollista päästä 35 kilometrin

korkeuteen, ovat suhteellisen kalliita ja tästä syystä tyydytään useimmiten alempiin korkeuksiin. Luotauksissa yleisimminkäytettyjen kaasukupalojen nousunopeudet ovat 5-8m/s.[2] Tästä voidaan päätellä sondien luotaukseen kuluvat ajat, esim. 30km korkeus saavutetaan noin 90 minuutissa.

Pudotus-sondeissa putoamisnopeus on 12m/s luokkaa, joten pudotusluotauksiin kuluva aika on noin 15 minuuttia, kun sondi pudotetaan suhteellisen yleisesti käytetystä noin 10-12km lentokorkeudesta.[2] Nämä edellä mainitut ajat ovat kuitenkin vain itse luotaukseen käytetty aika. On kuitenkin huomioitava, että sondi on toiminnassa huomattavasti pidemmän ajan kuin vain luotausajan. Tämä on muistettava sondin tehonsyötönsuunnittelussa.

Kaasukupallon nousunopeudella on lisämerkityksensä siinä, että radiosondin lämpötilan korjauskerroin on sopiva tietyille nousunopeudelle. Tämän lisäksi lämpötilan ja suhteellisen kosteuden anturiton yleensä suunnitellut sijaitsevat radiosondissa niissä, että niiden tarvitsemat sopivat ilmapaine- ja kosteuden anturit on suunniteltu toimimaan 6m/s.

Nämä tiedot säätilasta saadaan kapasitiivisilta antureilta kapasitanssin muutoksena. Anturit ovat sijoitettuna joko anturipuomiin tai piirilevylle anturien mittausspiirin kanssa. Mittariyksikkö mittaa näiltä antureilta tulevat taajuudet ja nämä taajuudet lähetetään edelleen maa-asemalle, jossa maakalusto laskee taajuutta vastaavan lämpötilan, kosteuden tai ilmapaineen.

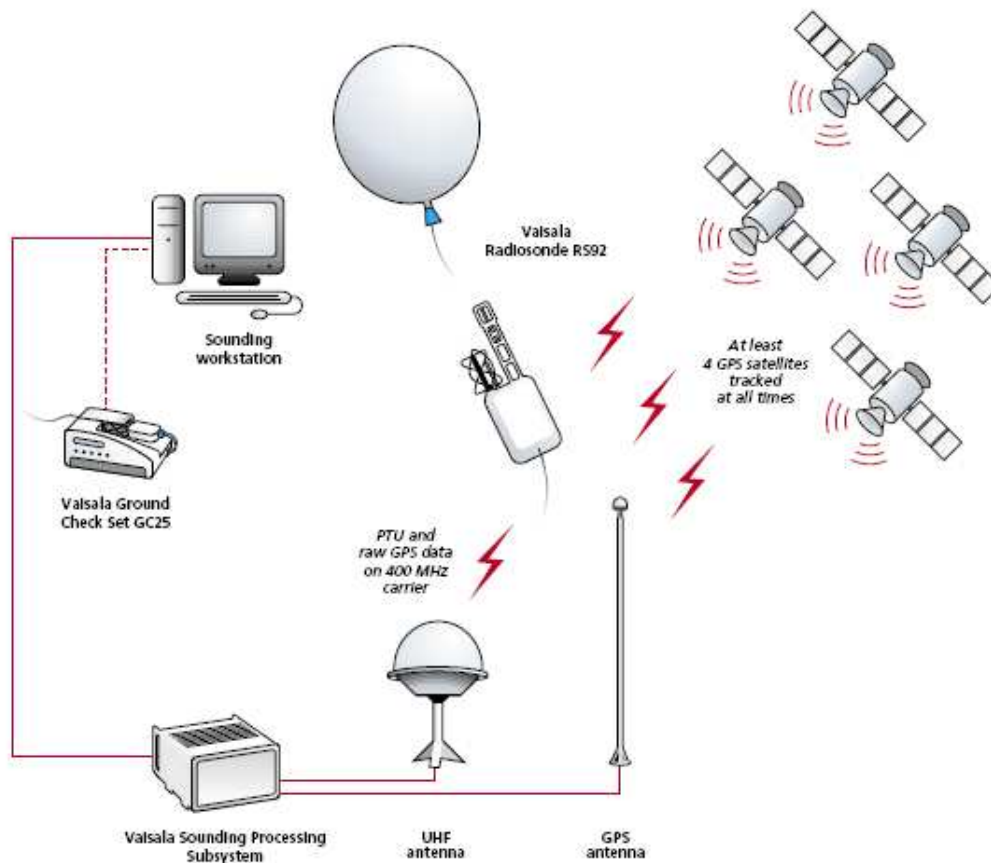
Näiden normaaleiden sääilmiöiden mittaamisen lisäksi radiosondeja voidaan käyttää myös otsonipitoisuuden mittaukseen sekä radioaktiivisen säteilyn mittaamiseen. Nämä tuotteet ovat kuitenkin hyvin marginaalinen osan maan kaupan verrattuna normaalien ilmakehän suureiden mittaamiseen tarkoitettuihin sondeihin.

Jokaisen radiosondin anturit kalibroidaan ennen käyttöä. Kalibroinnin avulla saadaan laskettua jokaiselle anturille omat kalibrointikertoimet ja nämä kertoimet tallennetaan sondin muistiin. Kalibrointi on todella olennainen osa radiosondin toiminnan ja ennen kaikkea luotettavan toiminnan varmistamiseksi, koska puolijohdeprosessilla valmistetut anturit eivät ole keskenään täsmälleen samanlaisia, pieniä eroja antureiden välillä syntyy väkisinkin. Kalibroinnin avulla päästään halutun toimintatarkkuuden rajoihin.

Sondi liikkuu noustessaan myös tuulen voimasta ja tämän tuulen suunta ja nopeus voidaan määrittää. Käytettävissä on kaksi erilaista tapaa tuulen suunnan ja nopeuden määrittämiseksi. Sondin liikettä voidaan seurata maassa sijaitsevan suunta-antennin avulla, jolloin sondin suhteellinen liike saadaan laskettua antennin korkeus- ja suuntakulmien sekä sondin oman paineanturin mittaustuloksesta. Vaihtoehtoinen ja nykyisin suosittu tapa on sijoittaa sondiin vastantuleva anodi-elektronikkaajonkin globaalin

paikannusjärjestelmän signaalin vastaanottamiseksi. Näitä paikannusjärjestelmiä ovat mm. GPS ja Loran-C ja lisäksi eurooppalainen GPS-järjestelmän haastaja Galileo. Sondin GPS-vastaanottimen on löydettävä vähintään neljä satelliittia, jotta tarkka paikkatietoon mahdollistetaan. Tällöin sondi lähettää siis maakalustolle jokopalkista dataa tai suoraan paikkatietoa, riippuen siitä suoritetaanko laskenta sondissa vai maakaluston avulla. Kuitenkin militaarisovelluksissa käytetään usein radiotheodoliittia GPS-paikannusensijasta, GPS-signaalin kohtalaisen helpon häiritävydenvuoksi.

Radiosondi kuuluu tärkeänä osana luotausjärjestelmään. Muina luotausjärjestelmän osiin voidaan ajatella kuuluvan kaasupallo, GPS-satelliitit sekä maakalusto luotausohjelmien ja antenneineen. Luotausjärjestelmä on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2 GPS-pohjaisen radiosondin perustuvamittausjärjestelmä. [3]

Luotauksia suoritetaan ympäri maailman ja niistä saatavat tiedot tallennetaan pääosin maailmanlaajuiseen verkkoon, josta tiedot ovat saatavilla joka puolelle maapalloa ja josta ne ovat mm. kansallisten ilmatieteenlaitosten käytettävissä. Luotauspaikoilla luotauksia suoritetaan yleensä kahdesti vuorokaudessa noin 12 tunnin välein.

2.2 Merkitsevätasiat radiosondin suunnittelussa

Tärkeitä radiosondin suunnittelussa huomioon otettavia asioita ovat luotettavuus, robustisuus, keveys sekä suhteellisen pienikoko. Myös radiosondin näytteenottotaajuus olisi syytä olla riittävän korkea, vähintään kerran sekunnissa, niin että näytteenoton minimiväli radiosondin korkeuden suhteen olisi noin 5 metriä. Koska radiosondi on kertakäyttötuote, niin se tulisi suunnitella edulliseksi tuottaen massatuotantona. Radiosondin kalibroinnin tulisi olla helppoa ja kestävä, koska radiosondeja varastoidaan usein pitkiä, jopa vuoden pituisia aikoja. Etenkin hyvin syrjäisillä alueilla automaattiasemilla käytettävät radiosondit voivat säilyä käyttämättöminä jopa vuoden ajan, koska niiden varastotäydänyysimassavain kerranvuodessa.[2]

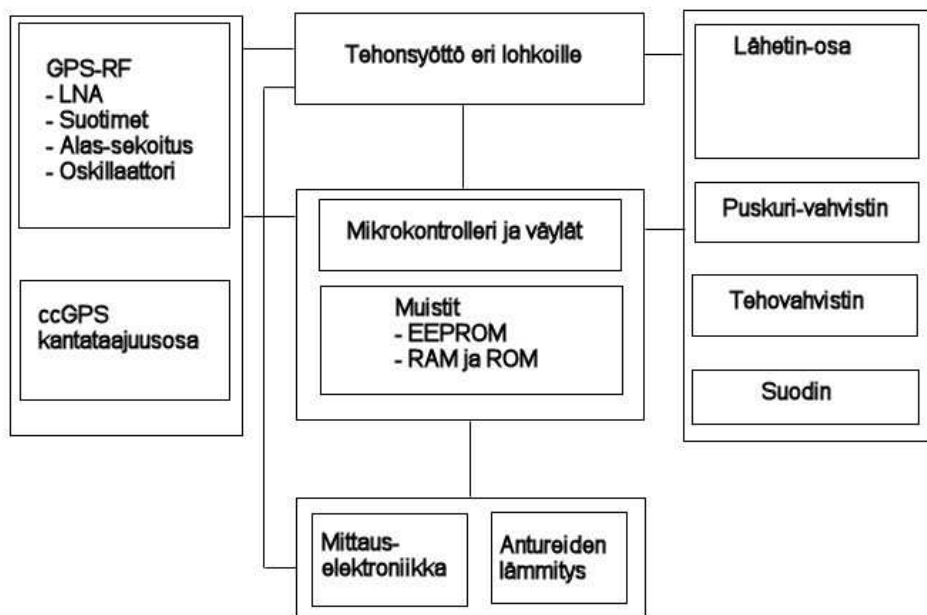
Radiosondin on kyettävä lähettämään luettavissa olevaa dataa vähintään 200 kilometrin päähän maa-asemalle. Radiosondin lähettimen on oltava riittävän tehokas, jotta näin pitkiin luotusetäisyyksiin päästään, eikä datan saantiin tule katkoksia. Koska radiosondin patterin jännitevaihtelee sekä ajan etälämpötilan funktiona, on radiosondi suunniteltavana niin, että jännitteen vaihtelut eivät aiheuta radiosondin mittaus tarkkuuden häviämistä tai liian suurta lähetystaajuuden siirtymää. Nykyisin radiosondit kuitenkin sietävät jopa merkittäviäkin käyttöjännitteen vaihteluita toiminnan häiriintymättä.

3 Radiosondinelektronikka

Tässä luvussa käsitellään radiosondin elektronikan lohkojakoja, lohkojen osia sekä niiden toimintaa ja tehtäviä. Tässä keskitytään vaihtoehtoisesti elektronikan osiin jättäen antennit, sondin kotelointi ja suojaus. Teholähde eli akku tai patteri käsitellään hyvin lyhyesti, jotta saadaan esitettyä tehonsyötön elektroninen toiminta. Anturit päätettiin jättää käsittelyn ulkopuolelle, koska siinä tapauksessa diplomaation aihealue olisi liian suuri käsiteltäväksi yhdessä diplomityössä.

3.1 Lohkojako

Radiosondista löytyy useita erilaisia toiminnallisia lohkoja. Lohkot voidaan toimintojensa perusteella jakaa viiteen erilliseen toiminnalliseen osaan, joista kullakin on oma merkittävä osansa radiosondin toiminnassa. Nämä lohkot ovat GPS, DSP ja muistit, mittaus-elektronikka, lähetin sekä tehonsyöttö. Radiosondin lohkojako on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3: Radiosondin lohkojako

Lohkojen nimet jo pitkälti kertovat mikä kunkin lohkon toiminnan tarkoituksena on. Tehonsyötön avulla säädetään sondin akusta tai paterista saatava käyttöjännite sopivaksi kullekin elektroniselle osalle. GPS:n tarkoituksena on ilmaista radiosondin sijainti satelliittien signaaleja hyväksikäyttäen. GPS-lohkon dataa käytetään myös tuulensuunnan ja voimakkuuden määrittämiseen. Mittaus-elektronikan tarkoituksena on

määrittää ilmakehän lämpötila, ilmankosteus ja ilmapaine antureilta saatavien sähköistensuureiden avulla.

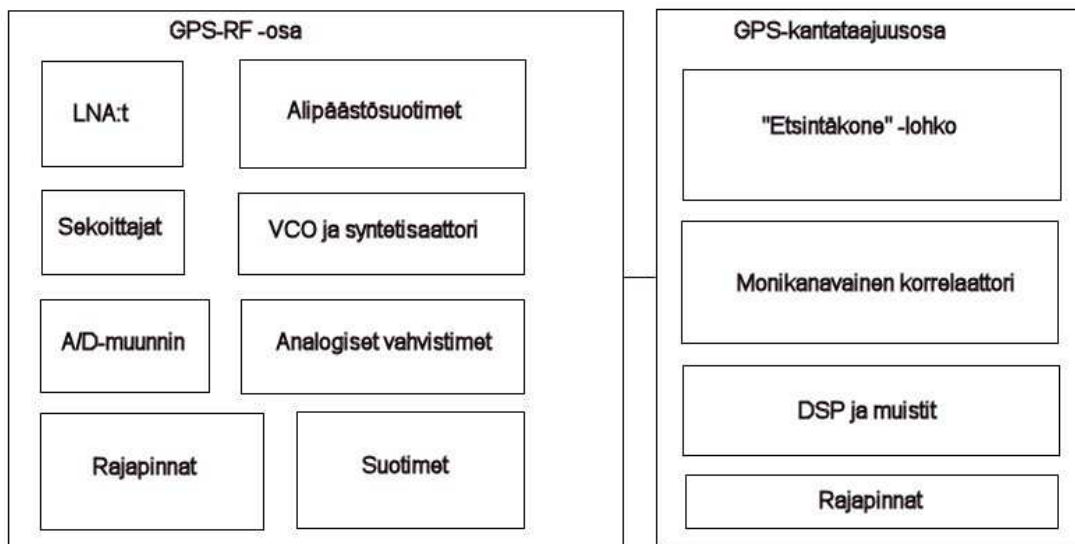
Lähettimen avulla mittauselektronikan ja GPS:n välittämät tiedot lähetetään luotausjärjestelmän maakalustolle jatkokäsittelyä varten ja muokattavaksi helposti luettavaan muotoon. Tätä kaikkea sondin toimintaa ohjaa DSP ja muistilohko antaen sondin eri lohkoille toimintakäskyt muistiin tallennetun ohjelmakoodin mukaan sekä välittäensignaali lohkoiltoisille.

3.2 Lohkojen osat, toiminnat ja tehtävät

Seuraavissa kappaleissa käydään tarkemmin läpi radiosondin eri lohkojen elektronisia perusrakenteita, toimintoja sekä tehtäviä sondin toiminnan kannalta. Tarkastelua ei kuitenkaan viedä aivan komponenttikohtaiseen tarkasteluun asti vaan tarkastelussa pyritään jakamaan toiminnalliset lohkot vielä sisäisesti pienempiin lohkoihin.

3.2.1 GPS

Vaisalan sondeissa käytetään lähinnä koodipohjaista GPS-dataa tukevia GPS-vastaanottimia, mutta myös Loran-C -verkkoa käyttäviä sondeja on, lähinnä militaarikäyttöä varten. GPS-vastaanottimen periaatteellinen lohkokkaavio on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4: GPS-vastaanottimen periaatteellinen lohkokkaavio

Radiosondin GPS-lohkon osat on yleensä jaettu kantataajuusosaan sekä RF-etuasteeseen. RF-etuaste koostuu lähinnä vahvistimesta, suotimista sekä A/D-muuntimesta, mutta sisältää myös esimerkiksi oskillaattorin sekä tarvittavat rajapinnat. Kantataajuusosasta puolestaan löytyy lohkot satelliittisignaaleiden tunnistamiseen ja

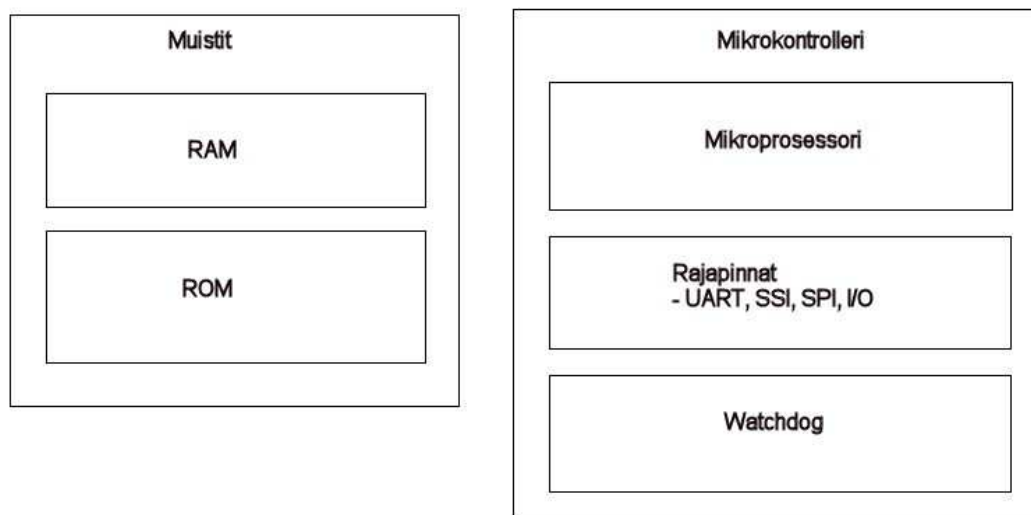
niihin lukittumiseen. Kun riittävä määrä satelliitteja on löydetty, niin sondin sijainti on laskettavissa tietyillä algoritmeilla, joko sondissa tai maakalustossa. Sondeissa käytetään yleensä koodipohjaista dataa tukevia GPS-vastaanottimia, mutta voidaan käyttää myös kooditonta GPS-vastaanotinta, mikäli tarvittava tarkkuus voidaan saavuttaa. Sondia käytetään usein hyvin häiriöisissä olosuhteissa. Jotta saavutettaisiin mahdollisimman hyvä ulkoisten RF-häiriöiden sietokyky, on antennilta tuleva signaali suodatettava matalan insertiön kaistanpäästösuotimella ennen kuin signaalia vahvistetaan. Vahvistaminen tapahtuu matalakohinaisella vahvistimella.

Mikäli GPS toteutetaan kaupallisella piirillä, niin siinä on oma mikroprosessorinsa, jonka avulla RF-etuasteen vahvistus voidaan optimoida. Prosessori käsittelee GPS-datan sopivaksi edelleen lähetykseen. Prosessori on sijoitettu GPS:n kantataajuusosan elektronikkaan.

Käytössä olevassa ratkaisussa GPS-lohkolla on kaksi toimitilaa, etsintätila ja seuranta-tila. Näillä tiloilla on erittäin suuri ero virrankulutuksessa. Etsintätilassa GPS on täydellä teholla noin 60% ajasta, kun seuranta-tilassa GPS on täydellä teholla vain noin 7% ajasta. Virrankulutuksessa tämä ero voi olla jopa noin 50 mA.

3.2.2 DSP-jamuistit

Lohko sisältää prosessorin, rajapinnat muiden lohkojen kanssa sekä ulkoista liitäntää, esimerkiksi kalibrointiajaksi kalibrointikertoimien tallennustavarten, tarvittavan määrän käyttömuistia sekä riittävästi muistia ohjelmakoodin sekä kertoimien tallennukseen. DSP-lohkon periaatteellinen lohkokaavio on esitetty näkuvassa 5.



Kuva 5: DSP-jamuistilohkon periaatteellinen lohkokaavio.

DSP-lohkon ydin on mikroprosessori, joka käytännössä ohjaa koko sondin muiden elektroniikkalohkojen toimintaa. Varsinaisen DSP:n sijasta voidaan GPS-ratkaisusta riippuen käyttää myös pelkkää mikrokontrolleria, joka ohjaa sondin toimintaa. Varsinaista digitaalista signaalinkäsittelykykyä tarvitaan, mikäli GPS on toteutettuna niin, että GPS:n kantataajuusosat ovat integroituna sondin toimintaa ohjaavan mikrokontrollerin kanssa samalle ASIC:lle. Tarvittava muistin määräkin riippuu GPS-toteutuksesta.

Mikäli GPS on toteutettuna erikseen, niin siinä on yleensä valmiiksi mukana riittävä määrä muistia GPS-datan laskentaa varten ja ulkopuolista muistia ei tarvita GPS-datan käsittelyyn, muuten kuin korkeintaan sen siirtoa varten. GPS:n toteuttaminen ulkoisena pudottaa DSP-lohkon muistin määrän puoleen, verrattuna toteutukseen, jossa GPS-kantataajuusosat olisivat integroituna yhteen DSP-lohkon kanssa.

DSP-lohko ohjaa muiden lohkojen toimintaa erilaisten liitännäväylien kautta. GPS-lohko kytkeytyy DSP-lohkon sarjavyöhykkeen kautta. DSP-lohkon mikroprosessori ohjaa GPS-datan lähettämisen synkronistussarjavyöhykkeen kautta.

Johtuen häiriöisestä käyttöympäristöstä, DSP-lohko on löydettävä myös niissä olosuhteissa, joissa vahtikoira-funktio, joka huolehtii sondin nollauksesta ja uudelleen käynnistyksestä, mikäli sonni on jumittunut liian suuresta häiriöstä, esimerkiksi vahvasta tutkasignaalista, johtuen. Tämän toiminnon ansiosta sondin lähettämään dataan ei tule kuin muutaman sekunnin katkos.

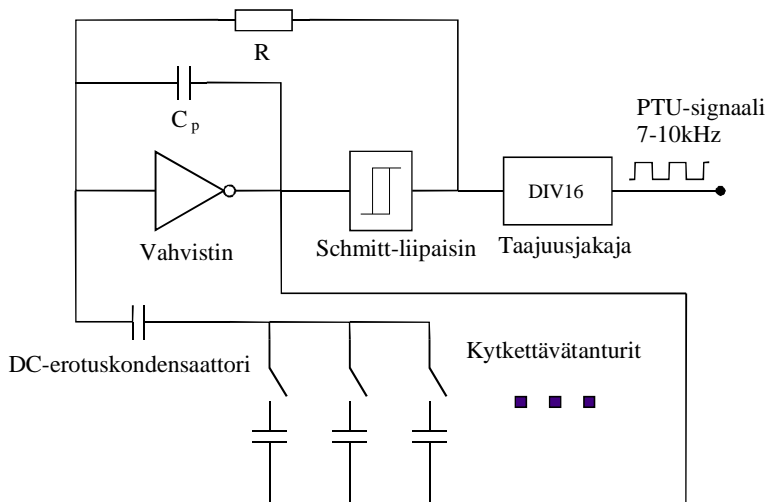
3.2.3 Mittauselektroniikka

Mittauselektroniikan avulla saadaan selvitettyä ilmakehän olosuhteista lämpötila, ilmankosteus sekä ilmanpaine. Mittauselektroniikka voi perustua joko kapasitiivisiin tai resistiivisiin mittauksiin. Kapasitiivisen mittauksen käyttö perustuu antureiden kapasitanssien muutoksiin lämpötilan, ilmankosteuden ja ilmanpaineen vaikutuksesta. Jokaistamittattavaa suurentaakohtisissa sondissa on oma anturinsa.

Mittauselektroniikan toteutukseen on olemassa monia erilaisia vaihtoehtoja. Yksinkertaisimmillaan toteutus voisi koostua operaatiovahvistimesta, vastuksesta, kytkimestä sekä mitattavista antureista, mukaan lukien referenssianturi tai –kondensaattori. Vaisalansondeissa käytössä on hieman monimutkaisempi toteutus.

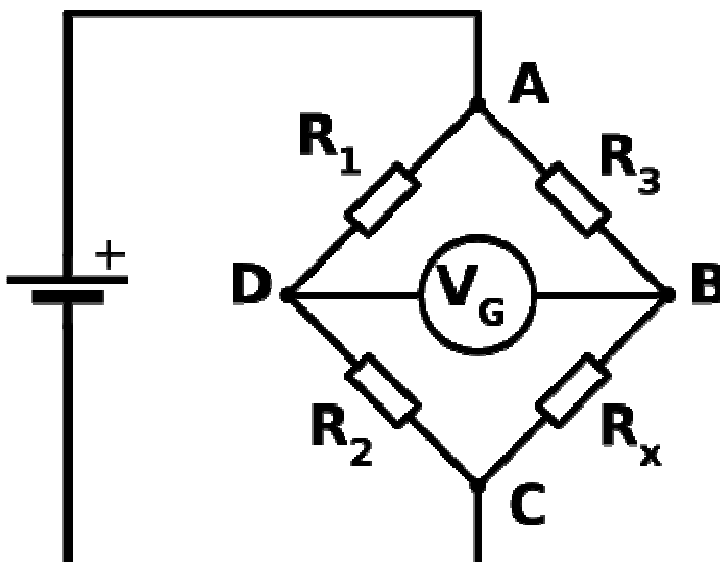
Käytössä olevassa mittausmenetelmässä käytetään mittamuunninta, joka muuntaa anturin kapasitanssin muutokset taajuusmuutokseksi. Tähän muunnokseen käytetään tällä hetkellä ASIC-piiriä. Piirin toiminta perustuu oskillaattoriin, joka muodostuu operaatiovahvistimesta ja Schmitt-liipaisimesta sekä näiden takaisinkytkennästä. Oskillaattorin taajuus riippuu vahvistimen takaisinkytkentään yhdistetyn kondensaattorin kapasitanssista. Mitattavat anturit kytetään vuorotellen vakiokondensaattorin, C_p ,

rinnalle. Vakiokondensaattorin arvo on valittu niin , että kun sen rinnalle kytketään anturi, jonka kapasitanssi vaihtelee välillä 0-10pF , niin oskillaattorin taajuus vaihtelee välillä 7-10kHz. Vaisalan kapasitanssinmittauspiiri n toimintaperiaate on esitettyä kuvassa 6. Kuvassa 6 oleva PTU-signaali sisältää ti edon paineesta, lämpötilasta sekä kosteudesta.[4]



Kuva6:Kapasitanssimittauspiirintoimintaperiaate. [4]

Mittauselektronikka voi perustua myös resistiiviseen mittaustekniikkaan. Yksi esimerkkiresistiiviseenmittaukseenkäytettävissä olevastasiltakytkennästä,niinsanottu Wheatstonensilta,onesitettyäkuvassa7.



Kuva7Wheatstonensilta-kytkentä[5]

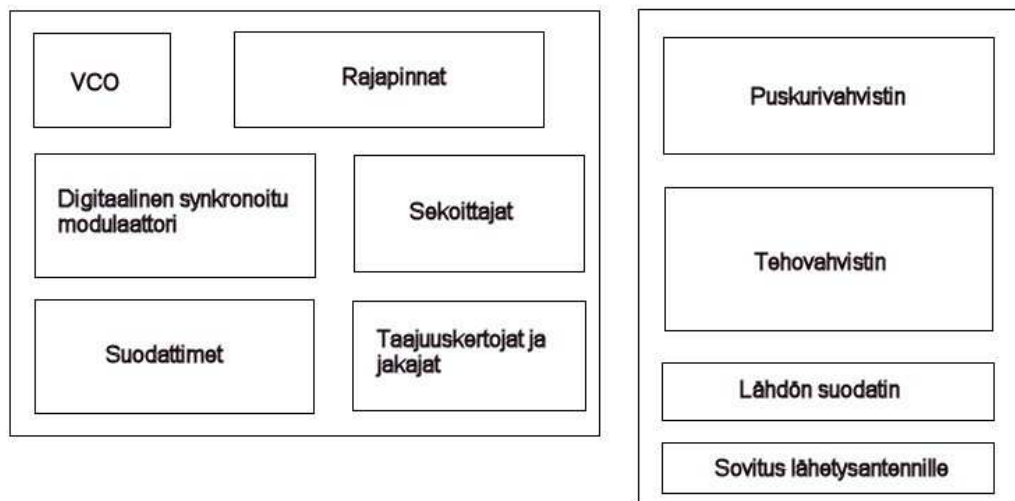
Resistiivisessäanturimittauksessamitataanjokovi rtaataijännitettäsilta-kytkennässätai jakajassa. Yksinkertainen resistiivinen anturi on t ermistori. Termistorin resistanssi

muuttuu lämpötilan funktiona, joten termistorin yli olevan jännitteen tai sen läpi kulkevan virran muutoksesta voidaan päätellä lämpötila. Termistoreja käytettäessä on huomioitava se, että mikäli termistorin läpi ajetaan liian suurta virtaa, niin se lämpenee virran vaikutuksesta, eikä enää kerro ympäristön lämpötilaa.

Wheatstonen-sillan toiminta perustuu epäsymmetriaan, joka aiheuttaa sillan yli jännitteen. Mitattava anturi on kytkettynä yhteen sillan haaroista ja muiden vastusten arvot tarkastiedossa. Mitatusta jännitteestä on laskettavissa anturin resistanssi.

3.2.4 Lähettin

Lähettimenä käytetään meteorologialle varatuilla 400-406 MHz tai 1680 MHz taajuuksilla toimivaa lähetintä. Lähettimen taajuus säädetään halutuksi aina ennen luotausta. Sondeissa käytetään sekä analogisia että digitaalisia lähettäimiä. Nykyinen suuntaus on kohti digitaalisia lähettäimiä, koska digitaalisella moduloinnilla saavutetaan huomattavia etuja analogiseen modulointiin verrattuna. Näitä etuja ovat digitaalisesti moduloidun signaalin huomattavasti helpompi ja varmempi virheenkorjaus, joka johtaa varmempaan mittausdatan saantiin, sekä se että digitaalisesti moduloidulla signaalilla saadaan lähetteen kaistanleveys kapeammaksi, jolloin voidaan tehdä useampia luotauksiasamaan aikaan lähetteiden häiritsemättä toisiaan. Radiosondin lähettimien on oltava ETSI:n standardien mukaiset. Radiosondin lähettimen periaatteellinen lohko-kaavio on esitetty näkuvassa 8.



Kuva 8: Lähettimen periaatteellinen lohko-kaavio.

Lähettimen lohkoon kuuluvat modulaattori, D/A-muunnin, oskillaattori, sekoitin, esivahvistin sekä tehovahvistin. Sondin lähettimen tehovahvistuksen on oltava riittävän suuri, jotta haluttu datan saatavuus varmistetaan. Vahvistusta määritettäessä on

huomioitava erilaisten muiden radiotaajuussignaalien, erityisesti tutkasignaalien, aiheuttamien häiriöiden voimakkuus.

Nykyisissä lähetyksissä käytetään pääasiassa videoskillaattoreita, jotta varmistetaan hyvä taajuuden vakaus luotauksen aikana. Hyvä taajuuden vakaus radiosondinkäsittelyssä ennen luotauksen aloitusta on ensiarvoisen tärkeää.

400MHz taajuusalueella yleisimmin käytettyjen radiosondien lähetystehot ovat alle 200mW. 1680MHz taajuusalueella yleisimmin käytetty lähetysteho on noin 330mW. Lähettimen käyttämä modulaatio vaihtelee radiosondin tyypistä riippuen, modulaation ollessa kuitenkin lähes aina digitaalinen, koska sillä saadaan data varmin perille virheettömänä.

Tulevaisuutta ajatellen on huomioitava käytettävien taajuusalueiden rajallisuus ja se, että lähetyksissä käytettävät taajuuskaistat tulevat kapeamman käyttöpaikasta riippuen. On hyvin todennäköistä, että radiosondin lähettimen sallittu lähetystaajuuskaista tulee olemaan 5-200kHz välillä paikasta riippuen. Tämä asia on huomioitava radiosondien suunnittelussa.

3.2.5 Tehonsyöttö

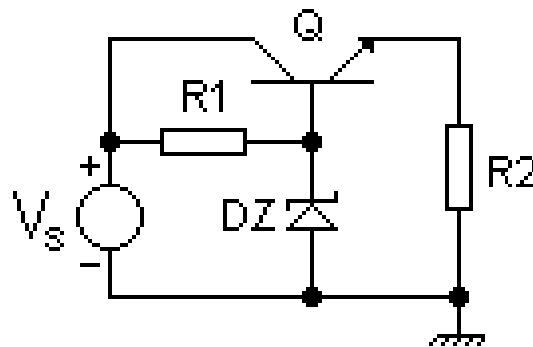
Tehonsyöttökin on sijoitettu omaksi lohkokseen, koska sillä on oma toiminnallinen tehtävänsä eläinsyöttöä oikeanlaiset käyttöjännitteet piireille. Tämä toteutetaan tavallisesti lineaarisilla regulaattoreilla. Regulaattoreita tarvitaan useita, koska kaikki piirit eivät toimi samalla käyttöjännitteellä. Usein eri lohkoilla on omat regulaattorinsa. Tehonsyöttöä käsiteltäessä tulee huomioida, että vaikka jännitelähteenä on 9V paristo, niin pariston jännite alenee simuloinnin perusteella olosuhteiden vaikutuksesta jopa 5,7 volttiin.

Radiosondin pattereiden tulee olla riittävän takaamaan radiosondin toimintaluotaukseen tarvittavaksi ajaksi kaikissa ilmakehän olosuhteissa. Radiosondin patterin on kyettävä toimittamaan riittävästi virtaa jopa kolmen tunnin ajaksi, koska luotauksiin voi tulla viivästyksiä ja lisäksi luotaukset voivat kestää jopa kaksi tuntia. Pattereiden on oltava niin keveitä kuin käytännöllisestikin mahdollista ja niillä tulisi olla pitkä varastointi-ikä. Lisäksi pattereiden tulisi olla ympäristön kannalta turvallisia käytön jälkeen. Radiosondeissa käytetään kahdentyyppisiä pattereita, joko niin sanottuja ”kuivasolu”-pattereita tai vesiaktivoidun pattereita.

Kuivapattereiden etuna on se, että ne ovat helposti ja edullisesti saatavissa niiden suuren maailmanlaajuisen volyymin takia. Niiden haittapuolena vesiaktivoiduissa pattereissa niiden on kuitenkin niiden lyhyempi elinikä sekä suurempi jännitteen vaihtelu käytössä.

Vesiaktivoitujen pattereiden etuna on niiden pitkä varastointiaika. Käytössä niiden etuna on se, että patterin sisäiset kemialliset reaktiot tuottavat sisäistä lämpöä ja näin ollen radiosondi ei tarvitse niin merkittävää lämpöeristystä ja lisäksi tämä sisäinen lämpö auttaa stabiloimaan radiosondin elektronikan lämpötilaa luotauksen aikana. Haittapuolena on kuitenkin se, että nämä patterit eivät ole laajassa massatuotannossa, vaan ne ovat usein radiosondivalmistajien itse valmistamia tuottamia. Tämä tieteenkin nostaa pattereiden hintaa.

Sopivien käyttöjännitteiden säätämiseksi voidaan käyttää esimerkiksi lineaarisia regulaattoreita. Lineaaristen regulaattoreiden toiminta perustuu joko aktiivisiin laitteisiin, kuten bipolaaritransistoreihin tai kanavatransistoreihin, joita käytetään niiden aktiivisella alueella tai sitten passiivisiin komponentteihin, kuten zener-diodeihin, joita käytetään läpilyöntialueella. Reguloiva laite laitetaan toimimaan muuttuvana vastuksena, jonka arvo vaihtelee koko ajan, jotta ulostulojännite saadaan pysymään vakiona. Kuvassa 9 on esitetty yksinkertainen versio transistorin ja zener-diodin avulla toteutetusta sarjaregulaattorista.



Kuva 9: Yksinkertainen sarjaregulaattori [6]

4 Radiosondinelektroniikanerilaisettoteutustavat

Tässä luvussa käydään läpi tekniset spesifikaatiot, jotka radiosondin on täytettävä. Nämä spesifikaatiot perustuvat pitkälti nykyisiin radiosondin spesifikaatioihin, mutta joitakin muutoksiakin on tehty. Lisäksi luvussa on selvitetty radiosondin elektroniikan erilaisia toteutustapavaihtoehtoja. Toteutustapavaihtoehtojen yhteydessä esitetyistä lohkoista on jätetty tehovahvistin tarkastelun ulkopuolelle, koska se ei toisinaan lisää arvoa eri vaihtoehtojen välille, vaan se löytyisi erillisenä jokaisesta toteutuksesta.

4.1 Radiosondinspesifikaatiot

Työssä lähdettiin liikkeelle radiosondin teknisten spesifikaatioiden määrittämisellä. Spesifikaatiot määriteltiin työryhmässä, joka koottiin työtä aloitettaessa. Jokaiselle sondin lohkolle määritettiin erilliset spesifikaatiot, jotka lohkon tulisi vähintäänkin täyttää. Tarvittaessa näistä spesifikaatioista voidaan joustaa, mikäli joustolle löytyy jokin merkittävä peruste, kuten huomattavasti edullisempi hinta. Joissakin lohkoissa spesifikaatiot, kuten esimerkiksi lähettimen taajuusalue, ovat suoraan eri standardin määrittämiä, joten niissä joustoa ei ole.

Lisäksi joihinkin arvoihin määriteltiin myös erillisiä tavoitearvoja, joihin olisi syytä pyrkiä. Nämä tavoitearvot on merkittävissä spesifikaatio taulukoissa sulkeidensa sisällä. Näistä tavoitearvoista esimerkkinä mainittakoon patterin jännite, joka on nykyisessä sondissa 9V, mutta tavoitteena olisi pienentää sondin virrankulutusta ja näin ollen pyrkiä pienempään patteriin jaksitakauttamiseksi myös pienempään sondin kotelon kokoon. Tämä aiheuttaa sen, että lohkojen käyttöjännitteet pyritään saamaan pieniksi. Lisäksi spesifikaatioihin on määriteltävä myös joitain ominaisuuksia, kuten kyky resistiivisiin mittauksiin.

4.1.1 GPS

GPS-lohkon tärkeimpinä kriteereinä ovat koodipohjainen dataa tukevan GPS-vastaanottimen käyttö sekä GPS-vastaanottimen tehon kulutuksen pysyminen keskiarvoltaan alle 100 milliwatin. Myös koodittoman GPS-version käytön mahdollisuus määritetään, kun tutkitaan, edullisempi vaihtoehto on joko suorituskyvyltään heikomman sondin vaihtoehto.

Sondin on käynnistytävä vähintään 45 sekunnissa. Tämä vaatimus täyttyy suuresta osasta kaupallisiakin GPS-ratkaisuja. Radiosondin käytössä olisi kuitenkin etua GPS:n nopeammasta käynnistymisestä, 45 sekunnin sijasta 30 sekunnissa. Tällainen ratkaisu olisi helpoimmin saatavilla suunnitteleamalla ja teettämällä itse tai alihankintana haluttuunlainen GPS-lohko.

Vastaanotetun datan käsittelyn paikkaa ei ole rajattu vaan se voidaan suorittaa joko sondissa tai maakalustossa, riippuen siitä kumpi vaihtoehtoista olisi kustannuksiltaan pienempi ja helpommin toteutettavissa. Lisäksi erilliset datansiirtoväylät on määritelty, mutta ne riippuvat hyvin paljon siitä millä tavalla GPS-lohko on toteutettu. GPS-RF-osansisääntulon on oltava sovitettu 50 ohmiin.

GPS-lohkon tekniset spesifikaatiot on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1: GPS-lohkon spesifikaatiot

Tekniikka	ccGPS
Kylmästartti	<45s (mieluiten <30s)
Tehonkulutus	<100mW (keskiarvo)
Paristoback-up	Ei
Laskenta	Sondissa taikka maakalustossa
Suotimen konfiguroitavuus	
Rajapinnat:	
- Kellosignaali	
- Väylä IF-signaaleille	4bit väylä (riippuen toteutuksesta)
- väylä konfigurointiavarten	SSI/SPI
- väylä datansiirtoavarten	(riippuen toteutuksesta)
- RF-sisääntulo 50 Ω antennille	

4.1.2 DSP

DSP-lohkon spesifikaatioiden lähtökohtana on ollut nykyisin käytössä oleva toteutus, johon on lisätty osio, joita uudelta lohkolta halutaan verrattuna nykyiseen. DSP-lohkon prosessorin on oltava vähintään 16-bittinen ja kellotaajuuden oltava vähintään 20 MHz, jotta sondin riittävän nopea suorituskyky saadaan varmistettua. Lisäksi käyttöjännitteen on oltava korkeintaan 3,3V. Tämä spesifikaatio on helppoa toteuttaa nykyisellä teknologialla, koska suurin osa kaupallisestikin valmistettavista DSP-piireistä täyttää tämän käyttöjännitevaatimuksen.

Taulukosta 2 on helposti nähtävissä, että valittavalla elektronikan toteutuksella on merkittävä vaikutus DSP-lohkon tarvitseman käyttömäärän määrään. Käyttömäärän määrän riippuusiitä onko GPS-lohko toteutettu naomalla mikroprosessorilla ja muisteilla vai onko ratkaisu sellainen, että sondin elektronikka sisältää vain yhden mikroprosessorin, joka ohjaa sondin toimintaa ja käsittelee GPS-dataa.

Erilaisia rajapintoja tarvitaan paljon. Synkronisia väyliä on oltava sekä vakionopeuksisina että ohjelmoitavina. Lähettimen sarjaväylän nopeus riippuu lähettimen lähetyksenopeudesta. Vapaita I/O paikkoja on oltava vähintään 16, jotta kaikki tarvittavat toiminnot saadaan varmasti toteutettua. Tähän sisältyy jo joidenkin ”extra-ominaisuuksien” käyttömahdollisuus. GPS-kytkentäväarten on oltava oma rajapintansa.

Tämä rajapinta riippuu GPS-toteutuksesta. Lisäksi on oltava kytkennät mittauselektronikan taajuuslaskuriasekä A/D-muunnintavarten.

Muista vaatimuksista merkittävin on se, että DSP-lohkosta on löydettävä niin sanottu vahtikoira-toiminto. Tällä toiminnolla sondin toiminta turvataan myös erittäin häiriöisissä olosuhteissa. Vahtikoiran tehtävänä on havaita mikäli sondin toimintaan tulee häiriöitä tai että sondin toiminta jumiuu. Havaittuaan tällaisen tilanteen vahtikoira nollaa sondin elektronikan ja käynnistää sondin uudelleen. Tällä tavalla sondin lähettämään dataan ei tule kuin muutaman sekunnin katkos ja luotaus voidaan suorittaa onnistuneesti loppuun asti.

DSP-lohkonspesifikaatiot esitettyinä taulukossa 2.

Taulukko 2: DSP-lohkonspesifikaatiot

Proessori:	
-Bittien lukumäärä	16
-Kellotaajuus	>20MHz
-Käyttöjännite	≤3.3V
Muistit:	
-RAM	128-512kbit (riippuen mm. GPS-toteutuksesta)
-ROM	192kbit
-Tarvittava ulkoinen muisti	128-256kbit (riippuen mm. GPS-toteutuksesta)
Liikenne-rajapinnat:	
-Synkroninen sarjavyölä (lähettimelle)	Nopeus 2.4 tai 4.8kbit/s
-synkroninen konfiguroitava SPI/SSI	Nopeus ≥500kbit/s (mieluiten 1Mbit/s) Min 1, mieluiten 2
-UART	Nopeus ≥19200 baud Min 1, mieluiten 2
-Vapaata I/O	16bit
-Vyölä GPS-kytkentävarten	(Riippuen toteutuksesta)
-Laskuri-kytkentä	Taajuus: 5-100kHz
-A/D muuntimen kytkentä	
-C-kytkentä	(Riippuen toteutuksesta)
Vahtikoira-toiminto	Kyllä
Matikkakirjasto	mieluiten äänkelluvan pisteen laskenta
Mahdollisuus C-kielen käyttöön	kääntäjät/virheenkorjaus
Kello-signaali	

4.1.3 Lähetin

Lähetimen tekniset spesifikaatiot perustuvat ETSI:n standardeihin. On kuitenkin huomattava, että diplomityön aloituksen aikaan korkeampi 1680MHz alueen standardi oli juuri määrittely/muutosvaiheessa. Lähetintä valittaessa on huomioitava se, onko

lähetin käytettävissä molemmilla taajuusalueilla vain onko valittava erikseen lähettimet eritaajuusalueille.

Radiosondeissa käytettävä taajuusalue riippuu hyvin paljon radiosondin käyttöpaikasta. Paikoissa, joissa on voimakkaita ylätaajuuksia, joissa radiosondin siirtymät ovat suuria ja kaasupallon nousu hidasta, käytetään useimmiten 400 MHz taajuusalueita [7], koska se takaa varmemman radioyhteyden maan- asemalle kuin 1680 MHz [8] alueen käyttö. Lähettimenspesifikaatiot on esitetty näytaulukossa 3.

Taulukko 3: Lähettimenspesifikaatiot

Taajuuskaistat	400,14-406MHz	1668,4-1690MHz
Taajuusvirhe	±20kHz	±100kHz
Modulaatio	Avoim(dig.)	Avoim(dig.)
Lähetyksenopeus	Max4800bit/s	Max4800bit/s
Lähetysteho	Min60mW Max200mW	Min150mW Max1500mW
Vahvistus	Riittävä, jotta vähintään 60mW tehotaso saavutetaan	Riittävä, jotta vähintään 150mW tehotaso saavutetaan
Spektrin tehotasot:		
Taajuus(kHz) suhteessa kantoaaltoon sekä näitä vastaavaksi suhteelliset maksimitehot 1kHz kaistanleveydellä	±50-100-34dBc ±100-200-40dBc ±200-300-48dBc	±400-600-30dBc ±600-800-40dBc ±800-1000-48dBc
Häiriölähteiden tehotasot toimintatilassa:		
47-74MHz	200nW	200nW(-37dBm)
87,5-118MHz	200nW	200nW(-37dBm)
174-230MHz	200nW	200nW(-37dBm)
470-862MHz	200nW	200nW(-37dBm)
862-1000MHz	1µW	1µW(-30dBm)
>1000MHz	1µW	20µW(-17dBm)
Häiriölähteiden tehotasot valmiustilassa	20µW	20µW(-17dBm)
Sammutustoiminto	Kyllä	Kyllä
Liikenne rajapinnat:		
-Synkroninensarjavyöry	2,4tai4,8kbit/s	2,4tai 4,8kbit/s
-Konfigurointi SPI/SSI/UART		
Vahvistimen ohjaus I/O(on/off)		
-Kellosignaali		
Standardi	ETSIEN302054-1	ETSIEN302454

Paikoissa, joissa ylätaajuuksia eivät ole voimakkaita, käytettävä taajuusalue päätetään useimmiten sen perusteella millä tavoin ylätaajuuksien voimakkuus määritetään. Kun

ylätuulen määrittämisessä käytetään radiotheodoliitteja ja tai jäljitysantenneja, valitaan useimmiten 1680MHz taajuusalue. 1680MHz taajuusalue on yleisimmin käytössä militaaripuolella. Muusatapauksessa käytetään useimmiten 400MHz taajuusaluetta.

Standardi asettaa rajat lähettimen taajuusvirheelle. 400MHz alueella taajuusvirheen on oltava rajoissa $\pm 20\text{kHz}$ ja 1680MHz taajuusalueella rajoissa $\pm 100\text{kHz}$. Lähetyksenopeus on maksimissaan 4,8kbit/s. Tätä suurempi lähetyksenopeus ei ole tarpeen, koska riittävä sondin mittaus tarkkuus saavutetaan tuolla lähetyksenopeudella ja suuremmalla lähetyksenopeudella ei enää saavutettaisi mitään lisä arvoa sonditoiminnan jatkuvasti tarvittavan mittausdatankannalta.

Lähettimen modulaatiota ei ole haluttu rajata johonkin tiettyyn modulointitapaan. Rajaus on tehty ainoastaan siihen, että moduloinnin on oltava digitaalinen. Tarvittava lähetyksen teho riippuu hyvin paljon siitä kuinka häiriöisessä ja tuulisessa ympäristössä sondia käytetään. Määritetyllä minimitteholla kuitenkin pitäisi toimia, mutta datan saanti ei ole kovin varmaa, joten käytännössä lähetyksen teho kannattaa määrittää 400MHz taajuusalueella lähemmäs sallittua ylärajaa. Teho vahvistimelle ei ole asetettu muuta rajoitusta kuin se, että sen vahvistuksen on oltava riittävä takaamaan sondin suorituskyky hankalissa olosuhteissa.

Spektrin ja häiriölähteiden tehotasot ovat suoraan standardien määrittämiä, joten ylärajoihin ei voi vaikuttaa. Lähettimellä on oltava vaniinsanottusammutustoiminto, jolla lähetin saadaan sammutettua luotauksen päätyttyä. Lähettimellä on oltava synkroninen sarjaväylä DSP-lohkolta tulevan datan siirtoon, konfiguroitava sarjaväylä, I/O-portti tehovahvistimen päälle/pois-kytkentää varten sekä omaväylä kello signaali varten.

4.1.4 Mittauselektronikka

Mittauselektronikan spesifikaatioita määritettäessä lähdettiin liikkeelle pitkälti nykyisen laitteen spesifikaatioista, mutta tiettyjä parannuksia pyritään hakemaan, erityisesti käyttöjännitteen osalta, joka pyritään saamaan pienemmäksi, jotta olisi mahdollista käyttää pienempiä paristoja. Täysin uutena asiana yritetään selvittää miten mittauselektronikkaan olisi mahdollista sisällyttää kapasitiivisen mittauksen lisäksi tai tämän vaihtoehdon resistiivisen mittaus.

Vaisalan radiosondeissa käytetään kapasitiivisia antureita, joiden kapasitanssi vaihtelee välillä 0-10pF. Mitattava kapasitanssialue on määritetty kapasitiivisten antureiden sekä referenssikondensaattoreiden rinnankytkennästä. Kun referenssikondensaattorin korkein kapasitanssiarvo on 10pF, saadaan mitattavan kapasitanssialueen ylärajaksi 20pF, koska rinnan kytkettyjen kondensaattoreiden kapasitanssi on kapasitanssien summa. Mittausaajuus on 50-100kHz.

Mittauselektroniikan lämpötila-alueen on ulotuttava 70 celsiusasteesta vähintään -40 celsiusasteeseen. Tavoitteena olisi saada mittausel ektroniikka kalibroituja jopa -90 celsiusasteeseensaakka. Käyttöjännitesaaollamak simissaa5V, muttamieluiten välillä 1,8-3V, jottapienemmänkuin9Vakunkäyttöolisim ahdollista. Mittauselektroniikkaan onsisällytettävämyös16bittinenA/D-muunnin, jot tamittaussignaalisaaadaan siirrettyä eteenpäin vähemmän häiriöille alttiissa digitaalise ssa muodossa. Uutena asiana spesifikaatioihin lisättiin resistiivisen mittaukse n käyttömahdollisuus, mutta diplomityön laajuuden vuoksi tuon mittauksen tutk imus jouduttiin valitettavasti jättämään hyvin vähäiseksi. Mittauselektroniikan sp esifikaatiot on esitetty nä taulukossa 4.

Taulukko4: Mittauselektroniikan spesifikaatiot

Mitattavakapasitanssialue	0-20pF
Referenssikapasitanssit	0pF, 10pF
Mittaustaajuus	50-100kHz
Lämpötila-alue	+70...-40(kalibrointi-90?)
Jännitteet	max5V(tavoite1.8-3V)
A/Dmuunnin	16bit
Uutta:	
Mitattavaresistanssialue	
Rajapinnat:	
-Väylätaajuudensiirtoon	
-I/O-portitHumicaplämmitykseen	
-I/Oreset-signaalille	
-I/Osensorinvalintaavarten	
-SuoraC-kytkentä	(Riippuentoteutuksesta)
-DatasiirtoSSI/SPI/UART	(Riippuentoteutuksesta)

Mittauselektroniikalle tarvitaan myös useita eri ra japiintoja. Taajuussignaalin siirtoon tarvitaan oma väylänsä. I/O-portteja tarvitaan rese t-signaalille, antureiden mittauspiirin kytkemistä varten sekä kapasitiivisten antureiden l ämmityksen ohjausta varten. Nämä rajapinnatonoltavaelektroniikantoteutustavasta riippumatta. Toteutustavastariippuvia rajapintojaovatsarjaväylädatansiirtoonsekäsuo raC-kytkentä.

4.1.5 Tehonsyöttö

Tehonsyötön spesifikaatioissa on lähdetty liikkeell e siitä, että patterin kokoa et saa kasvattaa nykyisestä 9 voltin paristosta. Tämä yhde ksän voltin käyttöjännite tarkoittaa käytännössä sitä, että muiden piirien käyttöjännitt eet eivät voi ylittää viittä voltia, koska käyttöolosuhteissapatterinantamajännitepu toaaulkoistenolosuhteidentakia5,7 volttiin.

Eri lohkoihin kuuluvien piirien tarvitsemat käyttöj ännitteet on suunniteltu toteutettavaksimuuntamalla patterinantamakäyttöj ännitejänniteregulaattoreiden avulla

oikean suuruiseksi. Piirien käyttöjännitteitä pyritään pienentämään nykyisestä toteutuksesta, jotta olisi mahdollista käyttää pienempää paristoa. Tässä on muistettava kuitenkin se, että toimintaympäristön alhainen lämpötila aiheuttaa pariston jännitteeseen alentuman, jonka on arvioitu olevan samassa suhteessa nykyisin käytössä olevan 9 voltin pariston aleneman kanssa. Tästä saadaan suhdetuoksi noin 0,64. Tätä lukua voidaan käyttää suuntaa antavana kertoimena siihen minkälaista patteria on sondissa käytettävä. Mikäli piirien käyttöjännitteet olisivat 1,8 voltia, niin tavoitteena olevan 6V patterin koon pitäisi hyvin riittää. Jos suurinta sallittava käyttöjännite on 3V, niin patterin koon olisi oltava 5-6 voltia, jotta varmistetaan käyttöjännitteen riittävyys luotauksen ajaksi. Tehonsyötön spesifikaatio on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5: Tehonsyötön spesifikaatiot

Patteri	9V(4,5)
Jänniteensyötöterilohkoille (esim. regulaattoreilla)	1.8-5V (Riippuu käytettävistä komponenteista)

4.2 Toteutusvaihtoehdot

Eritoteutusvaihtoehdot on esitetty taulukossa 6. Tutkittavien eritoteutusvaihtoehtojen yhteensä kahdeksan. Toteutusvaihtoehdot vaihtelevat kokonaan kaupallisista komponenteista valmistettavasta versiosta mahdollisimman suuren integrointiasteen omaavaan vaihtoehtoon, jossa vain lähettimen teho vahvistin sekä GPS RF-etuaste ovat ASIC:n ulkopuolella.

Taulukko 6: Toteutusvaihtoehdot

Versio	GPS RF	GPS BB	TX	ME	DSP/MK	PA
1	K	K	K	DI	K(MK)	K
2	U	A	U	U	A(DSP)	K
3	K	K	A	U	A(MK)	K
4	K	K	A	A	A(MK)	K
5	K	K	U	A	A(MK)	K
6	U	A	A	U	A(DSP)	K
7	U	A	U	A	A(DSP)	K
8	U	A	A	A	A(DSP)	K

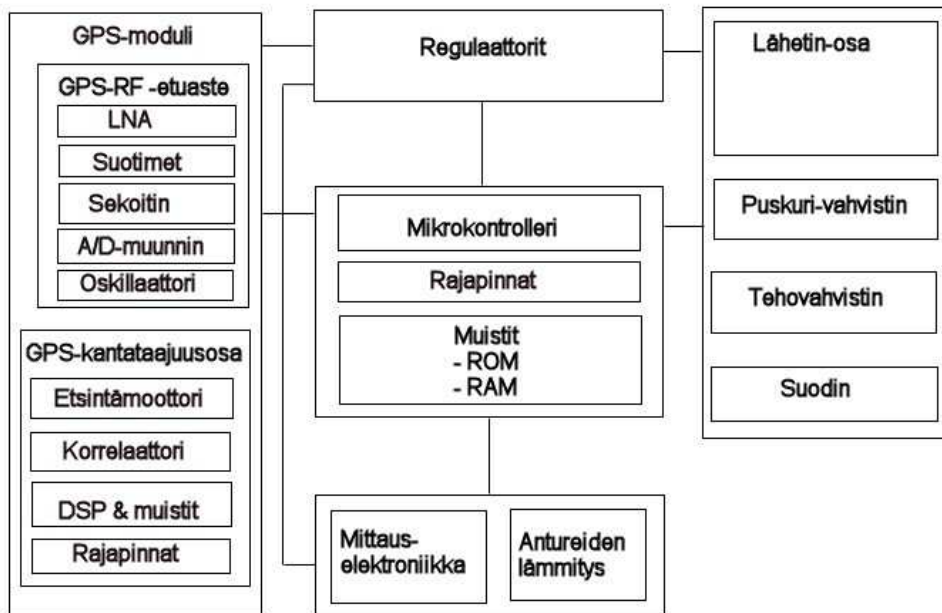
Taulukossa 6 on merkittynä jokaisen toteutusvaihtoehdon kohdalle millä tavalla mikäkin sondin lohko on toteutettuna, siis onko kyseessä kaupallisilla komponenteilla toteutettu, esimerkiksi valmis GPS-chipset ratkaisu. Muina ratkaisuvaihtoehtoina ovat ASIC-toteutus tai diskreeteillä komponenteilla toteutettu ratkaisu, esimerkiksi mittauselektronikka toteutettuna operaatiovahvistimella, kytkimellä ja kondensaattorilla.

Vaihtoehtoja läpi käydessä puhutaan mittauselektronikan osalta vain kapasitiivisesta mittauksesta. Tämä siitä syystä, että se on tällä hetkellä käytössä oleva mittaustapa ja

käytettävät anturit ovat nimenomaan kapasitiivisia antureita. Yhtä hyvin mittauselektronikkana voitaisiin käyttää resistiiviseen mittaukseen sopivia piiriratkaisuja, mutta niiden käyttö vaatisi myös pänostusta resistiivisten antureiden kehitykseen ja hankintaan. Työn laajuuden vuoksi nyt on keskitytty pohtimaan vain ratkaisujakapasitiivisen mittauksen kannalta. Seuraavaksi käydään tarkemmin läpi mitään eritoteutusvaihtoehtoja pitävissä asioissa.

4.2.1 Vaihtoehto 1

Ensimmäisenä vaihtoehtona tarkastellaan vaihtoehtoa 10, joka koostuu pelkästään kaupallisista komponenteista. Vaihtoehdon lohkokaavio on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10 Kaupallisilla komponenteilla toteutetun sondin lohkokaavio.

Tällainen toteutustapa tarkoittaa käytännössä sitä, että GPS-lohko hankitaan kokonaisuudessaan tietyltä valmistajalta joko moduulina tai "chipset"-tyyppisenä. Chipset on edullisempi kuin moduli, mutta moduli on helpokäyttöisempi, koska sitä voidaan käyttää jo sellaisenaan, kun muuhun elektronikkaan suunnitellaan riittävät rajapinnat. Chipset-ratkaisu taas vaatii enemmän huomiota myös piirilevyn suunnitteluun.

Suurin osa kaupallisista GPS lohkoista on toteutettu niin, että RF- ja kantataajuusosat ovat koteloituina erillisiin koteloihin, mutta nykyisin saatavilla on myös ratkaisuja, joissa molemmat löytyvät samankotelonsisältäjaj opasaman piirisuunnittelun sisältä, muttane ovat tällä hetkellä vielä sen verran kalliita, ette i niitä tässä huomioida. Kuitenkin

tulevaisuudessa ne tulevat todennäköisesti olemaan vartenotettava vaihtoehto radiosondikäyttöön.

Mittauselektronikkalohko toteutetaan diskreeteillä komponenteilla, koska tarvittavaa piiriä ei kaupallisilta markkinoilta suoraan löydy. Kapasitiiviseen mittaukseen käytettäviä piirejä kyllä löytyy, mutta niissä on mukana myös paljon sellaisia ominaisuuksia, joita ei radiosondissa tarvita ja nämä lisäominaisuudet nostavat piirin hintahuomattavasti, joten niitä ei oletassakaan huomioidu.

Diskreeteillä komponenteilla toteutettuna piiri on yksinkertainen toteuttaa käyttäen operaatiovahvistinta, vastusta, referenssikondensattoria sekä tarvittavia kytkimiä. Tosin negatiivisena puolena tässä on se, että muunneltavuus on sitä kautta heikko. Tarvittava kapasitanssimittaus voidaan suorittaa käyttäen taajuuslaskuria. Lisäksi mittauselektronikkalohkoon tarvitaan oma vahvistin ratkaisu, jolla toimitetaan kapasitiivisille antureille riittävästi virtaa, jotta ne pysyvät lämpiminä. Tämä lisäksi on oltava vielä 16-bittinen A/D-muunnin muuttamaan analoginen mittausdata digitaaliseen muotoon välitettäväksi mikrokontrollerin ohjaamana lähettimelle.

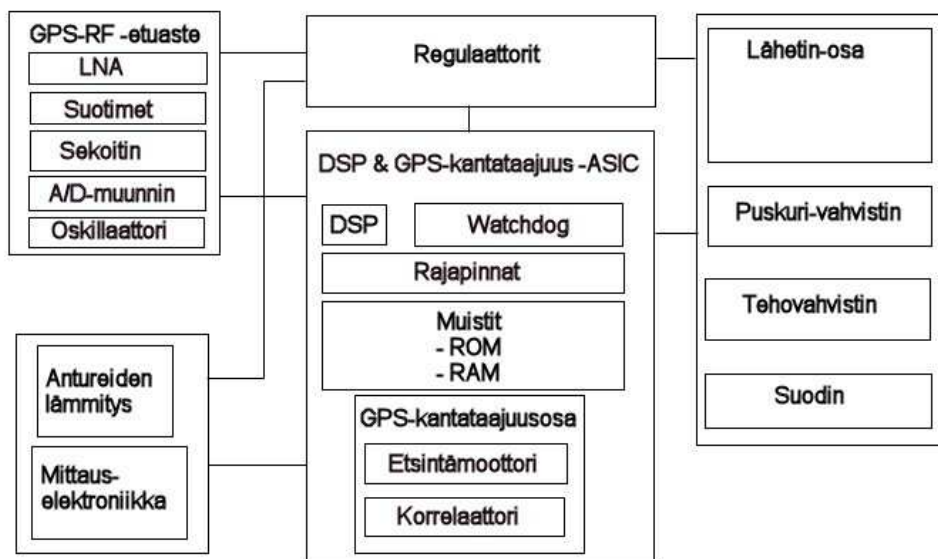
DSP-lohkon sijasta voidaan tässä toteutuksessa käyttää pelkkää mikrokontrolleria, koska GPS-lohkon kantataajuusosassa on jo mukana oma mikroprosessorinsa, joka hoitaa tarvittavan GPS-laskennan. Näin toteutettuna sondin toiminta riittää ohjaamaan mikrokontrolleri. Tällaisella toteutuksella myös mikrokontrollerin yhteyteen tarvittava muistin määrä on huomattavasti pienempi, kuin jos GPS-laskenta suoritettaisiin sondin ohjaavalla DSP-ratkaisulla. Mikrokontrollerilla on oltava riittävä määrä rajapintoja ohjaussignaaleja ja data siirtoajavälitystävarten.

Lähettimenä voidaan käyttää sopiva säädettyä kaukuspäälähetintä, jonka käytettävä taajuusalue on välillä 400-406 MHz tai vaihtoehtoisesti lähetintä, jonka taajuus on 1600 MHz:n taajuusalueella. Säätoalue vaaditaan, jotta saadaan tehokkaasti hyödynnettyä käytettävissä oleva mittausalue. Lähettimen data on oltava digitaalisesti moduloitua, jotta varmistetaan mahdollisimman hyvä datan saatavuus maan-asetalle. Lisäksi lähettimessä on oltava riittävä tehovaikutus, jotta lähetysteho on riittävä myös häiriöisissä käyttöolosuhteissa. Lähettimen toimintaa ohjaa sondin mikrokontrolleri.

4.2.2 Vaihtoehto 2

Toisen vaihtoehtona on toteutus, jossa on yksijokoitsetaali hankintanasuunniteltu ja toteutettu ASIC-ratkaisu, johon on integroitu kaksi sondin toiminnallista lohkoa sekä kaupallisia komponentteja. Tässä toteutustapavaihtoehdossa sondin GPS-lohkon kantataajuusosat sekä DSP-lohko ovat toteutettuna integroituna ASIC-toteutuksena. Samalle ASIC-piirille ovat integroituna myös muistit, joita tarvitaan sondin

toimintakoodintallentamiseen ja sondintoimintaan. Lisäksi sirulta löytyy myös riittävä määrä rajapintoja eritoimintojen ohjaamiseen ja eri lohkojen yhdistämiseen. DSP-lohko ohjaa koko sondin toimintaa ja välittää tarvittavat toimintakäskyt muille sondin lohkoille. Tällainen ratkaisu on vaativa toteuttaa ja vaatii vahvaa GPS-tekniikan osaamista piirin suunnittelijalta, koska on osattava integroida myös tarvittavat rajapinnat GPS-RF –osaa varten. GPS-RF –osan rajapintojen lisäksi tarvitaan myös väylät taajuus- ja ohjaussignaaleille mittauselektroniikka-lohkoa varten sekä omat ohjaus-, data- ja kelloväylänsä lähetin-lohkoa varten. Toteutuksen lohkoakaavio on esitetty näkuvassa 11.



Kuva 11 Toteutusvaihtoehdon 2 lohkoakaavio

GPS-RF –osa on toteutettu erillisellä piirillä. Tämä osa on lähes pakko suunnitella ja toteuttaa alihankintana juuri tällaiseen käyttötarvikkeeseen, koska olisi erittäin hankalaa hankkia GPS-RF –osa erillisenä jäsennelkseen suunnitella siihen yhteensopiva DSP-piiri johon olisi integroituna GPS-kantataajuusosa. Tällä tavalla toteutustapaa käytettäessä olisi kiinnitettävä erityishuomiota DSP-lohkon rajapintoihin, jotta välttyttäisiin suurilta ongelmilta mikäli GPS-RF –osa toimittaja avoimiksi vaihtaisiin. Piirisuunnittelutyö voitaisiin toteuttaa ulkoisesti, jotta taloon ei tarvitsisi hankkia omaa IC/layout-suunnittelijaa. Tämä vaihtoehto antaisi mahdollisuuden kilpailuttaa itse IC-valmistajia tai vaihtaa piiri valmistajaa, mikäli tulisi ongelmia esim. piirien laadun taivastavuuden suhteen.

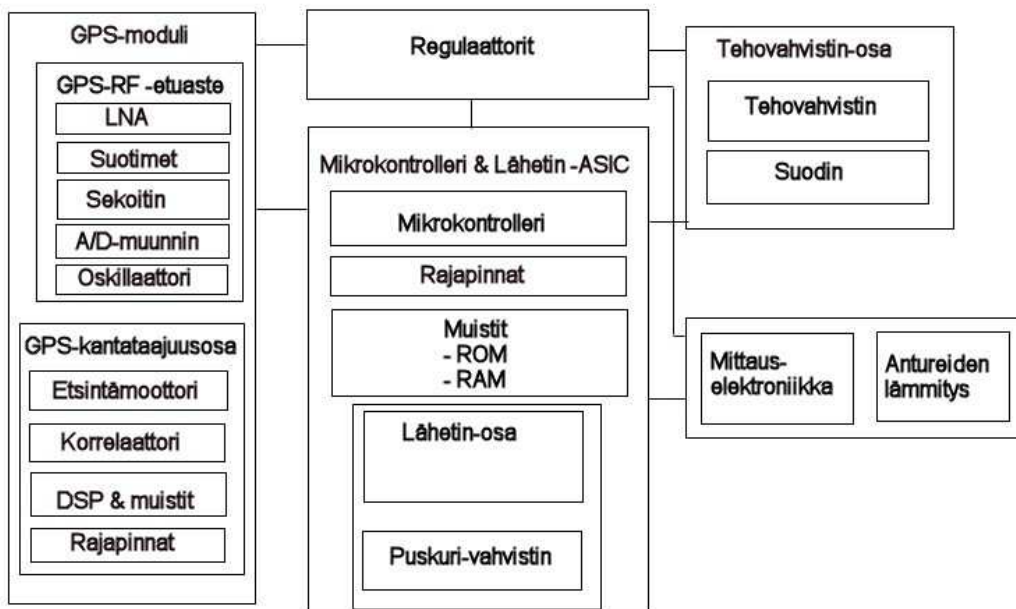
Mittauselektroniikka on toteutettu ASIC-piirinä, joka kytkee kunkin mitattavan kapasitiivisen anturin ja referenssinä toimivan kondensaattorin vuoronperään RC-piiriin. Näin muodostuu kapasitiivisen anturin kapasitanssista riippuva taajuus, joka

läheteitä radioteitsemaa-asemalle, jossa taajuudella määritetään mitattun kapasitanssin suuruus. Lisäksi mittauselektronikka-lohko sisältää myös tarvittavat vahvistinpiirit, jotka toimittavat kapasitiiviselle anturille riittävästi virtaa, jotta ne saadaan pidettynä lämpiminä. A/D-muunnin analogisen mittausdatan digitalisointiin voi olla integroituna samalle piisirulle tai vaihtoehtoisesti se voi olla toteutettuna myös sulkoisen ratkaisuna kaupallisilla komponenteilla.

Lähetin koostuu erillisestä tehovahvistimesta sekä integroidusta piiristä, joka suorittaa lähetettävän signaalin digitaalisen moduloinnin sekä lähetettävän informaation sekoittamisen lähetystaajuudelle. Lähetykseen tarvittavat käskyt sekä maa-asemalle lähetettävä mittaus- ja GPS-data tulevat DSP-piiriltä näihin tarkoituksiin varattujen rajapintojen kautta. Valittavissa on joko 400MHz tai 1680MHz taajuusalue, ei molempia.

4.2.3 Vaihtoehto 3

Kolmantenatoteutusvaihtoehtona on ratkaisu, jossa on oma mittauselektronikka-lohko. Mittauselektronikka on toteutettuna joko diskreetillä komponenteilla tai ASIC-ratkaisuna. Lisäksi ratkaisussa käytetään erillistä kaupallisesti tarjolla olevaa GPS-lohkoa sekä ASIC-ratkaisua, johon ovat integroituna mikrokontrolleri, muistit sekä lähetin. Toteutustavan lohko-kaavio on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12 Toteutusvaihtoehdon 3 lohko-kaavio

Tässä toteutustavassa GPS-lohko toteutetaan samalla tavalla kuin vaihtoehdossa 1, eli joko modulina tai chipset-tyyppisenä ratkaisuna. Valittavissa on

useampia erilaisia vaihtoehtoja ja toteutus on suhteellisen riskitön ja tarvittaessa komponenttitoimittajan vaihto onnistuu suhteellisen helposti ja suuria muutoksia toteutukseen tekemättä. Näin toteutettuna GPS-lohkon oma prosessori suoriutuu itse GPS-laskennasta ja datan käsittelystä, joten kokosonda ohjaava mikrokontrolleri tarvitsee vähemmän muistiakuintoteutustavassa 2.

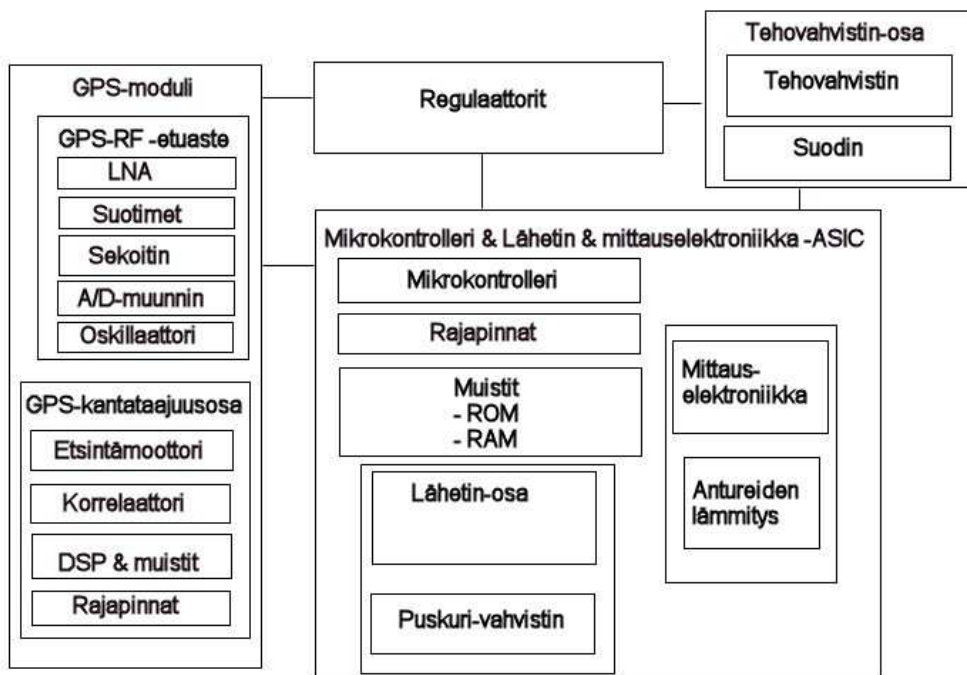
Oman hankaluutensa tässä ratkaisussa tuo lähettimen sijoittaminen samaan ASIC-ratkaisuun muistien ja mikroprosessorin kanssa. RF-osat on eristettävä riittävän hyvin digitaaliolosuhteista, jotta piirinsisäiset häiriöt saadaan minimoitua. Suunnittelijalta vaaditaan vahvaa osaamista sekä radiotaajuuspiireistä että digitaalitekniikasta. Integroidulle piirille on suunniteltava tarvittavat rajapinnat mittauselektroniikkaa ja GPS-lohkoa varten. Lähettimehövahvistinon kuitenkin toteutettuna ulkoisesti, jotta varmistetaan riittävänsuurilähetysteho.

Lähettimen taajuutena voidaan käyttää kumpaa tahansa sondikäyttöön varattua taajuusaluetta, riippuen käytettävän oskillaattorin taajuudesta. Tämän ratkaisun etuna on, että on mahdollista toteuttaa ratkaisu, jossa käytetään kertojaanostamaan 400 MHz oskillaattorin taajuus 1600 MHz käyttöalueelle, jolloin käytettävä taajuusalue on valittavissa sondin ohjelmiston kautta. Tällainen ratkaisu voisi olla hieman kalliimpi, mutta toisaalta sitä voisikäyttää kaikissa sondeissa, joten volyymin lisäsuurempijana näin syntyvällä suuremmalla volyymillä olisi hintaa pienentävä vaikutus. Tällaisessa ratkaisussa pitäisi huomioida myös se, että korkeampi taajuusalue vaatii suuremman lähetystehon kuin matalammantaajuusalueen lähetin. Elitehövahvistimen vahvistuksen on oltava säädettävissä käytetystä taajuusalueesta riippuvaksi, jotta varmistettaisiin datansaantimolemmilla taajuusalueilla.

Mittauselektronikan osalta vaihtoehtoina ovat joko diskreetti analogiaratkaisu tai vastaavanlainen ASIC-ratkaisu kuin toteutusvaihtoehdossa 2, jossa kytketään vuorotellen referanssikondensaattori ja kapasitiiviset anturit RC-piiriin ja näin syntyvä taajuus ohjataan mikrokontrollerin kautta lähettimeille maa-asetalle lähetettäväksi. Mittauselektronikkalohkoon tarvitaan myös riittävä nopea 16-bittinen A/D-muunnin, jotta mittauselektronikan tuottama taajuussignaali saadaan muutettua digitaaliseen muotoon maa-asetalle lähetystä varten. Mittauselektronikan ohjaukset tulevat sondin mikrokontrollerilta.

4.2.4 Vaihtoehto 4

Neljäntenä toteutusvaihtoehtona tarkastellaan ratkaisua, jossa on GPS-lohko kokonaan erillisenä ja toisen suurena lohkona on ASIC-ratkaisu, jolle ovat integroituna lähetin, mittauselektronikka, mikrokontrolleri sekä tarvittavat muistit. Vaihtoehdon lohkoavioonesitetynäkuvassa 13.



Kuva 13 Toteutusvaihtoehdon 4 lohkokaavio

Tässä vaihtoehdossa, kuten vaihtoehdoissa 1 ja 3, GPS-lohko voi olla toteutettuna joko modulina tai chipset-tyyppisenä ratkaisuna. Tällainen on suhteellisen riskitön ratkaisu joka tarjoaa myös riittävästi vaihtoehtoja ja kilpailua komponenttitoimittajien suhteen. Lisäksi kuten aiemmissa ratkaisuissa on jo mainittu, tällä ratkaisulla pienennetään sondin mikrokontrollerin tarvitseman muistin määrää suunnilleen puoleen.

Tässä vaihtoehdossa ASIC-ratkaisun toteutus on suhteellisen vaativa, koska samalla piisirulla on toteutettuna analogista mittauselektronikkaa, digitaalitekniikkaa sekä radiotaajuuselektronikkaa. Erityistä huomiota on kiinnitettävä siihen, ettei radiotaajuiset piirit häiritse analogista mittauslaitetta. Tämä vaatii huomattavan eristyksen lähetinlohkon radiotaajuusosien ja mittauselektronikkalohkon välille. Tällaisen ratkaisun toteuttaminen vaatii erittäin paljon osamista ja suunnittelua sekä yrityksen sisältä että alihankkijana käytettävältä piirisuunnitteluyritykseltä, koska tarkan analogiamittaus-elektronikan ja radiotaajuuselektronikan integrointi samalla piisirulle ei ole helppoa.

Mittauselektronikka voi olla tässä vaihtoehdossa toteutettuna piisirulle esim. Schmitt-kytkimen avulla RC-piirinä, niin että referenssikondensaattori ja kapasitiiviset anturit kytketään vuorotellen piiriin. Piisirulle integroitu mikrokontrolleri antaa toimintakäskyt mittauselektronikalle ja lähettimelle, joihin tarkoitetun rajapintojen kautta se siirtää GPS-lohkolta tulevan datan sekä mittauselektronikalta tulevan datan omia datavyliä pitkin lähettimelle. Lähetin moduloi datan digitaalisesti ja lähettää sen maa-asemalle.

jatkokäsittelyä varten. Myös mittaussignaalin digitaaliseksi muuntava A/D-muunnin on integroitunasirulle.

Virtalähdekapasitiivisen anturin lämmittämiseen tarvittavan virran luomiseksi voidaan toteuttaa joko integroimalla tarvittavat komponentit samalle piisirulle tai sitten ulkoisesti diskreeteillä komponenteilla toteutettuna. Tehovahvistin on toteutettu erillisenä ratkaisunariittävän lähetystehon varmistamiseksi.

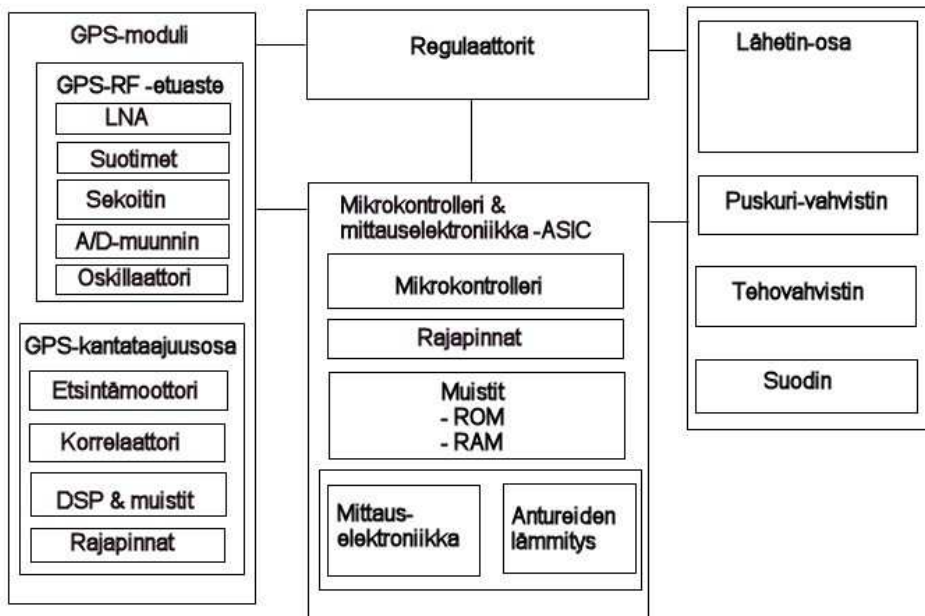
Tämän ratkaisun integrointiasteella on jo huomattava merkitys sondin elektroniikan kokoon verrattuna toteutukseen, jossa suurin osa tarvittavista joihinkin lohkoista on toteutettuna erikseen. Tällä on vaikutusta piirilevyjen kokoon ja määrään sekä sondin kotelon kokoon ja sitä kautta myös sondin hintaan. Samoin kuin vaihtoehdossa 3, tässäkin voidaan käyttää lähetinratkaisua, jossa käytettävä taajuusalue on valittavissa ohjelmoinnin kautta. Tämän ASIC-ratkaisun etuna olisi myös se, että sitä voitaisiin käyttää hyvin monissa erityyppisissä sondeissa, josta nostaisi ASIC-ratkaisun volyyymiä jäsittä kauttalaskisihintaa.

4.2.5 Vaihtoehto 5

Viidentenä toteutusvaihtoehtona on ratkaisu, jossa GPS-jälähetinlohkot ovat erillisinä. Näiden lisäksi on ASIC, jolle on integroituina mikrokontrolleri, muistit sekä mittauselektronikka.

Tässäkin toteutustapavaihtoehdossa GPS-lohko on toteutettu kokonaan omana lohkonaan, joko modulina tai chipset-ratkaisuna. Lähettimenä voidaan käyttää joko täysin kaupallista ratkaisua, jossa on mahdollisuus säätää lähetystaajuutta pienellä taajuusvälillä tai erityisesti sondikäyttöön suunniteltua lähetintä, jonka ominaisuudet on voitua suunnitella hyvin pitkälti halutunlaisiksi. Lähetintä ohjaa sondin mikrokontrolleri sarjavyöhyksen kautta. Mikrokontrolleri myös välittää mittaus- ja GPS-datan lähettimelle datavyöhykettä pitkin. Lähettimelle tarvitaan tässäkin ratkaisussa erillinen tehovahvistin, jotta varmistetaan riittävä lähetysteho. Tarvittava lähetysteho riippuu siitä käytetäänkö matalamman vaikutusalueen lähetintä.

Mikrokontrollerin, muistien sekä mittauselektronikan integroinnin ei pitäisi olla erityisen vaativa ratkaisu, eikä erityisempiä ulkoisia häiriöitä pitäisi esiintyä. Tarvittavan muistin määrä on suhteellisen pieni samoin kuin muissakin ratkaisuisissa, joissa käytetään itsenäistä GPS-lohkoa. Mittauselektronikan toteutukseen on useita eri vaihtoehtoja, joista voidaan käyttää haluttua ratkaisua, esim. Schmitt-kytkimeen tai taajuuslaskuriin perustuvaa ratkaisua, myös resistiiviseen mittaukseen tarvittavan elektroniikan käyttö on mahdollista, mikäli niin halutaan. Piirille tarvitaan omat rajapintansa kapasitiivisten antureiden mittauspiiriin kytkemistä varten sekä rajapinnat GPS-jälähetinlohkoille. Vaihtoehdon lohko-kaavio esitettyä kuvassa 14.



Kuva 14 Toteutusvaihtoehdon 5 lohkokaavio

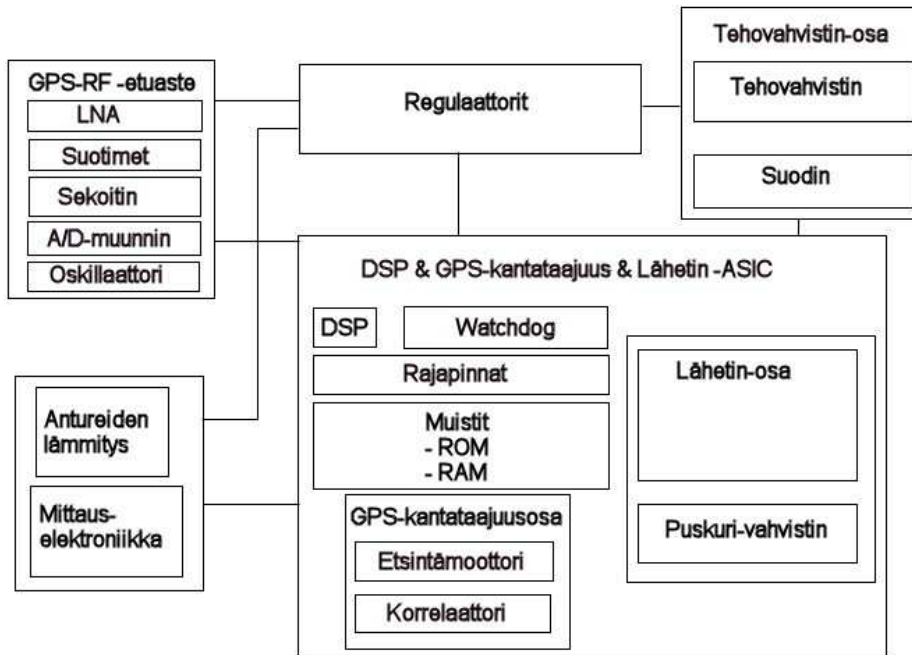
Virtalähdepiiriantureidenlämmitystä varten voi olla joko integroituna samalle piisirulle tai ulkoisena diskreetein kaupallisin komponentein toteutettuna. Tätä lämmityspiirin ohjaussignaalia varten tarvitaan oma porttinsa ASIC -sirulle. Samalle sirulle on integroituna myös 16-bittinen A/D-muunnin mittauselälektronikan mittausignaalin digitalisointiavarten.

4.2.6 Vaihtoehdot

Kuudentena vaihtoehtona tarkastellaan ratkaisua, jossa on erillisinä GPS RF - sekä mittauselektronikkalohkot. Näiden lohkojen lisäksi on ASIC-ratkaisu, jolle ovat integroituna DSP, GPSBB, muistitsekä lähetin.

Tämä toteutustapa, niin kuin kaikki toteutukset, joissa GPS-kantataajuusosat ovat integroituna muiden lohkojen kanssa, vaatii täydellistä GPS-tekniikan tuntemusta ASIC-suunnittelijalta. Lisähaasteen suunnittelijalle tuo lähettimen integrointi samalle piisirulle, koska radiotaajuusosat häiritsevät hyvin herkästi muiden osien toimintaa. Suunnittelijan on varmistettava riittävä eristys radiotaajuusosien ja piirin muiden osien välille. Radiotaajuusosien toteutuksessa käytettävä teknologia on valittava sopivaksi, jotta suunnittelussa käytettävät simulointimallit ovat riittävän tarkkoja eikä suurempia yllätyksiä simulointitulosten käytännöntoteutusten välillä pääsytymään. GPS-RF -osa pitää myös suunnitella nimenomaan tällaista ratkaisua varten erikseen, koska kaupallisen GPS-RF -osan yhdistäminen itse suunniteltuun GPS-kantataajuusosaan on

hyvin vaikeaa, mikäli rajapintojen suunnitteluun ei ole kiinnitetty riittävästi huomiota. Toteutustavanlohkokaavioonesitettyä kuvassa 15.



Kuva 15 Toteutusvaihtoehdon 6 lohkokaavio

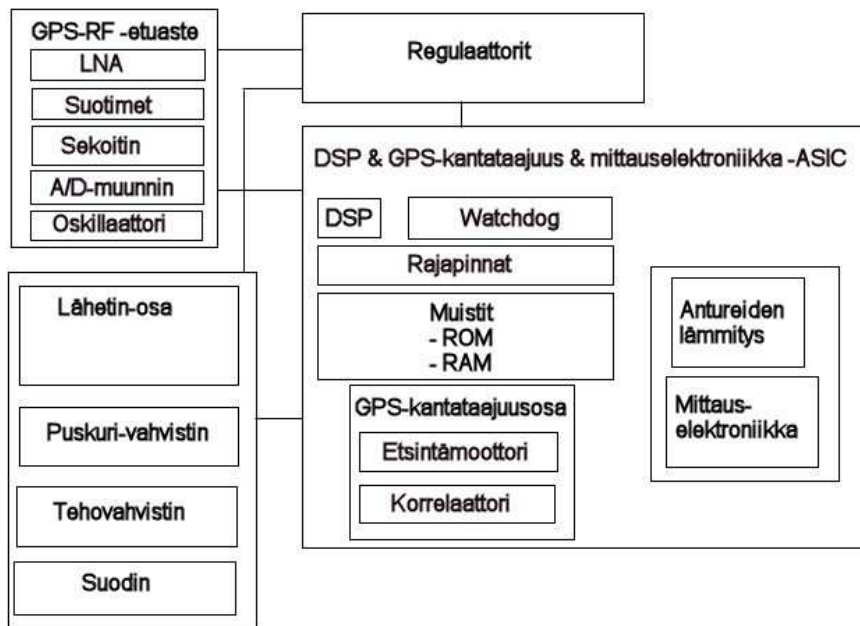
Lähetin voidaan suunnitella toimimaan joko 400 MHz tai 1680 MHz taajuusalueella, siitä riippuen kumpaa taajuutta halutaan käyttää. Kuten jo aiemmin on todettu, on mahdollista toteuttaa piiri, jolla voitaisiin ohjelmistomestron avulla päättää lähettimien toimintataajuus. Tehovahvistin on toteutettava ulkoisena ratkaisuna riittävän lähetystehon varmistamiseksi. Jätehovahvistimen vahvistuksen on oltava säädettävissä, mikäli käytetään lähetinratkaisua, jolla kumman tahansa lähetystaajuuden käyttö olisi mahdollista.

Tällaisen toteutuksen etuna on se, että GPS:n toiminta voidaan suunnitella sellaiseksi, että sillä on kaksi toimintatilaa; etsintä- ja seuranta-tila. Näitä tiloja hyväksikäyttämällä voidaan saada aikaan huomattavaa säästöä virrankulutukseen, koska satelliittien löytämisen jälkeen GPS siirtyy etsintätilasta seuranta-tilaan. Seuranta-tilassa GPS on täydellisesti toimiva ja hyvin pieniosanajasta.

Mittauselektronikka voi olla toteutettuna joko diskreetteinä komponentein toteutettuna tai jo mainittua Schmitt-kytkimellä toteutettua ASIC-ratkaisua käyttäen. Tarvittava riittävän nopea 16-bittinen A/D-muunnin voi joko olla integroituna ASIC-sirulle tai toteutettuna erillisenä kaupallisenä komponenttina. Kapasitiivisten antureiden lämmitys toteutetaan tässä ratkaisussa diskreeteillä komponenteilla toteutettavalla virtalähdepiirillä.

4.2.7 Vaihtoehto 7

Seitsemäntenä vaihtoehtona on toteutus, jossa ASIC sisältää DSP:n, muistit, mittauselektronikan sekä GPS BB -osan. GPS RF - sekä lähetinlohkot ovat erillisinä tässä ratkaisussa. Toteutuksen lohko-kaavio on esitetty näkuvässä 16.



Kuva 16 Toteutusvaihtoehdon 7 lohko-kaavio

Kuten edellisessäkin vaihtoehdossa, tässäkin GPS-kantataajuusosat ovat integroituna, joten suunnittelijalta vaaditaan vahvaa GPS-tekniikan osaamista. ASIC-toteutuksessa on kiinnitettävä huomiota rajapintoihin, jotta kaupallisten GPS-RF -osien käyttö on mahdollista. Kuten vaihtoehdoissa 6 ja 7 on sanottu, sondin virran kulutusta saadaan huomattavasti pienennettyä suunnittelemalla GPS-lohkolle kaksi erilaista toimintatilaa, etsintä- ja toimitilat.

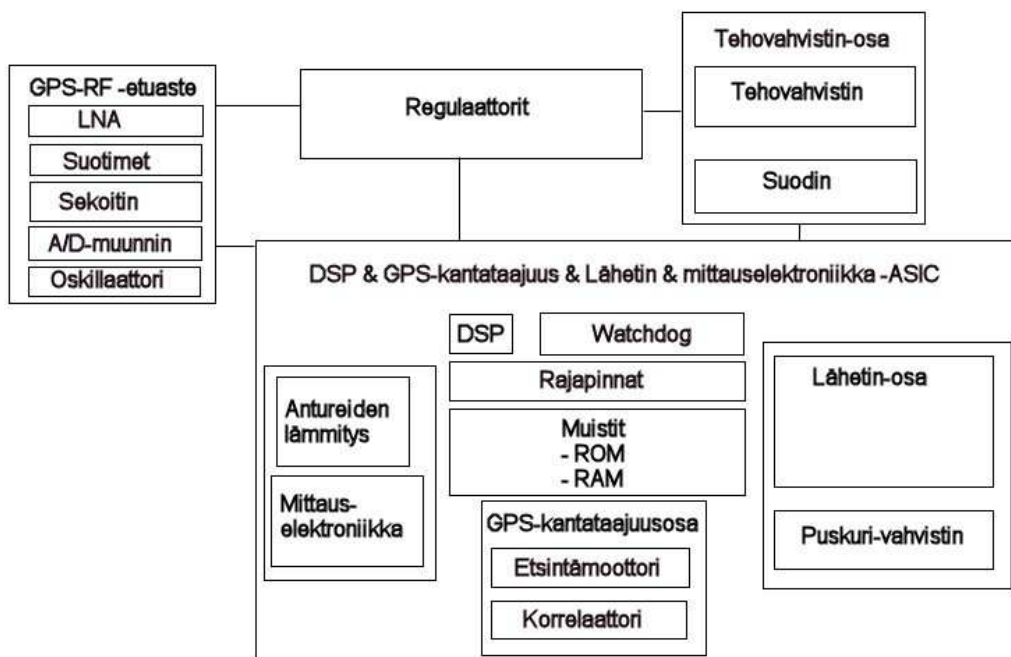
Mittauselektronikka voidaan suunnitella halutunlaiseksi, mahdollisesti jo käytössä olevan Schmitt-kytkimen tapaiseksi ratkaisuksi tai resistiivisen mittauksen mahdollistavaa ratkaisua käyttäen. Tässäkin ratkaisussa kapasitiivisten antureiden lämmitys voidaan toteuttaa joko ASIC-sirulla tai ulkoisena ratkaisuna. Erityistä huomiota on kiinnitettävä siihen kuinka GPS-kantataajuusosat ja mittauselektronikka sijoitetaan piisirulle, jotta piirin sisäiset häiriötekijät saataisiin mahdollisimman pieniksi.

Lähetin voi olla joko kaupallisilla komponenteilla toteutettu ratkaisu tai sondikäyttöön suunniteltu ratkaisu, jossa olisi mahdollisuus käyttää kumpatahansa käytössä olevista taajuuskaistoista. Lähettimen tehovahvistimen voidaan tässäkin toteutuksessa joutua

tekemään ulkoisena ratkaisuna riittävän lähetystehon varmistamiseksi. Tehovahvistimelta vaadittava vahvistus riippuu käytettävästä lähetystaajuudesta ja lähettimen toteutustavasta. Mikäli lähtetin on toteutettu niin, että molempien taajuusalueiden käyttö on mahdollista, tehovahvistimen vahvistuksen on oltava säädettävissä ohjelmiston jämähdöllisestikytkimien avulla.

4.2.8 Vaihtoehto 8

Kahdeksan vaihtoehtoehdossa piirin integrointiaste on viety niinylöskuin mahdollista. Vain GPS RF -lohko on erillisenä, muut osat ovat integroituina yhdelle ASIC:lle. Vaihtoehtolohkokaavio on esitetty näkuvassa 17.



Kuva 17 Toteutusvaihtoehtolohkokaavio

Tämä toteutustapavaihtoehto on ehdottomasti vaativin toteuttaa piiritekniikan osalta, kun kaikki tarvittava elektronikka analogisesta mittauksesta digitaaliseen laskentaan ja radiotaajuuspiireihin on sijoitettava samalle piisirulle. Erityisesti radiotaajuusosien ja analogiamittauselektronikan integrointi samalla piisirulle on haasteellista jopelkästään siitä syystä, että radiotaajuuspiirien toiminnan siirtäminen on vaikeaa ja epätarkkaa, mikäli ei olla valittu oikeaa teknologiaa RF-toteutukseen. Radiotaajuusosat voivat helposti häiritä mittauselektronikan toimintaa ja aiheuttaa mittauksiksiin virheitä, mikäli niitä ei ole suunniteltu eristettyä mittauselektronikasta.

Tällaisen ratkaisun etuna olisi se, että sondista saatisiin hyvin pienikokoinen ja piiriin saatuisiin integroitua paljonkin haluttuja ominaisuuksia, jopa lisäominaisuuksia sekä kaikki lohkot saatuisiin toteutettua juuri haluttuina ominaisuuksina. Ratkaisun haittapuolena on

erityisesti suunnittelun vaikeus sekä kalleus, muutosten tekemisen hankaluus, muutoksiin kuuluva suhteellisen pitkä aika sekä muutosten kalleus. Muutoksia tehdessä ASIC-ratkaisun maskikerrokset jouduttaisiin aina suunnittelemaan ja testaamaan uudelleen.

Näin pitkälle integroitu piiri vaatii myös todella vahvaa osaamista ASIC-suunnittelijalta, koska osaamista on oltava niin GP S-elektronikasta, radiotaajuus-elektronikasta, digitaalelektronikasta sekä analogisesta mittauselektronikasta. Lähettimen tehovahvistin joudutaan tässäkin vaihtoehdossa toteuttamaan ulkoisena ratkaisuna ja tehovahvistimelta vaadittava vahvistus ja mahdollinen vahvistuksen säädettävyys riippuvat siitä kumman taajuusalueen lähetintä käytetään vai onko käytössä ratkaisu, jossa taajuusalue on valittavissa.

5 Radiosondinelektroniikantoteutustapojen vertailukriteerit

Tässä luvussa käsitellään sitä kuinka eri toteutustapoja vertaillaan. Selvitetään kuinka kriteerit määritellään ja mihin kriteerit perustuvat ja miksi juuri kyseiset kriteerit on valittu, jotta lukijalle muodostuisi selkeä käsitys siitä minkälaisien kriteereiden mukaan eri toteutustapoja vertaillaan ja mitkä kriteerit ovat tärkeitä sisällään jamihin tehdyt arvioinnit perustuvat.

5.1 Kustannusjaottelu

Uuden tuotteen kehityskulut ovat yksi merkittävimmistä asioista eri toteutustapojen arvioitaessa, etenkin radiosondin tapaisessa laitteessa, jonka myyntimäärät ovat lähellä 100000 kappaletta vuodessa. Määrä ei ole niin suuri, että kannattaisi valita toteutustapa, jolla saataisiin hieman halvempi tuote huomattavasti suuremmilla kehityskustannuksilla, mikäli lopputuotteen hinnassa ei ole hyvin merkittävää eroa. Lopputuotteiden hintaeron olisi oltava niin suuri, että kehityskustannustenero saataisiin katettua nopeasti myynninkautta.

Kustannukset on jaettu neljään eri osaan, joita ovat sisäiset ja ulkoiset työ- ja materiaalikustannukset, suunnittelu ja alihankinta, tuotannon aloituskustannukset sekä niin sanottu ”second source prototyping”, joka tarkoittaa kuluja, joita tulee, mikäli joudutaan vaihtamaan alihankkijaa. Lisäksi näitä kustannuksia on jaettu sisäisesti vielä useampaan osaan. Tutkimusta tehdessä työn ohjaajan kanssa sovittiin, että kustannusjaottelussa ei pyritä mahdollisimman tarkkoihin laskelmiin erilaisia kaavoja käyttäen vaan pääpaino on siinä, että pyritään selvittämään kehityskustannusten suuruusluokat eri vaihtoehtojen välillä ja selvittämään ovatko nuo kustannuserot eri toteutusvaihtoehtojen välillä merkittäviä. Kaikkien neljän kustannusosan kohdalla kustannusten suuruusluokat on arvioitu euroissa.

Kustannusten arvioinnin pohjana on käytetty aiemmin toteutettujen projektien toteutuneita kustannuksia sekä työn ohjaajan aiemmin tekemiä kustannus- ja työmääräarvioita erilaisiin projekteihin liittyen. Työn ohjaaja on toiminut Vaisalalla projektipäällikkönä. Nämä projektit, joiden kustannusrakenteita on käytetty apuna, ovat liittyneet jokoyksittäisen ASIC-projektin taikoko naisentuote projektin toteutukseen.

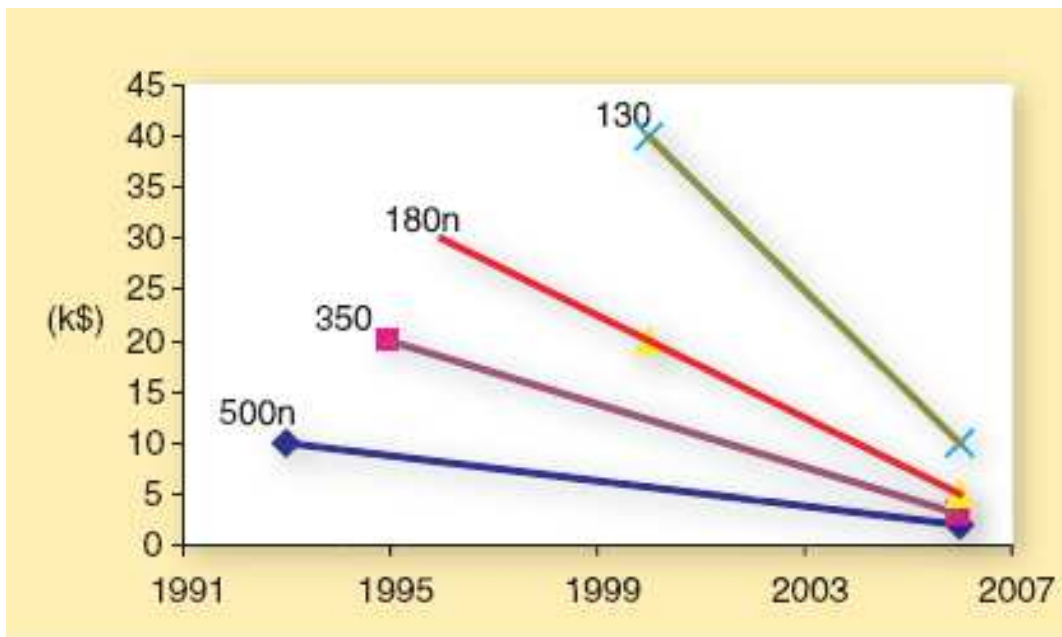
Eri toteutusvaihtoehtojen vaativuustasot on pyritty suhteuttamaan näiden toteutettujen projektien vaativuustasoihin, ja näin laittamaan ne järjestykseen tarvittavien työresurssien suhteen. Niissä toteutusvaihtoehtojen välillä, joihin sisältyy ASIC-ratkaisuja, on käytetty apuna sekä kokonaisprojektien kustannustietoja että ASIC-projektien kustannustietoja.

Työkustannuksia arvioidaan projektiin käytettävänä henkilötyökuukausina. Henkilötyökuukaudeton jaettusisäisiin ja ulkoisiin kuuluvien osien mukaan tehdään työ yrityksen sisällä vai alihankintana. Tätä selvitystä yötä tehdessä sisäisen henkilötyökuukauden kustannuksena sovittiin suullisesti työn ohjaajan kanssa käytettäväksi arvoa 8000 €/kk ja ulkoisen työn kustannuksena arvoa 14000 €/kk. On huomioitava, että nämä kustannukset eivät välttämättä vastaa nykyistä kustannustasoa, joten työkustannusten osalta arvioita on tarvitava sa päivitettävä nykyhetkeä vastaavia henkilötyökuukausien kustannuksiakäyttäen.

Jako sisäisiin ja ulkoisiin kustannuksiin riippuu merkittävästi toteutustavasta. Isoissa ASIC-projekteissa on ulkoisilla kustannuksilla huomattavasti merkittävämpi osa kuin sisäisillä kustannuksilla, koska ASIC-projektit toteutetaan suunnittelun ja valmistuksen osalta hyvin pitkälti alihankintana. Näissä projekteissa sisäiset kulut muodostuvat pääosin vaatimusmäärittelyjen, ohjelmoinnin ja johtamisen osalta. Tietenkin myös lopullinen ASIC-piirin verifiointi suoritetaan sisäisesti. ASIC-projektien kohdalla on myös huomioitavase, että ASIC-komponentit vaativat jonkin verran ylläpitoa, joka taas aiheuttaa lisäkustannuksia.

Sisäiset työkustannukset on jaettu vielä sisäisesti kuuteen osaan, jotka ovat projektin määrittely, elektroniikkasuunnittelu, johtaminen, ohjelmointi, testaus ja arviointi. Jokainen näistä osista tuo kehityskustannuksiin merkittävän osansa. Näihin osiin kuuluvat työmäärät on pyritty määrittämään omina kokonaisuuksina, eikä yhtenäistämään niitä saman arvoisiksi. Henkilötyökuukausia arviotaessa on huomioitava se, että ne sijoittuvat näissä osissa luonnollisesti projektin aikataulua ja etenemistä ajatellen. Lisäksi esimerkiksi projektin johtajana toimii yksi henkilö, joka tekee myös muihin projekteihin liittyviä töitä, eikä keskity vain yhteen projektiin koko projektin toteuttamisen ajaksi. Elektroniikkasuunnittelijoina taas toimii useitakin henkilöitä samaan aikaan erillisten lohkojen suunnitteluisena.

Kustannusten arviointiin sisältyy myös arviot tarvittavien kuinkamontakertaamiskejien joudutaan muuttamaan, tarkoittaen MPW-kierrosten lukumäärää. Työn määrittelyvaiheessa yhden MPW-kierroksen hinnaksi on sovittu 0,35 µm puolijohdeprosessia käytettäessä 20000 €/kierros ja 0,18 µm puolijohdeprosessia käytettäessä 40000 €/kierros. Tuotekehitysprojekteja aloitettaessa, näiden prosessien hinnatonsyytäsuhteutta projektin ajankohtaavastaviksi hinnoiksi, koska tämän työn aloittamisen jälkeen valuuttakurssien huomattava muutos sekä teknologioiden kehitys on vaikuttanut puolijohdeprosessien hintoihin laskevasti. [9] Työn ohjaajan aiemmin tekemää arviointia on käytetty apuna etenkin MPW-kierrosten lukumääriä arviotaessa. Kuvassa 18, seuraavalla sivulla, on esitetty kuva ajaja puolijohdeprosessien hintakehityksestä ajan funktiona.



Kuva18: Trendikäyrät CMOS-prosessin eri viivanleve yksiensuhteen [9]

Tuotannon aloituskustannuksia on arvioitu pitkälti työn ohjaajan aiemmin tekemien kustannusrakennetutkimusten perusteella. Tutkimukset ovat koskeneet kahta aiemmin toteutettua projektia sekä yhtä tutkimuksen aikaan meneillään ollutta projektia. Joten pohjatietona oli käytössä kahden jo toteutuneen projektin tuotannon aloittamiseen kuluneet kustannukset sekä työnohjaajan tekemä yhden projektin kustannusarvio. Tässä työssä tutkittu toteutusvaihtoehto pyrittiin suhteuttamaan teknisten ratkaisujen saosalta niiden jo toteutuneiden projektien elektronisiin ratkaisuihin, niiden vaikeustasoon ja arvioimaan aloituskustannuksiensa niiden pohjalta.

Elektroniikkateollisuudessa on aina varauduttava myös siihen, että valmistettaessa tuote alihankintana, voi ilmetä ongelmia esimerkiksi alihankkijan luotettavuuden kanssa tai pahimmassa tapauksessa alihankkija voi tehdä konkurssin. Tämän vuoksi on jo etukäteen pyrittävä määrittämään mahdollisia vaihtoehtoisia alihankkijoita ja sitä minkälaisia kuluja aiheutuisi mahdollisesta alihankkijan vaihdosta, eli tekemään niin sanottu second source prototyping. Alihankkijan vaihtamiseen liittyvät kustannukset riippuvat aika paljon alihankkijasta, siitä minkälaiset valmiudet uudella alihankkijalla on tuotteen valmistamiseen, minkälaisia hankintoja tarvitaan, jotta tuotanto voidaan aloittaa. Alihankkijan vaihdon yhteydessä kuluja aiheuttavatuuden alihankkijan etsintä, sisäiset sekä ulkoiset suunnittelu- ja neuvottelukulut, mahdolliset laitehankinnat ja testit, koesarjoihin valmistukseen kaverifioinnin tuotannon laadun osalta.

5.2 Aikatauluja resurssit

Seuraavaksi käsitellään tuotekehitysprojekteihin liittyviä aikatauluja ja niihin tarvittavia resursseja. Nämä kriteerit on jaettu viiteen osaan, jotka ovat esiselvitys, tuotteen

kehitysaika, aikataulun epävarmuus, sisäisten resurssien tarve sekä ulkoisten resurssien tarve. Esiselvitys ja tuotteen kehitysaika on pyritty arvioimaan kausissa. Aikataulun epävarmuus sekä sisäisten ja ulkoisten resurssien tarve on pyritty määrittämään asteikolla suuri/keskitaso/pieni. Resurssien tarpeita on pyritty vertailemaan eri toteutustapavaihtoehtojen suhteen niin, että toteutustapa jossa resurssien tarve on vähäisin on arvioitu merkinnällä pieni ja eniten resursseja tarvitseva tai tarvitsevat merkinnällä suuri. Näin vaihtoehtojen välillä saadaan eroja.

Uuden tuotteen kehittäminen vaatii niin yrityksen sisäisiä kuin ulkoisia resursseja, koska kaikkea tarvittavaa tietoa ja taitoa ei löydy yrityksen sisästä, eikä aina ole järkevää palkata uutta väkeä talon sisälle. Nämä tarvittavat resurssit pyritään määrittämään erikseen, koska niillä on selkeät omat merkityksensä tuotteen kehityskustannuksiin, aikatauluihin ja riskeihin. Etenkin toteutuksen integrointiastetta nostettaessa ulkopuolisten resurssien tarve kasvaa merkittävästi, koska laajemmat integroidut piiritsuunnitelmaan jätettävät osat hankitaan.

Toisaalta on oltava varma, että käytettävältä alihankkijalta löytyy tarvittava ammattitaito alihankkijalla teetettävistä tehtävistä suoriutumiseen. Tätä varten on mahdollisesti kartoitettava uusien yhteistyökumppanien riittävän laajan ammattitaidon takaamiseksi. Kaupallisten piirien tapauksessa ulkoisten resurssien tarve on pienempi verrattuna ASIC-projekteihin, koska talon sisästä löytyy kokemusta ja osaamista elektroniikkasuunnittelusta, joten ulkopuolisen suunnittelun tarve on huomattavasti vähäisempää. Resurssien vertailuasteikossa matalat arkoittaavähäistä resurssientarvetta ja korkeasuurtarvetta.

Aina uusien tuotteiden suunniteltaessa tehdään asiasta esiselvitys, jossa pyritään kartoittamaan seminkäläisiä toiminnallisia uudet tuotteet halutaan joku kane olisivat toteutettavissa sekä arvioida kuinka paljon aikaa ja resursseja tuotteen kehittämiseen tarvitaan. Esiselvitykseen kuuluvaksi voidaan laskea myös markkinoinnin suorittamiseksi asiakkailla siinä, mitä mieltä asiakkaat ovat nykyisistä tuotteista, mitä he haluaisivat tuotteesta parannettavan, minkälaisia ominaisuuksia he tuotelta haluavat ja mitkä ovat markkinatilanteen osalta tärkeimmät tekijät. Tämän markkinaselvityksen perusteella voidaan myös määrittää lähtökohdat ja eri ominaisuuksien ja toiminnallisuuden tarpeet uudelle tuotteelle. Kulutuselektroniikan kohdalla määrääviksi tekijöiksi nousevat usein tuotteen hinta sekä laatutekijät, koska asiakkaat haluavat hyvää laatua edulliseen hintaan.

Tuotteen kehitysaikalla tarkoitetaan tässä tapauksessa aikaa, joka kuluu esiselvityksen jälkeen määritettävistä tuotteen teknisistä spesifikaatioista siihen kunnes päästään suunnittelun ja prototyyppien valmistuksen kautta itse valmiiseen markkinoille tuotavaan tuotteeseen. Tuotteen kehitysaikaan sisältyvät teknisten spesifikaatioiden määrittäminen, koko tuotesuunnittelu sisältäen sekä elektroniikan että mekaniikan

suunnittelun, prototyyppien valmistus, testaus sekä kaikki tuotannon aloittamiseen liittyvät tekijät kuten komponenttien hankinnat ja tietenkin myös valmistukseen, esimerkiksi uusien alihankkijoiden ja tuotantokoneiden hankinta, sekä mahdolliset kuljetukseen liittyvät asiat. Näistä merkittävimmäs säosassaonitsetuotteensuunnittelu. Suunnitteluun taas vaikuttaa merkittävimmin tuotteen tekninen vaatavuus.

Työn yhteydessä työn ohjaajan kanssa sovittiin, että eri toteutustapoihin liittyviä aikatauluja arvioidaan seuraavien kriteerien:

- Kun käytetään puhtaasti kaupallisia komponentteja eli komponentit ovat valmiiksi olemassa, niin projekti voidaan viedä läpi yhdessä vuodessa.
- Nykyisiin tuotteisiin perustuvat ratkaisut, joissa tehdään joitain muutoksia tai suunnitellaan pelkästään digitaalelektronikkaa niin projekti voidaan viedä läpi vuodessa.
- RF- ja analogiaelektronikkasuunnittelua sisältävät projektit voidaan viedä läpi kahdessa vuodessa.
- Kun koko tuote suunnitellaan alusta alkaen uudelleen ja tuote sisältää RF- ja analogiapiirien integrointia niin projektiin on varattava pahimmassa tapauksessa jopakin kolme vuotta.

Nämä kriteerit perustuvat työn ohjaajan aiempaan kokemuksen elektronikkatuotteiden suunnitteluprojekteista ja hänen mielestään ne antavat hyvän ja tähän tutkimukseen riittävän peruskäsityksen erilaisiin tuotesuunnitteluprojekteihin kuluvasta ajasta.

Aikatauluihin liittyy aina epävarmuutta. Projekteissa tulee helposti eteen odottamattomia viivästyksiä ja mahdollisesti ongelmia, joita ei oltu osattu huomioida aikatauluja laadittaessa. Mitä suurempi ja monimutkaisempi projekti on kyseessä sitä suuremmalla todennäköisyydellä jotain odottamatonta ongelmaa tulee eteen, etenkin jos laitteen elektronikassa on herkkiä ja monimutkaisia osia. Toki halutun elektronikan taso huomioidaan jo aikataulujen laadinnassa pidempään suunnitteluajana, mutta harvoin kaikki mahdolliset viivästykset osataan huomioida, etenkin kun tuotekehitysaikataulut pyritään usein pitämään mahdollisimman lyhyinä. Erityisesti radiotaajuuselektronikan integroinnissa voi varautua ongelmiin, koska piirisimulaattoreiden radiotaajuuspiirien mallinnus ei ole erityisen tarkkaa ja kaikkia mahdollisia häiriötekijöitä ei yleensä huomata vielä simulointien avulla vaan vasta piirin ensimmäisten koe-erientestauksessa.

Aikatauluihin sisältyvä epävarmuus tulee hyvin selkeästi esiin etenkin vaativien integroitujen piirien kohdalla, koska mikäli niiden kanssa tulee ongelmia ja maskikerroksia joudutaan muuttamaan niin siihen kuluu huomattavasti aikaa. Työn

ohjaajan mukaan maskeja muutettaessa joudutaan varautumaan aina noin kuuden kuukauden mittainen sykli yhtä uutta MPW-kierrosta varten. Tämä sykli sisältää maskien suunnittelun, valmistuksen, maskien tuotantoon ottamisen, tuote-erän valmistamisensekä tuotetestauksen ja verifiointin. Tästä syystä on erittäin tärkeää, että jo ensimmäistä prototyyppiä valmistettaessa integroidun piirin suunnittelu olisi hyvin huolellisesti tehty ja piirin toiminta simuloitunutta hyvin kuin simulointimallien avulla on mahdollista. Uusien integroitujen piirien valmistuksessa osin joudutaan käytännössä ainatekemään useampia maskikerrosajoja, ennen kuin piirien toiminta saadaan riittävän hyväksijämyöspiiiriensaantosaadaan tarpeeksi korkealle tasolle.

5.3 Tekninen riskitaso

Tässä pyritään määrittämään eritoteutustapoihinsa liittyvien riskien suuruuksia. Riskien arvioinnin kriteerit on jaettu viiteen osaan, joita ovat komponenttien saatavuus, tuntemattomat tekijät, suorituskyky ja häiriösuojitus, osaavan työvoiman saatavuus sekä häiriintyvyystekijät. Työohjaajan kanssa sovittiin, että komponenttien saatavuus, suorituskyky ja häiriösuojitus sekä työvoiman saatavuus arvioidaan asteikolla hyvä/keskitaso/huonojako kriteeritasteikolla korkea/keskitaso/matala.

Uuden tuotteen suunnitteluun sisältyy aina tuntemattomia tekijöitä, koska esim. uuden teknologian käyttöön liittyvät ominaisuudet ja sen käyttöön liittyvät mahdolliset ongelmat eivät ole etukäteen tiedossa. Erityisesti radiotaajuuspiirit voivat olla ongelmallisia, mikäli käytettävää radiotaajuuspiiritoteutusteknologiaa ei ole valittu oikein. Tästä syystä toteutusteknologia on valittava huolellisesti, jotta käytettävät simulointimallit ovat riittävän tarkkoja ja huonojen simulointimallien aiheuttamilta vaikeuksilta vältyttäisiin. Tuntemattomat tekijät pyritään tässä tarkastelussa määrittelemään vain elektronikan ja sensuunnittelun, toiminnan ja valmistuksen osalta, eikä pyritä huomioimaan kaikkia mahdollisia tuntemattomia tekijöitä, joita projektiin voi liittyä, koska selä ajentaisikäsiittelyäliikaa .

ASIC-ratkaisuihin liittyvien tuntemattomien tekijöiden arvioinnissa on käytetty apuna Vaisalan alihankkijana toimivan piirisuunnittelutoimiston arvioita toteutuksiin liittyvistä riskeistä. Nykyistä alihankkijaa käyttäen riskit ovat tiettyjen ASIC-osien osalta pienemmät, koska heillä on jo tarvittava tieto ja kokemus tiettyjen lohkojen integroinnista yhteen, joten sillä on teknisiä riskejä laskeva vaikutus. Tällä yrityksellä on pitkä kokemus piirisuunnittelusta, joten heidän antamia arvioita voidaan pitää tältä tutkimusta tehdessä riittävän tarkkoina ja perusteltuina. Tuntemattomien tekijöiden osalta vertailuasteikkoa on käytetty niin, että matalatarkoittaa vähäistä tuntemattomien tekijöiden määrää ja korkea suurta tuntemattomien tekijöiden määrää.

Ilmassaliikkuukokoajan paljon sähkömagneettista säteilyä, joka voi aiheuttaa häiriöitä elektronisille piireille. Tästä hyvänä esimerkkinä ovat matkapuhelinsignaalit, jotka

helposti aiheuttavat häiriöitä esimerkiksi tietokoneen näytöille tai radioille. Näissä tapauksissa häiriöt ovat joko nähtävissä tai kuultavissa ja häiriötekijät tulevat laitteen ulkopuolelta. Radiosondin osalta suurin ulkoinen häiriötekijä on tyypillisesti vahva tutkasignaali, koska radiosondeja käytetään usein lentokenttien lähetyksillä. Tutkasignaalin aiheuttamaa häiriötä ei voida poistaa, mutta sen vaikutukset voidaan minimoida suunnittelemalla sondiin, että se toipuu häiriöstä nopeasti.

Radiosondin elektroniikka koostuu monista eri lohkoista joihin sisältyy analogia-, digitaalijärjestelmä- ja radiotaajuus elektroniikkaa. Näissä lohkoissa olevissa elektroniikkapiireissä kulkevat virrat aiheuttavat sähkömagneettisia häiriöitä ja yhden lohkon toiminta voi häiritä toista lohkon toimintaa. Etenkin RF- elektroniikka voi herkästi häiritä tarkkaa analogia elektroniikalla toteutettua mittausta. Nämä häiriintymis tekijät on huomioitava erityisesti, kun näitä kaikkia erilaisia elektroniikkatyyppisiä integroidaan samalle piisurille. Suunnittelussa on kiinnitettävä erityishuomiota siihen, että radiotaajuusosien ympärillä on riittävän hyvä suojaus, jotta radiotaajuiset häiriöt eivät estä sondin muiden lohkojen oikeanlaista toimintaa.

Radiosondin suorituskyky on sondin hinnan lisäksi hyvin merkittävässä asemassa asiakkaiden tehdessä ostopäätöksiään. Radiosondeja käytetään aikapaljon lentokenttien läheisyydessä, joten käyttöympäristö voi olla hyvinkin häiriöinen lentokenttä tutkien käytöstä johtuen. Tästä syystä sekä suorituskyvyn, että häiriintymis tekijöiden osalta on tärkeää, että radiosondin toiminta aikovin paljossa häiriintyisistä vahvoista tutkasignaaleista. Sondi olisi toteutettava niin, että tuote toipuu nopeasti tutkien mahdollisesti aiheuttamista häiriöistä ja radiosondin lähettämään dataan ei tulisi pitkiä katko-ajkoja. Tällaiseen toimintaan päästään helpoimmin sillä, että sondin DSP-lohkoon sijoitetaan niinsanottu vahtikoira, joka jumiutumistilanteessa resetoisondin.

Elektronisten tuotteiden valmistuksessa on hyvin tärkeää pyrkiä varmistamaan käytettävien komponenttien saatavuus, koska se vaikuttaa erittäin vahvasti tuotteen toimitusvarmuuteen ja sitä kautta asiakastyytyvyyteen. Komponenttien saatavuus olisi taattava kattamaan myös yllättävät kysyntäpiikit. Radiosondien osalta kysyntä on kuitenkin suhteellisen helposti arvioitavissa, koska niiden maailmanlaajuinen markkinatilanne on hyvin tiedossa ja kysynnässä ei yleensä tapahdu kovin suuria heilahduksia. Radiosondien ostajia ovat pääasiassa eri meteorologian laitokset ympäri maailman sekä eri maiden armeijat. Vähäistä myyntiä on myös esimerkiksi muille tutkimuslaitoksille.

Komponenttien saatavuuden kannalta eräs tärkeä tekijä on se, että kaikkia komponentteja olisi saatavissa vähintään kahdelta eri valmistajalta, jotta ei jouduttaisi vaikeuksiin mikäli yhdelle valmistajalle tulisi ongelmia tuotantonsa tai komponenttien riittävyyden kanssa. Kahden toimittajan ratkaisu myös mahdollistaisi nopeita korjaustoimenpiteitä, mikäli esimerkiksi havaittaisiin laatuongelmia jonkin tietyn

komponentin osalta. Lisäksi useammalta komponenttivalmistajalta ostaminen mahdollistaa hintojen kilpailuttamisen. ASIC-piirien suhteen saattaa olla erittäin vaikeaa saada kaksi vaihtoehtoista piiritoimittajaa, etenkin mikäli piiri on toteutettu niin, että sama yritys, jolta ASIC-suunnittelu on ostettu, toimii myös ASIC-piirin valmistajana. Näin esimerkiksi hintaetu, joka saavutetaan ostamalla suunnittelu ja valmistus samalta yritykseltä, voi saada vastapainoksi mahdolliset komponenttien saatavuusongelmat. Tästä syystä on erittäin tärkeää, että käytettävän ASIC-valmistajan luotettavuus on korkealla tasolla.

Komponenttien saatavuutta on arvioitua sen perusteella miten suuri osa komponenteista olisi saatavissa vain yhdeltä valmistajalta. Jos käytössä on käytännössä vain yksi valmistaja, niin saatavuutena on käytetty huonoa. Täysin kaupallisilla komponenteilla toteutettuna komponenttien saatavuus on hyvä, koska valittavissa on monia eri komponenttitoimittajia.

Uutta tuoteprojektia käynnistettäessä on tärkeää tiedostaa se, onko yrityksen sisäinen suunnitteluosaaminen tarkasti tiedossa. Tämän tiedon pohjalta on määritettävä projektiin tarvittava lisäosaamisen tarve, joka toteutetaan joko yrityksen omien rekrytointien kautta tai ostopalveluna alihankkijoilta. Projekteissa on aina varmistettava se, että yrityksen sisällä on riittävä osaaminen, jotta projekti ei kaatuisi saman tien mahdollisiin alihankkijoilla tuleviin ongelmiin. Yrityksen sisällä on joka tapauksessa löydettävä niin paljon osaamista, että kehitettävän tuotteen vaatimusmäärittelyt pystytään tekemään yrityksen sisällä. Tämä tarkoittaa myös sitä, että on tunnettava suunniteltavan laitteen osien toimintaa riittävästi, jotta niiden toiminnan vaatimukset kyettäin tarkastamaan.

Osaavan työvoiman saatavuuteen vaikuttaa yrityksen sisäinen osaaminen, alihankkijoilta löytyvä osaaminen sekä se miten helposti osaavaa työvoimaa on saatavissa yrityksen sisällä ja kuinka osaavaa työvoimaa on saatavissa alihankkijoilta. Osaavan työvoiman puute yrityksen sisällä ja riski alihankkijan vaihtamisesta riittävän osaamisen saamiseksi voi joissain tapauksissa jättää projektit toteutumatta, mikäli riski katsotaan liian suureksi saatavissa olevaan hyötyyn nähden.

5.4 Elektroniikan hinta

Tässä osiossa pyritään tekemään arviot tuotteisiin tarvittavien komponenttien hinnoista. Varsinaisesti ei määritellä kaikkien yksittäisten komponenttien, mutta suurimpien komponenttien, kuten mahdollisesti käytettävien valmiiden piirien tai suunniteltavien integroitujen piirien hinnat, pyritään arvioimaan. Lisäksi pyritään tekemään arviot siitä, minkälainen on komponenttien volyymin vaikutushintaan. On kuitenkin syytä korostaa, että tässä määritellyt hinnat eivät ole lopullisia elektroniikan kustannushintoja vaan arvioita joiden perusteella eri toteutusvaihtoehtoja voidaan vertailla. Komponenttien

hintoja on arvioitu dollareissa, koska lähes kaikki komponenttivalmistajat käyttävät dollarihintoja.

Hintojen määrittämisessä on merkittävänä hinnanmäärityskeinoina on käytetty tarjouskyselyitä komponenttivalmistajilta sekä aiemmin kehitettyjen ASIC-tuotteiden hintoja. Lisäksi on käytetty alihankkijoilta saatuja arvioita tai tavoitehintoja erilaisten ASIC-ratkaisujen hinnoista. Kyselyitä tehdessä on pyritty selvittämään yksittäisen komponentin hinta sekä käytettävän volyymin vaikutus komponentin hintaan. Näissä volyymiriippuvuus kyselyissä kappalemääränä on käytetty 100000 kappaletta. Mikäli esimerkiksi suunniteltava ASIC-ratkaisu olisi sellainen, jota voisi käyttää hyvin monessa erityyppisessä sondissa, niin volyymi voisi kasvaa vielä selvästi korkeammaksi, jolloin voitaisiin saada lisäehtoja.

Komponentit on tässä työssä jaettu toiminnallisiin komponentteihin ja oheiskomponentteihin. Jako on tehty niin, että toiminnalliset komponentit pitävät sisällään kaikki merkittävät toimintaan vaikuttavat komponentit, kuten ASIC-piirit, GPS-osat, prosessorit ja oskillaattorit. Oheiskomponentteihin on laskettu lähinnä kuuluviksi passiivisia komponentteja, joita on käytetty esimerkiksi eri osien yhteensovituksissa ja ASIC-komponenttien liittämiseksi muuhun elektroniikkaan, sekä joitain vahvistimia.

Toiminnalliset komponentit ovat elektroniikan osalta merkittävimmissä asemassa elektroniikan hintaarvioitaessa. Nemuodostavasti suurimman osan hinnasta. Tämä tieto perustuu laskelmiin nykyisten tuotteiden hinnoista eri lohkojen välillä sekä laskelmiin nykyisissä ratkaisuissa käytettävien toiminnallisten komponenttien yhteishintojen sekä oheiskomponenttien yhteishintojen välillä. Oheiskomponenttien hinnaksi jää alle 15% kokoelektroniikan hinnasta.

Kuten edellä olevasta laskelmasta huomataan, oheiskomponenteilla on suhteellisen pieni merkitys kokonaisradiosondin hintaan. Taloudellisesti tämä eri toteutusvaihtoehtojen välinen hintaero oheiskomponenttien osalta tulee merkittäväksi vasta kun tuotteen volyymi kasvaa suureksi. Radiosondien kohdalla volyymeissä puhutaan usein 100000-200000 kappalemäärästä, joten joidenkin senttien tai kymmentensenttien vaikutus on vuositasolla maksimissaan parikymmentätuhatta euroa, jos oheiskomponenttien hinnoissa eri vaihtoehtojen välillä on arviolta maksimissaan 5-10 senttiä. Ja näinkään suurta eroa eri vaihtoehtojen välille ei välttämättä tule.

Elektronisten komponenttien hinnat riippuvat nykyään hyvin voimakkaasti käytettävien komponenttien volyymeistä. Tämä tulee erityisen selvästi esille erikoiskäyttöön suunnitelluista asiakaskohtaisista integroiduista piireistä. Ne tulevat kannattaviksi yleensä vasta, kun komponentin volyymi kasvaa riittävästi suureksi. Näinsiksi, koska jo integroidun piirin suunnittelukustannukset ovat suuret ja etenkin monimutkaisten ja

piirien valmistus on kallista, koska valmistusmenetelmät ovat erittäin suurta tarkkuutta vaativia. ASIC-toteutusten kohdalla voidaan kuitenkin saada merkittävää hintaetua teettämällä sekä ASIC-suunnittelusekävalmistussa mallaalihankkijalla.

5.5 Muunneltavuus

Tässä arvioidaan eri toteutustapoja tuotteen muunneltavuuden kannalta. Radiosondissa tuotteen muunneltavuuteen liittyy neljä eri tekijää. Nämä tekijät ovat käytettävä taajuusalue, radiosondin ilmanpaineen, lämpötilan ja ilmankosteuden mittaustapa, tuotteen jatkokehityksen helppous sekä radiosondin toteutustavan sopivuus eri sondityypeille.

Radiosondin taajuusalue on standardin rajaama. Käytössä on valittavissa kaksi taajuusaluetta, 400MHz taajuusalue ja 1680MHz taajuusalue. Sondi voisi olla toteutettuna niin, että käytettävä taajuusalue olisi määritettävissä ohjelmoinnin avulla samaa lähetintä käyttäen. Toisena vaihtoehtona on se, että eri taajuusalueelle valmistettaisiin omat sondinsa, käyttämällä yhdelle taajuusalueelle sopivaa lähetintä. Sondi voisi tässä tapauksessa olla toteutettuna muuten samoilla komponenteilla, mutta käytettäisiin eri lähettimiä ja tehovahvistimia. Vaihtoehtoisissa on siis käytössä jompikumpi taajuusalueita molemmat.

Radiosondin tekemät mittaukset on tehtävissä usealla eri tavalla. Tätä tutkimusta tehdessä on keskitytty nykyisin sondeissa käytössä olevaan kapasitiiviseen mittaukseen. Lisäksi on pyritty huomioimaan, olisiko myös resistiivinen mittaustapa kuin ka helposti toteutettavissa valitulla ratkaisuvaihtoehdolla ja jänniteläisiä muutoksia resistiivinen mittaustapa vaatisi valittuun vaihtoehtoon. Resistiivisen mittausmahdollisuuden tutkiminen jäi kuitenkin hyvin vähiin työn laajuudesta johtuen. On kuitenkin päätetty, että mikäli mittauselektronikka suunnitellaan ASIC -ratkaisun sisään niin resistiivisenkin mittauksen mahdollisuus olisi käytettävissä, muussa tapauksessa resistiivinen mittauseleiole käytettävissä.

Uutta tuotetta suunniteltaessa on hyvä huomioida se, onko suunniteltava tuote kuinka helposti päivitettävissä, mikäli ilmenee tarvetta lisäominaisuuksille tai jos tulisi uusia vaatimuksia, kuten esimerkiksi lähettimen kapeampi taajuuskaista. Mikroprosessorin muisti kannattaa esimerkiksi hieman ylivoimistaa, jotta myöhemmin olisi mahdollista lisätä ohjelmakoodia ja näin saada mahdollisesti lisäominaisuuksia käyttöön pelkällä ohjelmistopäivityksellä. Vastaavasti uudelleenohjelmointitarvetta voi ilmetä mikäli jokin sondin osista päätetään vaihtaa lisäominaisuuksien saamiseksi tai uusien vaatimusten täyttämiseksi. Etenkin ASIC-ratkaisujen osalta on huomattava, että päivitettävyyden vaatii paljon aikaa ja on kallista, koska maskit jouduttaisiin tekemään uudelleen.

Radiosondeja on käyttötarkoituksesta ja käyttöpaikasta riippuen erityyppisiä. Paineen, ilmankosteuden ja lämpötilan määrittämisen lisäksi on olemassa sondeja esimerkiksi radioaktiivisuuden sekä otsonimittauksiin. Yrityksen kannalta olisi pidemmällä aikavälillä hyötyä, mikäli olisi olemassa yksi tuote, jonka pohjalle kaikki muutkin sondityypit pohjautuisivat. Tällainen ratkaisu voisi vaikuttaa selvästi tuotteiden hintoihin, etenkin harvinaisempien ja pienempi volyyymisten tuotteiden hintoja laskevasti. Toteutustapa voisi esimerkiksi olla sellainen, että voitaisiin käyttää samoja piirilevyjä kaikissa eri sondiversioissa tai että sondityypin vaihto saataisiin aikaan vain muutamien komponenttien, esimerkiksi mittauselektroonikkalohkon tai ohjelmakoodin vaihdolla. Vastaavasti sopivalla toteutuksella ASIC voisi olla käytettävissä esimerkiksi muutapaikkansuunnittelujärjestelmää käyttävissä sondeissa.

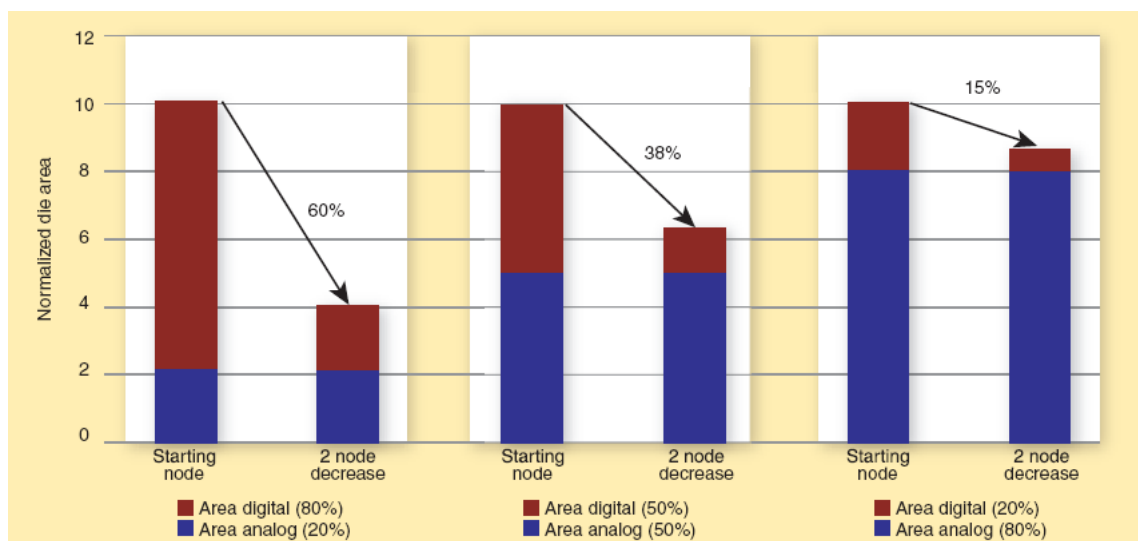
5.6 Muut kriteerit

Muissa kriteereissä huomioidaan asioita, jotka vaikuttavat vaihtoehtojen valintaan. Näistä kriteereistä suurin painoarvo on ehdottomasti virrankulutuksella, koska sillä voidaan näiden kriteereiden osalta olla suurin taloudellinen merkitys sondin hintaan. Muuttamalla osa-alueessa käsiteltävät kriteerit ovat toteutustavan sopivuus nykyisiin tuotantojärjestelyihin, elektroniikan käyttöjännitteet, toteutuksen koko sekä toteutuksen kopiaitavuus. Näistä käyttöjännitteet arvioidaan toteutuksessa tarvittavan suurimman käyttöjännitteen mukaan. Virrankulutus, sopivuus tuotantojärjestelyihin sekä sondin koko arvioidaan asteikolla suuri/keskisuuri/pieni. Kopiaitavuus arvioidaan asteikolla vaikea/keskivaikea/helppo.

Radiosondin toteutustavan muutoksella voi olla jopa merkittävä vaikutus tuotantojärjestelyihin. Mikäli toteutustapaa muutetaan radikaalisti, voidaan tarvita merkittäviä investointeja esimerkiksi tuotanto- tai testauslaitteisiin. Lisäksi voi olla mahdollista, että alihankkijoita joudutaan vaihtamaan tai ainakin ottamaan uusia alihankkijoita käyttöön, jolloin tarvitaan myös iäverifiointejä alihankkijoiden laadun takaamiseksi. Alihankkijaa voidaan toisaalta vaihtaa myös mikäli sillä voidaan saavuttaa merkittävää hintaetua aiempaan nähden. Värsinaisten kokoonpano ja mittalaitteiden lisäksi voidaan tarvita uusien työkalujen valmistamista ja testaamista, esimerkiksi kotelokoonmuuttuessa.

Nykyelektroniikan suunnittelun tapauksessa piirienvirrankulutus ei ole niin merkittävä tekijä kuin voisivat ajatella. Virrankulutus on kyllä tärkeä asia, mutta ei niin tärkeä kuin monissa muissa nykyelektroniikan laitteissa. Virrankulutuksella on suuri vaikutus sondissa käytetyn akun tehoon ja täten kautta myös sondin kokoon. Toteutuksessa tietenkin pyritään mahdollisimman pieneneen virrankulutukseen, jotta akun koko voidaan pienentää jäsitäkautta halventaamaan hintaasekapienentää itse sondin kotelokokoa.

Sondin virrankulutukseen voidaan vaikuttaa hyvin paikkajon sondin elektroniikan toteutustavoilla. Kuten jo aiemmin on mainittu, GPS -lohkon virrankulutusta voidaan pienentää merkittävästi käyttämällä ratkaisua, jossa GPS-lohkolla on kaksi toimintatilaa. ASIC-toteutusten virrankulutuksessa on merkittäviä eroja käytettävästä viivanleveydestä riippuen. Esimerkiksi käyttämällä $0.35\mu\text{m}$ viivanleveyden sijasta $0.18\mu\text{m}$ viivanleveyttä suunnittelutoimiston mukaan pienenee sekä käytetyn piirin pinta-ala sekä piirin virrankulutus. Tämän muutoksen suuruus riippuu siitä kuinka suuri osa integroidusta piiristä analogiaelektroniikkaa ja kuinka suuri digitaalelektroniikkaa. Analogiaelektroniikan osalta viivanleveyden muuttaminen ei vaikuta pinta-alaan, mutta digitaalelektroniikassa viivanleveydellä on huomattava merkitys. [9] Kuvassa 19 on esitetty viivanleveyden vaikutus käytettyyn pinta-alaan.



Kuva 19: Viivanleveyden vaikutus piirin pinta-alaan [9]

Monisakuluselektroniikantuoiteissa itsetuotteen kokoon merkittävät tekijät tuotteita suunniteltaessa. Nykyajan trendinä usein on saada tuote mahdollisimman pienikokoiseksi, näin etenkin kun on kyse esimerkiksi matkapuhelimista. Radiosondin kohdalla koko ei kuitenkaan ole määräävä tekijä toteutustapaa päätettäessä. Tietenkin kotelon suuruudella on vaikutusta sen hintaan, mutta itse radiosondin elektroniikka ei ole suurin kotelon kokoon vaikuttava tekijä vaan suurimmat kokoon vaikuttavat tekijät ovat kuntaipattereiden kokosekä käytettävien piirilevyjen koko.

Toisaalta akun kokoon voidaan vaikuttaa elektroniikan toteutustavalla, esimerkiksi pienentämällä lohkojen käyttöjännitteitä jäsittäen tuuttaakua. Toinen tapa vaikuttaa akun kokoon on pienentää sondin virrankulutusta tietyillä, jo aiemmin mainituilla, elektroniikan toteutusvalinnoilla. Kotelon kokoon voi vaikuttaa piirilevyjen osalta esimerkiksi niin, että ei käytetä yhtä isoa piirilevyä vaan käytettäisiin useampia pieniä piirilevyjä, jotka on liitetty kiinni toisiinsa liittimien avulla. Tästä tosin voi aiheutua enemmän kustannuksia kuin yhden ison piirilevyn käytöstä, ja lisäksi liian monien

piirilevyjen käyttö voi myös lisätä sondin kotelon kokoa. Pitkälle integroidulla ratkaisulla päästään elektroniikan osalta mahdollisimman pieneen tilaan. Kaupallisilla komponenteilla toteutettu ratkaisu, jossa kaikki lohkot on toteutettu erillisinä, on elektroniikankoonosaltasuurinvaihtoehto.

Kopioitavuus on yksi vähiten valittavaan toteutustapaan vaikuttavista kriteereistä. Kopioitavuus on helpoimmin estettävissä käyttämällä mahdollisimman pitkälle integroitua ratkaisua, koska integroidun piirin piirikavaatio olisi vain Vaisalan, piirisuunnittelusta vastaavan yrityksen ja piirin valmistajan tiedossa. Diskreeteillä komponenteilla toteutetturatkaisuolisisuhteellisen helposti kopioitavissa elektroniikan osalta.

5.7 Yhteenvertailukriteereistä

Edellä esitellyn asiantuntijakriteerit, joiden perusteella radiosondinelektroniikan eri toteutusvaihtoehtoja on tässä työssä arvioitu. Kriteereiden avulla on pyritty saamaan esille eri vaihtoehtojen edut ja haitat. Absoluuttisia arvoja ei ole pyritty selvittämään vaan pyrkimyksenä on ollut nimenomaan saada eri vaihtoehdot realistisella pohjalla suhteutettua toisiinsa nähdessä kriteereitä avuksi käyttäen ja näin löytää parhaimmat vaihtoehdot elektroniikantoteuttamiseen.

Tarkastelun perustana on käytetty paljon yrityksen sisäistä materiaalia toteutuneista ja menellään olleista projekteista sekä henkilökunnan kokemuksiin perustuvia arvioita esimerkiksi kustannuksista, projektiajoista, työmäärästä sekä resursseista. Lisäksi osalle kriteereistä sovittiin työn ohjaajan kanssa tietyt arvot, joita niiden arvioinnissa käytetään. Nämä arvot eivät välttämättä vastaa tämän hetkistä tilannetta, mutta niiden avulla saadaan eri vaihtoehtojen välillä olevat erot selvitettyä.

6 Toteutustapojenvertailu

Tässä luvussa käydään läpi edellisessä luvussa esitetyjen vertailukriteereiden perusteella työssä määritettyjä tuloksia. Tulokset on jaettu taulukoihin edellisessä luvussa esitetyn jaottelun mukaan eli kustannusjaottelu, aikataulu ja resurssit, tekninen riskitaso, elektroniikan hinta, muunneltavuus sekä muut kriteerit. Tulokset käydään läpi myöskin allisestiprustellenesiteltyinä.

6.1 Kustannusjaottelu

Kustannusjaottelun vertailutulokset ovat esitettyinä taulukossa 7. Sisäisten työkustannusten arviot perustuvat työn ohjaajan tekemiin kustannuslaskelmiin jo toteutuneista kehitysprojekteista ja arvioihin menneillä olevista ja tulevista projekteista. Näihin arvioihin sisältyvät myös arviot siitä, minkälaisen suhteellisen työkuorman eri projektit tuottavat yrityksen työntekijöille projektin aikana. Selkeästi pienimmät sisäiset kustannukset on vaihtoehdolla 1, eli kaupallisilla komponenteilla toteutettavalla vaihtoehdolla. Se on määrittelyn ja suunnittelun osalta selkeästi helpoin ratkaisu ja se on nopeimmin toteutettavissa. Tästä syystä kulutkin jäävät selvästi pienimmiksi. Suurimmat sisäiset työkustannukset kerättyvät suurimman integrointiasteen toteutukselle. Tämä johtuu toteutuksen monimutkaisuudesta ja teknisestä vaativuudesta aiheutuvasta selvitys- ja määrittelytyöstä sekä ASIC-ratkaisun evaluoinnista. Tämän ratkaisun ja vaihtoehtojen 6 ja 7 välillä ei ole kuitenkaan hirvittävän suurta eroa sisäisten kustannusten määrässä, koska nämäkin kaksi vaihtoehtoa ovat teknisesti vaativia ja määrittelyn ja evaluoinnin osalta paljon vaikeampia. Loput neljä vaihtoehtoa ovat hyvin lähellä toisiaan sisäisten kustannusten osalta. Näissä on huomioitava se, että tiettyjen ratkaisujen aiempi toteutus vaikuttaa näissä vaihtoehdoissa tarvittavaan työmäärään.

Taulukko 7: Kustannusjaottelu

Versio	Sisäiset työkustannukset	Suunnittelu ja alihankinta	”Second source prototyping”	Tuotannon aloitus
1	100k€	80k€	20k€	100k€
2	190k€	220k€	60k€	220k€
3	190k€	220k€	60k€	200k€
4	200k€	220k€	80k€	200k€
5	200k€	260k€	60k€	200k€
6	260k€	280k€	80k€	220k€
7	280k€	280k€	80k€	220k€
8	320k€	450k€	100k€	300k€

Suunnittelun ja alihankinnan kustannusarvioihin sisältyy suunnittelu, simuloinnit sekä tarvittavien MPW-kierrosten kustannukset. Arvioiden pohjana on käytetty työn ohjaajan

aiemmin tekemiä laskelmia kehitysprojektien kustannuksista sekä hänen arvioitaan tulevien projektien työmääristä ja kustannuksista. Kaupallisilla komponenteilla toteutetussa versiossa ulkoisen työn tarve on pieni, koska ulkopuolisen suunnitteluavun tarve on vähäinen. Tästä syystä tämän toteutuksen ulkoiset kustannukset ovat selvästi pienimmät. Selkeästi kalleimmat ulkoiset kustannukset on suurimman integrointiasteen vaihtoehdolla. Tämä johtuu ensinnäkin käytettävästä kalliimmasta puoli johdeprosessista sekä suunnittelun vaikeudesta. Tässä toteutuksessa tuntemattomia tekijöitä on paljon, joten suunnitteluun ja simulointiin kuluu paljon aikaa. Lisäksi työn ohjaajan arvioiden mukaan tässä toteutuksessa tarvitaan yksi MPW-kierrös enemmän kuin hieman helpommissa ratkaisuisa. Muiden toteutusvaihtoehtojen kohdalla ulkoisen työn aiheuttamat kustannukset ovat aika lähellä samaa suuruusluokkaa 250000 euron molemmin puolin. Erot näiden vaihtoehtojen välillä muodostuvat lähinnä tarvittavan simuloinnin ja suunnittelun osalta. Pienemmän integrointiasteen vaihtoehdoissa simulointiin kuluva aika on hieman pienempi kuin korkeamman integrointiasteen toteutuksissa.

Niin sanottu ”second source prototyping” aiheuttaa kustannuksia lähinnä ASIC-valmistuksen osalta. Kaupallisten komponenttien osalta kustannukset katsotaan hyvin pieniksi. Kustannuksiin sisältyy ASIC-toteutuksissa yksi MPW kierros sekä säisäisäettä ulkoisia työ kustannuksia toteutuksen vaikeustasosta riippuen. Mitä vaikeampi toteutus, sitä suurempi on tarvittava työmäärä ja sitä kautta työhön kuluva kustannus. ASIC-ratkaisujen osalta kustannuksen hajonta on välillä 60000-10000 euroa, kun se kaupallisen toteutuksen osalta on 20000 euroa. On huomattava, että kaupallisten komponenttien osalta laskelma kattaa useampien komponenttien toimittajien määrittämisen.

Tuotannon aloituskustannukset perustuvat hyvin pitkälle työn ohjaajan tekemiin kustannuslaskelmiin aiemmin toteutetuista projekteista sekä hänen tekemiinsä arvioihin. Näitä arvioita voidaan pitää riittävän tarkkoina aiheuttamaan eri vaihtoehtojen tuotannon aloituskustannukset. Pienimmät tuotannon aloituskustannukset on selkeästi kaupallisilla komponenteilla toteutetulla ratkaisulla. Tämä siitä syystä, ettei tähän ratkaisuun sisälly kustannuksia, joita aiheutuisi ASIC-sirujen valmistukseen siirtämisestä. Selkeästi kalleimmat kustannukset on vaihtoehdolla 8, koska ASIC-tuotannon aloituskustannukset ovat työn ohjaajan mukaan suuremmat kuin muissa ratkaisuisa, joissa käytetään 0,35 µm viivanleveyttä. Muissa ASIC-ratkaisuisa on vain pieniä eroja tuotannon aloituskustannuksissa.

6.2 Aikataulukaresurssit

Aikataulu ja resurssit-kriteereiden vertailutulokset ovat esitettyinä seuraavalla sivulla taulukossa 8. Taulukossa 8 olevat erot esiselvitykseen kuluva ajasta perustuvat teknisen toteutuksen vaikeustasoon. Tekninen vaikeustaso on matalin täysin

kaupallisilla komponenteilla toteutetulla vaihtoehdolla. Komponentit ovat jossain määrin saatavilla, joten esiselvitys ei vaadi niin suurta aikaa kuin tutkimus, jota joudutaan tekemään ASIC-ratkaisujen osalta ennen projektien aloittamista. ASIC-projektit sisältävät enemmän riskejä. Näistä riskeistä johtuen on tehtävä perusteellista selvitystä niihin liittyvistä teknisistä riskeistä jatoisaaltamyös niihin liittyvistä eduista jähaitoista. Mitä monimutkaisempi toteutus, sitä kauemmin esiselvitys vie aikaa. Tästä syystä vaativimpien toteutusten osalta esiselvitysaika on jonkin verran pidempi.

Taulukko 8 Aikataulu ja resurssit

Versio	Esi- selvitys	Tuotteen kehitys-aika	Aikataulun epävarmuus	Sisäisten resurssien tarve	Ulkoisten resurssien tarve
1	2-4	12	Pieni	Matala	Matala
2	4-6	18	Pieni	Keskitaso	Keskitaso
3	4-6	24	Pieni	Keskitaso	Keskitaso
4	6-8	30	Keskitaso	Korkea	Korkea
5	4-6	24	Keskitaso	Keskitaso	Korkea
6	6-8	30	Keskitaso	Keskitaso	Keskitaso
7	6-8	36	Suuri	Korkea	Korkea
8	6-8	36	Suuri	Korkea	Korkea

Tuotteen kehitysajat on arvioitu työn ohjaajan kanssa sovitun jaottelun pohjalta. Tällä perusteella lyhin kehitys-aika on kaupallisilla komponenteilla toteutetulla ratkaisulla. Tämä johtuu yksinkertaisesti siitä, että tällaiseen ratkaisuun ei vaadita aikaa vievää uusien komponenttien suunnittelua. Kaikissa toteutussvaihtoehdoissa, joissa RF- ja analogiaosia integroidaan digitaalipiirin kanssa samalle sirulle, tuotteen kehitysajaksi on arvioitu 24-36 kuukautta teknisen toteutuksen arvioidusta vaativuudesta riippuen. Vaativimmat ratkaisut, joissa lähes kaikki lohkot ovat integroituna samalle sirulle, vievät eniten aikaa. Vaihtoehdon, jossa GPS-kantataajuusosat ja DSP osa ovat integroituna, toteutusajaksi on arvioitu 18 kuukautta, koska tässä ratkaisussa integroidaan digitaalisia ja toteutusvaihtoehtoon liittyvät ongelmat ja niiden ratkaisut ovat tiedossa. Tuotteen kehitysajojen osalta on syytä huomata, että käytettävien alihankkijain aikaisemmat tiedot ja kokemus eri lohkojen integroinnista voivat jonkin verran vähentää kehitys-aikaa.

Aikataulun epävarmuudet riippuvat hyvin paljon tuotteen teknisestä vaikeustasosta sekä siitä kuinka hyvin eri riski- ja häiriötekijät on saatettu etukäteen arvioitua. Pitkiin projekteihin sisältyy myös yleensä suurempi aikataulun epävarmuus kuin lyhyisiin projekteihin. Toisaalta tässä on huomioitava myös se, että epävarmuus ei välttämättä tarkoita sitä, että projekti venyisi vaan ASIC-toteutuksissa voi käydä jopa toisin päin, mikäli suunnittelu on tehty hyvin huolella. Tämä on kuitenkin aika harvinaista. Kaupallisilla komponenteilla toteutettaessa tekninen riskitaso on hyvin alhainen ja aikatauluun liittyvät epävarmuudet ovat hyvin pieniä. Myös vaihtoehtojen 2 ja 3 osalta

aikatauluihin liittyvä epävarmuus on katsottu pieneksi, koska niihin liittyvät tekniset ratkaisut ovat jo tiedossa. Vaihtoehtojen 4, 5 ja 6 osalta aikatauluihin sisältyvä epävarmuus katsotaan keskitasoiseksi. Tämä epävarmuus tulee vaihtoehdon 5 osalta analogiamittauksen yhdistämisestä digitaalielektroniiikan kanssa, vaihtoehdon 6 osalta RF-osien integroinnista ja vaihtoehdon 4 osalta näistä molemmista. RF-, analogia- ja digitaaliosien kesken voi aiheutua odottamattomia häiriöitä, jotka voivat pidentää projektiin kuluvaan aikaan. Vaihtoehtojen 7 ja 8 osalta aikataulun epävarmuus katsotaan suureksi integrointiasteen korkeudesta johtuen. Näihin molempiin vaihtoehtoihin sisältyy paljon tuntemattomia tekijöitä, jotka voivat aiheuttaa aikatauluihin merkittäviä muutoksia.

Tarvittavat resurssit lisääntyvät toteutusratkaisun teknisen vaikeustason noustessa. Lisäksi aikaisempi kokemus tiettyjen lohkojen integroinnista yhteen vaikuttaa tarvittavien resurssien tasoon huomattavasti, koska kun ratkaisuihin tarvittavat tiedot ovat kasassa jo etukäteen, niin tarvittavien resurssien määrä pienenee. Teknisesti helpoimmin toteutettavassa, kaupallisista komponenteistä koostuvassa, ratkaisussakin sisäisten että ulkoisten resurssien tarve on suhteellisen pieni. Tämä siitä syystä ettei uusia piiriratkaisuja tarvitse suunnitella vaan kaikki komponentit ovat jo valmiina. Vastaavasti vaihtoehdoissa 4, 7 ja 8 sekä sisäisten että ulkoisten resurssien tarve on suurimmillaan, koska näissä ratkaisuissa on eniten tuntemattomia tekijöitä ja integrointiaste on korkea. Muiden vaihtoehtojen kohdalla tarvittavien resurssien määrä jää näiden ääripäiden väliin, koska näihin vaihtoehtoihin liittyvät ongelmakohdat ja niiden ratkaisut ovat suhteellisen hyvin tiedossa aikaisempien toteutusten ja projektien ansiosta.

6.3 Tekninen riskitaso

Tuntemattomien tekijöiden arviointiin vaikuttavat teknisen toteutuksen vaikeus sekä Vaisalalla alihankkijan aiempi kokemus erilaisten vaihtoehtojen toteutuksista ja niiden ongelmakohdista. Kaupallisilla komponenteilla toteutuksessa ei ole juurikaan tuntemattomia tekijöitä, käytännössä kaikki tarvittava on silloin tiedossa. Myös vaihtoehtojen 2 ja 3 tuntemattomat tekijät voidaan katsoa mataliksi, koska niistä on vahvaa aikaisempaa osaamista. Vaihtoehdon 6 kohdalla tuntemattomat tekijät ovat keskisuuret, koska toteutuksesta on jonkin verran tietotaitoa aiemmista projekteista, mutta kaikkea ei ole tiedossa. Korkeamman integrointiasteen vaihtoehdoissa, joissa analoginen mittauselektroniiikka integroidaan muiden osien kanssa, tuntemattomat tekijät ovat ennaltakatsoituja suurimmat.

Häiriintyvyystekijät arvioidaan nimenomaan elektroniiikan sisäisten häiriötekijöiden kannalta. Ulkoiset häiriötekijät huomioidaan suorituskyvyssä ja häiriösietoisuudessa. Häiriintyvyystekijöissä on hyvin pitkälle samanlainen jako kuin tuntemattomien tekijöiden suhteen. Tämä mahdollinen häiriintyvyys johtuu juuri tietyistä

tuntemattomista tekijöistä, eli siitä minkälaisia häiriitä syntyy kun yhdistetään samalle sirulle RF- ja digitaalielektroniikkaa ja herkkää analogiamittauselektroniikkaa. Vaihtoehtoisissa 1 ja 2 häiriintyvyystekijät ovat hyvin pieniä ja ne ovat suunnilleen ennaltatiedossa. Vaihtoehtojen 3 ja 6 kohdalla häiriintyvyystekijöitä voi jonkin verran esiintyä, kun RF-elektroniikkaa yhdistetään digitaalielektroniikan kanssa. Eniten häiriintyvyystekijöitä voi syntyä vaihtoehtoisissa, joissa analogiamittauselektroniikka on integroituna muun elektroniikan kanssa. Teknisen riskitason vertailutulokset ovat esitettyinä taulukossa 9.

Taulukko 9 Tekninen riskitaso

Versio	Tuntemattomat tekijät	Häiriintyvyystekijät	Suorituskyky ja häiriösietoisuus	Komponenttien saatavuus	Osaavan työvoiman saatavuus
1	Matala	Matala	Huono	Hyvä	Helppo
2	Matala	Matala	Keskitaso	Keskitaso	Helppo
3	Matala	Keskitaso	Hyvä	Keskitaso	Helppo
4	Korkea	Korkea	Hyvä	Huono	Keskitaso
5	Korkea	Korkea	Keskitaso	Keskitaso	Keskitaso
6	Keskitaso	Keskitaso	Hyvä	Huono	Helppo
7	Korkea	Korkea	Keskitaso	Huono	Keskitaso
8	Korkea	Korkea	Hyvä	Huono	Vaikea

Suorituskyvyn ja häiriösietoisuuden osalta kaupallisilla komponenteilla toteutettu vaihtoehto katsotaan suhteellisesti heikoimmaksi vaihtoehtoksi, tässä tapauksessa mittauselektroniikan tarkkuuden ja jähvyden osalta. Muissavaihtoehtoisissa käytössä joko erillinen mittauselektroniikka-ASIC tai mittauselektroniikka on integroituna muun elektroniikan kanssa, jolloin suorituskyvyn parannukseksi voidaan katsoa myös resistiivisen mittauksen mahdollisuus. Vahtikoira toiminto löytyy jokaisesta toteutuksesta, joten sitä ei voi käyttää vertailupäristeenä. Molempien taajuusalueiden käyttömahdollisuus katsotaan suorituskykyä parantavaksi tekijäksi. Näillä perusteilla vaihtoehdot 3, 4, 6 ja 8 on määritetty hyväksi suorituskyvyn ja häiriösietoisuuden osalta. Kaupallisilla komponenteilla toteutetulla versiolla suorituskyky on huonoin. Vaihtoehtoisilla 2, 5 ja 7 suorituskyky on määritetty keskitasoiseksi, koska niissä molempien taajuusalueiden käyttö ei ole mahdollista, vaikkamittauselektroniikka onkin parempa kuin kaupallisilla komponenteilla toteutetussa versiossa.

Komponenttien saatavuutta määritellään sen mukaan kuinka iso osa elektroniikasta on toteutettuna ASIC-ratkaisuna. Jako saatavuuden osalta on tehty niin, että kaupallisten komponenttien osalta saatavuus on määritetty hyväksi, osittain integroiduissa ratkaisuisa keskitasoiseksi ja suurimman integrointiasteen osalta saatavuus on määritetty huonoksi. Tällä jaottelulla ei tarkoiteta sitä etteikö integroitujen piirien saatavuus ja riittävyys olisi hyvä. Jaotus kuvaa enemminkin käytettävissä olevien komponenttitoimittajien määrää. Kaupallisilla komponenteilla on monia toimittajia

joista valita. Pienemmän integrointiasteen piireillä on taas on helpompaa ja nopeampaa hankkia uusia valmistajia kuin suuremman integrointiasteen tapauksessa.

Osaavan työvoiman saatavuutta on jaoteltu sen mukaan onko osaava työvoima jo valmiina, saadaanko tarvittava työvoima suhteellisen helposti vai onko osaajien löytäminen suhteellisen vaikeaa ja onko tarvittava osaaminen vaativaa. Vaihtoehdoissa 1, 2, 3 ja 6 osaava työvoima on josta saatavilla, joten niiden osalta saatavuus on helppoa. Vaihtoehdoissa 4, 5 ja 7 osaamista tarvitaan jonkin verran lisää, koska aiemmin mitta- ja elektronikkaa ei ole integroitu muiden osien kanssa. Nämä vaihtoehdot on määritetty keskitasoksi osaavan työvoiman saatavuuden osalta. Vaihtoehto 8, jossa integrointiaste on korkein, on vaikein toteuttaa ja siihen tarvitaan eniten uutta osaamista. Tästä syystä sen kohdalla osaavan työvoiman saatavuus on vaikeaa.

6.4 Elektroniikan hinta

Elektroniikan hinnan vertailutulokset ovat esitettyinä taulukossa 10. Toiminnallisten komponenttien hinnat perustuvat tarjouskyselyihin eri komponenttivalmistajilta, jo toteutuneisiin projekteihin sisältyviin hintoihin, suunnittelutoimiston arvioihin sekä itseni tekemiini arvioihin, jotka perustuvat suunnittelutoimistolta sekä työn ohjaajalta saamiini tietoihin ASIC-ratkaisujen hintoihin vaikuttavista tekijöistä. Tarjosten, nykyisten komponenttien hintojen sekä ASIC-arvioiden perusteella halvimaksi muodostuu suurimman integrointiasteen toteutus. Tämä arvio perustuu pitkälti suunnittelutoimiston asettamiin tavoitearvoihin tuon ASIC-toteutuksen hinnasta. Eroa kalleimman ja halvimman vaihtoehdon hinnan välille kertyy toiminnallisten komponenttien osalta noin 6 dollaria, joka on todellisesti merkittävä ero. Vaihtoehtojen 4, 6 ja 7 hinnat ovat seuraavaksi edullisimmat. Ne ovat ASIC-ratkaisujen osalta samanlaisessa vaikeustasossa, joten hintaluokka niiden osalta on suunnilleen sama. Näiden toteutusten osalta ASIC-toteutuksen vaikeus on pyritty suhteuttamaan suurimman integrointiasteen ASIC-ratkaisun vaikeustasoon ja arvioimalla hinta sen perusteella.

Taulukko 10 Elektroniikan hinta

Versio	Toiminnallisten komponenttien hinta	Oheiskomponenttien hinta	Hinnan riippuvuus volyymeistä
1	19	3	Pieni
2	20	3	Keskitaso
3	18	3	Keskitaso
4	16	2	Suuri
5	18	3	Keskitaso
6	16	2	Suuri
7	16	2	Suuri
8	14	2	Suuri

Pieniä eroja näiden ratkaisuiden välille varmasti syntyisi tehtäessä tarkempaa ja pidemmälle vietyä kustannuslaskelmaa, mutta tälläkin tavalla hintaluokat saadaan selville. Laskelmien perusteella kallein toteutus olisi vaihtoehto 2. Tähän on tosin voinut vaikuttaa jonkin verran työn pitkän keston aiheuttama vääristymä valuuttakurssien reilun muutoksen kautta. Vaihtoehdot 1, 3 ja 5 vaikuttavat näiden laskelmien osalta suunnilleen saman hintaluokan toteutuksilta. Tästä voidaan päätellä, että vähäisellä integrointiasteella ei vielä saavuteta hintaetua kaupallisesti saatavissa oleviin komponentteihin nähden, mutta toiminnallista ja koko etua niillä voidaan saavuttaa.

Taulukon 10 perusteella on helposti nähtävissä, että ei vaihtoehtojen välillä tule erityisen merkittävää eroa oheiskomponenttien hinnoista. Hintatuloero ei välttämättä olisi niinkään suuri kuin taulukossa on mainittu, kun lopulliset periaate suunnittelutehtäisiin ja laskelmat tehtäisiin uudelleen. Nyt on vain karkeasti arvioitu oheiskomponenttien hintaa käyttäen nykyisen version perusteella tehtyä laskelmaa, jossa oheiskomponenttien hinta on noin 13% koko elektroniikan hinnasta. Oheiskomponenttien hinnat on toiminnallisten komponenttien hinta-arviosta vielä pyöristäen lähimpää kokonaislukuun. Uskon kuitenkin, että tällä tavalla laskettu suuruusluokka on riittävän hyvin suuntaa antava. Merkittävin vaikutus elektroniikan hintaan on kuitenkin toiminnallisilla komponenteilla.

Massatuotantona tuotettavissa komponenteissa hinnan riippuvuus volyymeistä on aina merkittävää. Tämä hintariippuvuus kuitenkin korostuu etenkin pitkälle integroiduissa ASIC-komponenteissa, joiden suunnittelu ja valmistus perustuu juuri siihen, että kalliit suunnitteluvaiheen kulut saadaan suhteellisen nopealla takaisinmaksuajalla komponsoitua nimenomaan elektroniikan hintasäästöinä ja sitä kautta saatavana korkeampana katteena. Kaupallisilla komponenteilla toteutetun vaihtoehdon hinnan riippuvuus volyymeistä on määritetty pieneksi siitä syystä, että sillä toteutuksella volyymeillä on suhteellisesti pienin vaikutus hintaan. Vaikutus on kyllä hyvinkin merkittävä mutta näiden vaihtoehtojen osalta kuitenkin pienin. Hinnan riippuvuus volyymeistä on määritetty suureksi vaihtoehdoissa, joissa integrointiaste on nostettu suurimmaksi. Nuo vaihtoehdot ovat 4, 6, 7 ja 8. Pienemmän integrointiasteen vaihtoehdoissa riippuvuuden määritetty keskitasoisiksi.

6.5 Muunneltavuus

Toteutustavaton ja ettukahteenryhmään käytettävissä olevien lähetystaajuuksien osalta. Niissä toteutustavoissa, joissa lähetin on integroituna, on käytettävä lähetystaajuus valittavissa ohjelmoinnin avulla. Niissä toteutustavoissa, joissa lähetin ulkoisena komponenttina, on käytettävissä vain toinen taajuusalueista. Tämä siitä syystä, että kaupallisesti ei oletarjolla järkevään hintaan lähetintä, jolla molempien taajuusalueiden käyttö olisi mahdollista. Eri taajuusalueille olisi siis oltava omat sondinsa sen mukaan

kumpaa lähetintä käytettäisiin. Integroinnin etuna siistulisi molempien taajuusalueiden mukana antuomat laajemmat käyttömahdollisuudet.

Samoin kuin lähetystaajuuksien osalta, toteutustapa vaikuttaa myös siihen onko resistiivinen mittaus käytettävissä. Toteutusvaihto ehdot on jaettu kahteen ryhmään sen mukaan onko mittauselektronikka integroituna vai erillisenä ratkaisuna. Niissä toteutuksissa, joissa mittauselektronikka on integroituna, katsotaan olevan mahdollisuus resistiivisen mittauksen käyttöön. Tässä yhteydessä diskreeteillä komponenteilla tai muuten ulkoisesti toteutetuilla ratkaisuilla ei katsota olevan valmiutta resistiivisiin mittauksiin. Muunneltavuuden vertailutulokset ovat esitettyinä taulukossa 11.

Taulukko 11 Muunneltavuus

Versio	Lähetystaajuus	Resistiivinen mittaus	Jatkokehityksen helppous	Sopivuuseri sondityypeille
1	400 tai 1680	Ei	Helppo	Keskitaso
2	400 tai 1680	Ei	Keskivaikea	Huono
3	400 ja 1680	Ei	Keskivaikea	Keskitaso
4	400 ja 1680	Kyllä	Vaikea	Hyvä
5	400 tai 1680	Kyllä	Keskivaikea	Huono
6	400 ja 1680	Ei	Vaikea	Keskitaso
7	400 tai 1680	Kyllä	Vaikea	Huono
8	400 ja 1680	Kyllä	Vaikea	Keskitaso

Jatkokehityksen helppoutteen on suuri vaikutus integrointiasteella. Pitkälle integroiduissa ratkaisuisa jatkokehitys on hyvin työlästä, aikaa vievää ja kallista. Tämä johtuu siitä, että maskikerrokset joudutaan aina suunnittelemaan uudelleen. Helpointa jatkokehityksen tekeminen on kaupallisilla komponenteilla toteutetulla ratkaisulla. Tietenkin saatavilla olevien komponenttien ominaisuudet ja toiminnat rajaavat kehittämismahdollisuuksia enemmän kuin integroitujen piirien tapauksessa. Muutokset kuitenkin pystytään tekemään suhteellisen nopeasti ja edullisesti. Alhaisen integrointiasteen ASIC-ratkaisut katsotaan olevan keskitasoa jatkokehityksen helppouden osalta. Niissä on ASIC-ratkaisujen mukanaan tuomat haittansa, mutta maskikerroksia ei tarvita aivan niin paljon kuin monimutkaisissa ja vaativammissa ratkaisuisa, joten muutosten aiheuttamat kustannukset jäävät pienemmiksi. ASIC-ratkaisujen muutosten kalleudesta ja vaikeudesta johtuen on erittäin tärkeää panostaa alkuperäiseen suunnitteluun jotta vaatimuksiin, ettei muutoksi tarvitsisitehdä.

Eri toteutusten sopivuutta eri sondityypeille on arvioitava sen perusteella miten hyvin toteutuksen ASIC-ratkaisu olisi käytettävissä muissa sondityypeissä. Kaupallisilla komponenteilla toteutettua versiota voidaan pitää keskitasoisena sopivuudeltaan muille sondityypeille. Tämä siitäsyytä, että ratkaisua olisi mahdollista käyttää muissakin kuin GPS-paikannukseen perustuvissa sondeissa muuttamalla elektronikkaa vain GPS-osan

kohdalta. Vaihtoehdot 2, 5 ja 7 katsotaan huonosti yhteensopiviksi muiden sondityyppien kanssa. Vaihtoehto 2 ja 7 siitä syystä, että käytössä on vain yksi taajuusalue ja sitovuus GPS-käyttöön paikannuksen osalta. Vaihtoehto 5 siitä syystä, että se sitoo vain yhden taajuusalueen käyttöön. Vaihtoehdot 3, 6 ja 8 sopivat kohtalaisesti muille sondityypeille. Vaihtoehto 3 siitä syystä, että se ei sido käyttöä johonkin tiettyyn paikannustapaan ja käytettävissä ovat molemmat taajuusalueista. Vaihtoehdoilla 6 ja 8 on haittapuolena sitovuus GPS-käyttöön, mutta molempien taajuusalueiden käyttömahdollisuus nousee ne keskitasoluokkaan. Vaihtoehdossa 8 on vielä tunnusmerkittävä elektronikan löytyminen integroituna. Parhaiten toteutustavoista muille sondityypeille sopii vaihtoehto 4, joka mahdollistaa molempien taajuusalueiden käytön, eikä sido tiettyyn paikannusjärjestelmään. Lisäksi vaihtoehdossa 4 on vielä tunnusmerkittävä elektronikkakin integroituna mahdollistaen käytön myös resistiivisiin mittauksiin.

6.6 Muutkriteerit

Muiden kriteereiden vertailutulokset ovat esitettyinä taulukossa 12. Sopivuudessa tuotantojärjestelyihin ei eri vaihtoehtojen välillä tule kovin suuria eroja. Joitain muutoksia joudutaan mahdollisesti tekemään esimerkiksi ASIC-valmistajien suhteen, etenkin mikäli nykyiseltä valmistajalta ei löydy vaihtoehtoja, joihin voidaan käyttää 0,35 mikrometrin viivanleveyden sijasta 0,18 mikrometrin viivanleveyttä. Lisäksi pieniä hankitoja saatetaan joutua tekemään tuotantolaitteiden osalta. Tarvittavat muutokset eivät kuitenkaan tuokovinkaan merkittäviä kustannuksia.

Taulukko 12 Muutkriteerit

Versio	Sopivuustuotantojärjestelyihin	Virrankulutus ja käyttöjännitteet	Koko	Kopioitavuus
1	Keskitaso	Suuri/3,6V	Suuri	Helppo
2	Hyvä	Keskitaso/5V	Suuri	Keskivaikea
3	Hyvä	Keskitaso/5V	Keskikoko	Keskivaikea
4	Keskitaso	Pieni/3V	Pieni	Vaikea
5	Keskitaso	Keskitaso/3,6V	Keskikoko	Keskivaikea
6	Keskitaso	Keskitaso/5V	Keskikoko	Vaikea
7	Keskitaso	Pieni/3,6V	Pieni	Vaikea
8	Keskitaso	Pieni/3V	Pieni	Vaikea

Käyttöjännitteiden osalta merkittävimmät erot tulevat mittauselektronikan sekälähetinlohkon toteutuksesta riippuen. Ne vaihtoehdot, joissa käytetään nykyisin käytössä olevaa mittauselektronikkalohkoa vaativat käyttöjännitteeksi 5V. Mikäli lähetin on käytössä kaupallista lähetintä, voidaan joutua käyttämään 3,6 voltin jännitettä. Lähetintä voisi käyttää pienemmälläkin käyttöjännitteellä, mutta toiminnan takaamiseksi kaikissa olosuhteissa tarvitaan 3,6 voltin jännite. Pitkälle viedyissä ASIC-ratkaisuissa, joissa sekä lähetin että mittauselektronikka ovat integroituna voidaan

käyttää 3V jännitettä. On huomattava, että sekä 3,6 V että 3V tapauksissa voitaisiin käyttää 6V paristo nykyisin 9V pariston sijasta. Virrankulutuseimuodostu ongelma minkään ratkaisun osalta, koska käytettävä paristo kyllä riittää takaamaan riittävän pitkän toiminta-ajan. Kaupallisten komponenttien valmistajat huomioivat nykyisin myös virransäätöratkaisut tuotteissaan. Esimerkiksi GPS-ratkaisuissa päästään tehonkulutuksen osalta helposti alle radiosondin spesifikaatioissa vaaditun 100mW maksimirajan. Pienimpään virrankulutukseen päästään suunnittelutoimiston laskelmien mukaan korkeimman integrointiasteen toteutuksessa. Vastaavasti suurin virrankulutus onkaupallisilla komponenteilla toteutetussa ratkaisussa.

Elektroniikankoossa on selkeitä eroja eri toteutus tapavaihtoehtojen välillä. Suurinkoko on kaupallisilla komponenteilla toteutetussa ratkaisussa. Tämä siitä syystä, että tässä toteutuksessa kaikki lohkot ovat erillisinä ja viettä näin fyysisesti eniten tilaa. Pienin kokosaavutetaan korkeimman integrointiasteen toteutuksella eli vaihtoehdolla 8. Tässä vaihtoehdossa selvitetään yhdellä piirilevyllä, kun pahimmassa tapauksessa joudutaan käyttämään kolme erillistä piirilevyä. Tämä piirilevyjen määrä johtuu siitä, että sondin kotelon kokoa ei haluta ainakaan kasvattaa. Nämä piirilevyt ovat yksipuolisia ja ne on liitetty toisiinsa painoliittimien avulla. Muissa vaihtoehdoissa koot sijoittuvat näiden kahden ääripään välillä toteutuksen integrointiasteesta riippuen. Lisäksi kokoon vaikuttaa myös se mikä tai mitkä lohkoista ovat ASIC-toteutuksen ulkopuolella. Tässä kohtaa on syytä muistaa, että nyt puhutaan vain elektroniikan koosta, ei koko sondin koosta. Esimerkiksi toteutustavat, joissa voidaan käyttää nykyistä pienempää paristoa, on vaihtoehto, joka on mahdollisesti elektronikan osalta pienempi, mutta käyttää 9V paristoa.

Kopioitavuuden helppouteen vaikuttaa toteutuksen integrointiaste. Kaupallisilla komponenteilla toteutettu vaihtoehto on helposti kopioitavissa elektroniikan osalta, koska kaikki komponentit ovat myös kilpailijoidensa tavissa hyvin helposti. Käytettäessä integroituja piirejä sondin elektroniikan täydellisen kopiointi on lähes mahdotonta, ilman ASIC-toteutuksen piirikaavion päätymistä väriin käsiin. Erojen saamiseksi eri ASIC-toteutusten välille, päätin kategorisoida toteutusvaihtoehdot sen mukaan onko lohkoista 0-1 vai enemmän toteutettu ulkoisilla komponenteilla. Ne vaihtoehdot joissa on enemmän kuin yksi ulkoisena onarvioitua keskeiseksi. Näiden vaihtoehtojen osalta ulkoisesti toteutetut lohkot ovat kopioitavissa suhteellisen helposti. Loput vaihtoehdoista onarvioitu vaikeiksi, koska niitä on lähes mahdotonta kopioida.

6.7 Parhaiden toteutusvaihtoehtojen valinta

Diplomityön tekemisen aikana kolme selkeästi varteen otettava vaihtoehtoa alkoi hahmoitua mielessäni. Nämä toteutustavat ovat vaihtoehdot 1, 4 ja 8. Vaihtoehto 1 on valittu tähän erityisesti sillä perusteella, että se olisi hyvin nopealla noin 12 kuukauden aikataululla toteutettavissa. Projektiin kuluvat kustannukset olisivat hyvin pienet.

Elektroniikan kulutkin voidaan pitää siedettävänä. Tähän ratkaisuun sisältyvät tekniset riskit ovat lähes olemattomat. Lisäksi toteutuksen pohjaa voitaisiin käyttää myös sondeissa, jotka perustuvat johonkin muuhun kuin GPS-paikannukseen. Viimeisenä perusteluaonyksipohdinnan arvoinen seikka. Mikäli suorituskyvystä voitaisiin hieman tinkiä, kaupallisilla komponenteilla toteutetun sondin elektroniikan hintaa saataisiin vielä pienennettyä, jolloin saataisiin alhaisemman suorituskyvyn laitealaiseen hintaan esimerkiksi kehittyville Afrikan maille. On kuitenkin huomattava, että pidemmällä aikavälillä tarkasteltuna kaupallisilla komponenteilla toteutettu hyvän suorituskyvyn sondi olisi mielestänivain väliaikainen ratkaisu, josta ei tule tulla Vaisalan tulospyrkä.

Vaihtoehdon 4 valinnalle on monia perusteita. Ensimmäisenäkin elektroniikan hinnaltaan se on selvityksen mukaan halvimmasta päästä jätettävissä olevat ratkaisut. Vaikka kehityskulut ovat kohtalaita, sen korkeat, kehitysaika pitkä ja tekniset riskit suhteellisen suuret niin silti tuotteen kehitykseen kuluviin kustannusten takaisinmaksuaika olisi vain noin kaksi vuotta vähemmän sondien myyntivolyymistä riippuen. Reilun 100000 kappaaleen myyntivolyymillä takaisinmaksuaika olisi aika tarkalleen 2 vuotta. Myyntivolyymi voisi olla suurempikin johtuen siitä, että ASIC-ratkaisua voitaisiin käyttää myös muissa kuin GPS-paikannukseen perustuvissa sondeissa. Tämä jakaisi ASIC-kustannuksia useammalle sondityypille ja voisi samalla pienentää myös ASIC-sirun hintaa. Tämän ratkaisun etuna olisi myös molempien taajuusalueiden käyttömahdollisuus sekä valmius myös resistiivisiin mittauksiin. Nämä seikat voisivat lisätä myyntimäärää. Muiden sondien lisäksi tällä lailla ASIC-ratkaisu voisi olla mahdollista hyödyntää myös muissa Vaisalan tuotteissa, eli tällä ratkaisulla olisi myös vahvaa yrityksen sisäistä synergiaetua. Korkean suorituskyvyn lisäksi tällä toteutuksella olisi etuna matala tehonkulutus sekä pieni koko. Yksi merkittävä asia on myös, että kyseisellä toteutuksella päästäisiin kilpailijoita parempaan suorituskykyyn. Tämä vaihtoehto vaikuttaa monipuolisten käyttömahdollisuuksien vuoksi tällä hetkellä parhaimmaltavaihtoehdolta.

Kolmantena valintana on vaihtoehto 8, jossa integrointiaste on näistä tutkituista vaihtoehdoista korkein. Tästä vaihtoehdosta tekee houkuttelevan elektroniikan alhainen hinta, korkea suorituskyky, mahdollisuus käyttää molempia lähetystaajuuksia sekä mittaustapoja, erittäin pieni koko ja matala tehonkulutus. Haittapuolena on korkea tekninen riskitaso, pitkä kehitysaika ja kalleimmat kehityskustannukset. Elektroniikan hinta on kuitenkin niin alhainen, että 100000 kappaaleen myyntivolyymillä kehityskustannusten takaisinmaksuaika olisi vain 2 vuotta, kun verrataan nykyisen toteutuksen hintaan. Lisäksi toteutuksen mahdollistamat suorituskykyyn vaikuttavat tekijät parantaisivat suorituskykyä selvästi nykyiseen ratkaisuun verrattuna. On myös muistettava, että pienen koon ansiosta sondin kokoa pystytään pienentämään. Myös 3V käyttöjännite mahdollistaa nykyistä ratkaisua pienemmän patterin käytön, joten sitäkin

kautta saavutettaisiin lisää hintasäästöä, joka voitaisiin käyttää esimerkiksi sondin myyntihinnan alentamiseen tai kehityskustannusten nopeampaan takaisinmaksuun.

Nämä kolme vaihtoehtoa erottuivat mielestäni muista, vaihtoehdot 4 ja 8 vielä selvästi. Vaihtoehdon 1 valinta taas perustuu nopeaan ja halpaan kehitykseen sekä mahdollisuuteen käyttää ratkaisumallia matalamman suorituskyvyn ja edullisemmän sondin kehitykseen uusille markkina-alueille Aasiaan ja Afrikkaan. Vaihtoehtoihin 4 ja 8 sisältyy kyllä suuriakin riskejä ja kysymysmerkkejä, mutta niillä mahdollisesti saavutettavat edut ja hyödyt ovat niin merkittäviä, että nuo riskit kannattaa mielestäni ottaa. Ja nuo hyödyt myös nostavat nämä kaksi vaihtoehtoa muiden vaihtoehtojen yläpuolelle.

7 Pohdinnat

Työn lähtökohtaisiin tavoitteisiin päästiin ja kolme sondin elektroniikan optimaalisinta toteutusvaihtoehtoa löydettiin. Tietenkin näihin sisältyy joitain kompromisseja, mutta niiltä ei voi välttyä. Lisätavoitteeksi asetettua tarkempaa tutkimusta ei pystytty työn laajuuden vuoksi tekemään. Lisäksi on todettava, että työn avulla ei pyrittykään saamaan selville esimerkiksi elektroniikan tarkkoja hintoja vaan selvittämään niiden vertailukelpoisuusluokaterivaihtoehtojen välille.

Elektroniikan hinta-arvioijat toteutuskustannusarvioita tarkastellessa on syytä muistaa päivittää ne vastaamaan nykyisiä hintatasoja. Diplomityön aloituksen jälkeentapahtunut merkittävä muutos esimerkiksi valuuttakursseissa on vaikuttanut valuutta-arvoihin huomattavasti. On syytä huomata myös se, että ASIC-ratkaisujen hintoja on arvioitu perustuen ne alihankkijana toimivan suunnitteluyrityksen arvioihin ja heidän tietyille ratkaisulle asettamiin tavoitearvoihin. On muistettava, että lopulliset hinnat eivät välttämättä vastaa tavoitehintoja. Samoin kuin valuuttakurssien muutos on voinut aiheuttaa pientä vääristymää elektroniikan hintaverailuun. En kuitenkaan usko, että tällä muutoksella on ollut vaikutusta mielipiteeseen parhaimmista toteutusvaihtoehdoista.

Tätä diplomityötä voi käyttää hyvänä pohjatietona lähdettäessä miettimään tulevaisuuden ratkaisuja radiosondin elektroniikan toteuttamiseen. Kolmesta parhaimmalta vaikuttavasta vaihtoehdosta olisi tehtävä vielä tarkempaa lisäselvitystä, ennen kuin niistä voisi valita parhaimman vaihtoehdon, josta aloittaa tuotekehitysprojekti.

Mainitsin jokappaleessa 6.7 mahdollisuudesta suunnitellun nopeasti ja halvasti edullinen, heikomman suorituskyvyn radiosondi esimerkiksi kehittyville Aasian ja Afrikan markkinoille. Tätä vaihtoehtoa olisi hyvä perusteellisesti pohtia, koska kehittyvien markkinoiden kautta olisi mahdollista saavuttaa merkittävää kaupan kasvua. Korkean suorituskyvyn laitteet kuitenkin voivat olla noille markkinoille liian kalliita, joten tuotevalikoimasta olisi hyvä löytyä myös edullinen vaihtoehto hieman heikommalla suorituskyvyllä.

Lähdeluettelo

- [1] Vaisalanhistoria. VaisalaOy.27.07.2008.HTML -dokumentti.
< <http://www.vaisala.fi/vaisalayrityksena/historia>>
- [2] Unknown.Chapter12MeasurementofUpperAirPressure, Temperature AndHumidity. WorldMeteorologyorganization.43s. Pdf-tiedosto.
<http://www.wmo.ch/pages/prog/www/IMOP/publications/CIMO-Guide/Draft%207th%20edition/Part1-Ch12Final_Cor.pdf>
- [3] VaisalanRS92katalogi. VaisalaOy.27.07.2008. Pdf-tiedosto.
- [4] Paldanius, T.2003.Sigma-deltaKapasitanssimitäuspiiriRadiosondissa. Diplomityö. Tampere, Tampereenteknillinenkorkeakoulu, Sähkötekniikanosasto.59s.
- [5] Wikipedia.Wheatstonebridge.HTML-dokumentti.
<http://en.wikipedia.org/wiki/Wheatstone_bridge>
- [6] Wikipedia.LinearRegulator.HTML-dokumentti.
< http://en.wikipedia.org/wiki/Linear_regulator>
- [7] ETSIEN302054-1v1.1.1(2003-03).Radiosondes tobeusedinthe 400,15MHzto406MHzfrequencyrange,Part1:Technicalcharacteristics andtestmethods.EuropeanTelecommunicationsStandardsInstitute.36s.
- [8] DraftETSIEN302454-1v1.1.1(2005-10).Radio sondestobeusedinthe 1668,4MHzto1690MHzfrequencyrange,Part1:Technical characteristicsandtestmethodsEuropeanTelecommunications StandardsInstitute.34s.
- [9] Pawlikiewicz,Hess2006.MixedSignalDesign– RFCMOSorSiGe BiCMOS.RFDesign.5s.PDF-tiedosto.
< <http://rfdesign.com/mag/603RFDF3.pdf>>