

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

Infotehnoloogia teaduskond

Arvutitehnika instituut

IAY40LT

Mart Kartašev 112221

# **RAADIOSIDE MOODULITE MÕÕTMISED NUTIKODU LAHENDUSTE JAKS**

Uurimistöö

Mairo Leier

MSc

Nooremteadur

Tallinn 2015

## **Autorideklaratsioon**

Olen koostanud antud töö iseseisvalt. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud. Käesolevat tööd ei ole varem esitatud kaitsmisele kusagil mujal.

Autor: Mart Kartašev

27.05.2015

## **Annotatsioon**

Käesoleva töö sisuks on raadiosidemoodulite MRF89XAM8A, CC2530EM, nRF24L01+ ja nRF24L01+PA+LNA testimine sobivuseks koduautomaatikas kasutamiseks, mis on ühtlasi ka töö peamiseks eesmärgiks. Esimene põhieesmärk on jaotatud parema loogilise liigendamise tarvis alamülesanneteks. Esiteks, moodulite testimine erinevatel kaugustel. Teiseks, moodulite testimine erinevates keskkondades. Kolmandaks, moodulite testimine erinevates tehnilistes seadistustes. Teine põhieesmärk on analüüsida testide tulemusi hooneautomaatika tüüplahendustes kasutamise seisukohalt.

Põhieesmärgist lähtuvalt on töö peamiseks hüpoteesiks, et kõik vaadeldavad moodulid on koduautomaatika lahendustes kasutamiseks sobilikud.

Töös on esitatud kõigi kasutatud seadmete, tarkvara ja uurimisprintsipi kirjeldused ning kasutamise põhjendused. Andmete paremaks struktureerimiseks ja loogiliseks analüüsimiseks on töös sooritatud mõõtmised jaotatud erinevateks testideks, mida testkonfiguratsiooni kaupa analüüsiti. Olulisemaks analüüsi aluseks sidemoodulite puhul olid välja saadetud pakettidest kohalejõudnud pakettide protsent. Teisese tähtsusega oli RSSI näit moodulitel, mis seda tehniliselt võimaldasid.

Analüüsi tulemusena otsustati, et peamine hüpotees kõigi moodulite sobivuse kohta oli vale. Mõlemale tüüplahendusele ning testkeskkonnana kasutatud majale lahenduse loomiseks sobivaks loeti MRF89XAM8A ning CC2530EM mooduleid. nRF24L01+ moodulit loeti sobivaks mõlemasse tüüplahendusse ning testkeskkonnana kasutatud hoonesse teatavate piirangutega kasutuskeskkonnale ning peeti eelnevast kahest vähem töökindlamaks. nRF24L01+PA+LNA ei peetud sobivaks kasutamiseks tüüplahenduses ega testkeskkonnana kasutatud hoones.

Lõputöö on kirjutatud eesti keeles ning sisaldab teksti 40 leheküljel, 2 peatükki, 6 joonist, 11 tabelit.

# **Abstract**

## **Testing of wireless modules for use in smart home solutions**

The content of this thesis is the testing of MRF89XAM8A, CC2530EM, nRF24L01+ and nRF24L01+PA+LNA wireless modules for suitability in home automation solutions, which is also the primary goal of the thesis. For improved comprehension the primary goal is divided into subtasks, the first of which was the testing of modules at different distances. The second subtask is to test modules in different environments and the third to test modules in different technical configurations. The second goal is to analyse the test results according to example solutions and for use in the building used as a test environment.

Derived from the main goal, primary hypothesis of the thesis is that all modules are suitable for use in home automation solutions.

The thesis presents descriptions about all of the used equipment, software and principles applied, as well as reasons for their usage. Measurements conducted in the thesis are divided into tests for improved comprehension and logical analysis. The analysis is done separately for each test configuration. The basis of analysis for the modules is the percentage of correctly received packets as a ratio to total packets sent. RSSI is used as a secondary indicator.

As a result of the analysis the main hypothesis was considered to be wrong, as only MRF89XAM8A and CC2530EM were considered to be suitable for use in both presented example solutions as well as the test environment used for conducting the tests. nRF24L01+ was considered suitable for use, but only in certain conditions. nRF24L01+PA+LNA was considered unsuitable for use in home automation solutions as a whole.

The thesis is written in Estonian and contains 40 pages of text, 2 chapters, 6 figures, 11 tables.

## Lühendite ja mõistete sõnastik

RSSI	<i>Recieved signal strength indicator</i> ehk vastuvõtja signaalitugevuse indikaator. Esitatakse tavaliselt dBm ühikutes.
ISM	<i>Industrial, scientific and medical radio bands</i> ehk industriaalsel, teaduslikul või meditsiinilisel otstarbel kasutatavad sagedusvahemikud.
LNA	<i>Low-noise amplifier</i> ehk madala müraga signaali võimendi
PA	<i>Power Amplifier</i> ehk tavaline signaali võimendi
bps	<i>bits per second</i> ehk bittide arv mis sekundis jõutakse üle kanda. Andmesides edastuskiiruse suurusühik.
draiver	Tarkvara, mis on loodud riistvara suhtlemiseks arvuti või mikrokontrolleriga
UART	<i>Universal asynchronous receiver/transmitter</i> ehk universaalne asünkroonne saatja/vastuvõtja. Kasutatakse peamiselt erinevate seadmete sidestamisel operatsioonisüsteemidega.

## Sisukord

1. Sissejuhatus .....	9
2. Töö kirjeldus .....	11
2.1. Ülesande püstitus ja hüpoteesid .....	11
2.2. Tüüplahenduste kirjeldus .....	12
2.2.1. Madal andmeside intensiivsus .....	12
2.2.2. Kõrge andmeside intensiivsus .....	12
2.3. Kasutatud seadmed .....	13
2.3.1. nRF24L01+ ja nRF24L01+PA+LNA.....	13
2.3.2. MRF89XAM8A .....	14
2.3.3. CC2530EM.....	15
2.3.4. Kasutatud mikrokontrollerid.....	15
2.4. Sooritatavad testid.....	16
2.5. Tarkvara .....	18
2.5.1. nRF24L01+ ja nRF24L01+PA+LNA.....	18
2.5.2. MRF89XAM8A .....	20
2.5.3. CC2530EM.....	22
2.6. Testimise teostusmetoodika .....	22
3. Testimise tulemuste analüüs.....	24
3.1. Test 1 - Tõketeta, erinevatel kiirustel .....	24
3.2. Test 2 – Post, betoon.....	27
3.3. Test 3 – Üks sein, kipsplaat puitkarkassil.....	28
3.4. Test 4 – Üks sein, betoon.....	29
3.5. Test 5 – Kaks seina, kipsplaat puitkarkassil .....	30
3.6. Test 6 – Kaks seina, betoon .....	31
3.7. Test 7 – Kolm seina, kipsplaat puitkarkassil .....	32
3.8. Test 8 – Kolm seina, betoon .....	33
3.9. Test 9 – Klaasaken.....	34
3.10. Test 10 – Korrus.....	34
3.11. Lõplikud järeldused testtulemuste kohta.....	35
4. Kokkuvõte .....	38
Kasutatud kirjandus .....	40
Lisa 1 – Joonised .....	41

## **Jooniste nimekiri**

Joonis 1. NRF24 saatja mooduli põhitsükli koodi väljavõte .....	19
Joonis 2. NRF24 vastuvõtja mooduli põhitsükli koodi väljavõte.....	20
Joonis 3. MRF89XAM8A saatja mooduli koodiväljavõte .....	20
Joonis 4. MRF89XAM8A vastuvõtja mooduli koodiväljavõte.....	21
Joonis 5. nRF24L01+PA+LNA antenni nurk.....	23
Joonis 6. Fresneli efekt. Teoreetiliste ja reaalse tulemuste võrdlus MATLABis. ....	26

## **Tabelite nimekiri**

Tabel 1. Esimese testkonfiguratsiooni tulemuste võrdlustabel aeglastel kiirustel. ....	24
Tabel 2. Esimese testkonfiguratsiooni tulemuste võrdlustabel maksimaalsetel kiirustel. .....	25
Tabel 3. Teise testi tulemuste võrdlustabel. ....	27
Tabel 4. Kolmanda testi tulemuste võrdlustabel. ....	28
Tabel 5. Neljanda testi tulemuste võrdlustabel.....	29
Tabel 6. Viienda testi tulemuste võrdlustabel. ....	30
Tabel 7. Kuuenda testi tulemuste võrdlustabel.....	31
Tabel 8. Seitsmenda testi tulemuste võrdlustabel.....	32
Tabel 9. Kaheksanda testi tulemuste võrdlustabel.....	33
Tabel 10. Üheksanda testi tulemuste võrdlustabel. ....	34
Tabel 11. Kümnenda testi tulemuste võrdlustabel.....	35



# 1. Sissejuhatus

Käesoleva lõputöö pealkirjas kajastuv kõnekeelne väljend „*nutimaja*“ ehk teisisõnu koduautomaatika annab tööle peamise sisulise konteksti. Koduautomaatika kui hooneautomaatika spetsiifilisem definitsioon, on mõeldud sarnaselt ülemterminile kirjeldamaks inimeste igapäevaste tegevuste automatiseerimist ning tihtipeale ka automaatika viimist mingit sorti tsentraalse juhtimissüsteemi alla. Erinevalt üldisest hooneautomaatikast käsitleb kõnealune termin inimeste erinevate võimalike elamispaikade ehk residentsaalpindade ja nende lähiümbruse protsesside automatiseeritud juhtimisega. Antud automatiseerimist on võimalik teostada erinevate meetoditega. Nutimajade peamine erinevus üldisest hooneautomaatikast seisneb püüdluses luua lahendusi, mis on võimalikult mugavad, minimalistlikud, intuiitiivsed, taskukohased ja esteetiliselt meeldivad.

Nagu eelnevalt mainitud, on igasuguse hoone automatiseerimise teostuseks palju erinevaid võimalusi. Siinkohal tasub ära mainida, et keskse juhtimise loomine ei ole alati hädavajalik, eriti kui tahetakse tehnika juhtimise alla viia ainult mõned üksikud, lihtsamad protsessid. Juhitavate objektide rohkuse korral on tülikas igaüht neist eraldi seadistada ning hallata. Seetõttu eelistatakse hooneautomaatikas tsentraliseeritud juhtimisega lahendusi. Sellest tulenevalt on vajalik kõik erinevad juhitavad objektid omavahel mingil moel sidestada. Üldiselt võib lahendused tsentraliseerimise meediumi alusel lüüa kaheks: juhtmetega ja juhtmevabad.

Juhtmetega süsteemid pakuvad kiiret ja töökindlat andmevahetust. Samuti tagavad need parema turvalisuse sissetungijate eest andmevahetuse tasandil, eriti süsteemides, mis ei ole ühendatud laivõrku. Juhtmetega süsteeme võib olla tülikam üles seada, eeskätt juba olemasolevasse hoonesse lahenduse otsimisel. Kuna koduses miljöö on igasugune juhtmerägastik, isegi korralikult lae alla või põranda liistule kinnitatult kodust õhkkonda häiriv, üritatakse juhtmed tavaliselt peita seinte sisse või laepaneelide vahele. See lahendus võib olla aktsepteeritav värskelt rajatavas hoones, kuid juba olemasoleval elamispiinnal on sarnane töö aja- ning ressursikulukas. Samuti tekib probleem kui mõni sidekaablitest vajab hooldust ja ligipääs sellele on piiratud.

Juhtmevaba süsteem pakub siinkohal head alternatiivi, võimaldades seadmeid üles seada, hooldada või maha võtta kergusega, mida juhtmestatud süsteem ei pruugi pakkuda. Miinusena kaotame eeskätt turvalisuses, kuna iga andmesidega veidi paremini kursis olev isik võib üritada meie süsteemi üle koormata või sellesse sisse murda, saavutades halvima stsenaariumis kontrolli protsesside üle, millega võib väga palju kahju tekitada. Teiseks halvaks küljeks on raadiosignaalide saatmisel tekkiv andmekadu ning sideprotsessi aeglustumine.

Arvestades sidetehnoloogiate ja krüptograafia kiiret arengut ja töökindluse tõusu ainuüksi käesoleva sajandi jooksul, on hakatud neist probleemidest hoolimata nii kodu- kui ka hooneautomaatikas üldiselt eelistama juhtmevabasid lahendusi. Suurem osa neist olemasolevatest lahendustest on paraku küllaltki kallid ning mitte alati töökindlad. Antud bakalaureusetöös ongi vaadeldud mooduleid, mis oleksid soodsad, tagades sellest hoolimata piisavalt efektiivse ning usaldusväärse andmeside koduses keskkonnas.

Juhtmevaba sidesüsteemi jaoks on kokkuleppeliselt määratud kindlad sagedusvahemikud, mida sedasorti sidemoodulite puhul võib kasutada. Euroopas aktsepteeritud enamlevinud sagedusvahemikeks on 433-434 MHz, 868-870 MHz, 2.400-2.500 GHz ning 5.725-5.875 GHz. Madalamal sagedusel töötava seadme eeliseks on signaali parem materjaliläbivus, mis on tingitud suuremast lainepikkusest. Miinuseks on tavaliselt aeglasem andmeedastuskiirus.

Töö on jaotatud kaheks suureks osaks. Esimene neist paneb paika töö ülesannete konkreetse püstituse ning sellest lähtuvad hüpoteesid. Lisaks sellele on esimeses osas antud kasutatud seadmete, tarkvara ning testimise metoodika põhimõtted. Töö teises osas on eelnevast lähtudes sooritatud testimiste kirjeldused ja tulemused ning tulemuste analüüs.

## 2. Töö kirjeldus

Järgmistes alapeatükkides püstitatakse töö ülesanded ning nendest lähtuvad hüpoteesid. Lisaks antakse kirjeldused mõõtmisteks kasutatud testide põhimõtetest, seadmetest ja nende tarbeks kasutatud tarkvarast ning kirjeldatakse, kuidas nende abil ülesannet lahendati ja milliseid printsiipe sealjuures järgiti.

### 2.1. Ülesande püstitus ja hüpoteesid

Käesoleva töö esimeseks ja peamiseks eesmärgiks on testida juhtmevabasid raadioside mooduleid nRF24L01+ [1], nRF24L01+PA+LNA [2], MRF89XAM8A [3] ning CC2530EM [4] nende sobivust nutimajas kasutamise seisukohalt. Seadmete kirjeldus on antud alampeatükis 2.3. Testimise all on mõeldud moodulite andmeside katsetamist läbi alljärgnevate alamülesannete.

- Erinevatel kaugustel ehk saatja ja vastuvõtja omavahelise kauguse muutmisel.
- Erinevates keskkondades ehk läbi erinevate materjalide ja takistuste. Koduautomaatika mõistes on peamiseks takistusteks raadiosignaali levimisele seinad, põrandad jne. Füüsikast teame, et raadiolaine sumbub kiiremini tihedamas keskkonnas. Hüpoteesiks on, et mida suurem on läbitavate materjalide summaarne kogupaksus, seda nõrgem on raadiosignaali.
- Erinevates seadistustes ehk kasutades seadmetel kõrgemaid ja madalamaid väljundvõimsusi, lühikesi ja pikemaid andmepakettide pikkuseid ning kiiremaid ja aeglasemaid andmeedastuskiiruseid. Hüpoteesiks on, et mida madalam on võimendus, kiirem on edastuskiirus ning pikem on andmepaketi pikkus, seda väiksem on andmeedastuse efektiivsus. Andmeside kiiruse tõstmine, signaali vähendamine või paketi pikkuse suurendamine peaks olema võrdeline seadmete omavahelise kauguse suurendamisega ehk teisisõnu andmeside kiiruse tõstmine toob endaga kaasa edastusvahemaa vähenemise ning signaali nõrgenemise.

Teiseks ülesandeks on moodulite sobivuse hindamine ja analüüs tüüplahendustes ning testide tegemiseks kasutatud elumajas.

Peamiseks hüpoteesiks on, et kõik 4 moodulit on kõlbulikum kasutamiseks tüüplahendustes ning konkreetses testkeskkonnas, mida mõõtmiste sooritamise jaoks kasutatakse. Täiendavaks hüpoteesiks on, et madalamas, 868 MHz sagedusvahemikus ehk suurema lainepikkusega mooduli signaal levib paremini kui 2.4 GHz sagedusvahemikus toimivad moodulid.

## **2.2. Tüüplahenduste kirjeldus**

Nutimaja lahenduste loomisel on võimalik automatiseerida väga erinevate andmeside koormuste ning turvalisusnõuetega protsesse. Antud peatükis on kirjeldatud lühidalt erinevaid võimalikke kõrgema ja madalama intensiivsusega protsesse ning püstitatud tüüpolukorrad, mis kirjeldaksid erinevate vajadustega lahenduste nõudeid, lihtsustamaks hilisemat analüüsi ning tegemaks otsustust, kas antud moodulitega oleks testide tegemiseks tehtavas majas võimalik kesksüsteemiga automatiseerimist teostada.

### **2.2.1. Madal andmeside intensiivsus**

Sedasorti lahenduste andmetel on tavaliselt vähem kriitiline iseloom. Sellegi poolest on käskude ja operatiivandmete kohale jõudmine oluline kuna nende puudumisel võib esineda tõrkeid seadmete töös. Andmeside tihedus ning maht on tüüpiliselt väiksemad ning ei nõua väga kõrget turvalisuse taset. Seetõttu on krüpteerimine tihtipeale lahendatud lihtsamate meetoditega või üldse kõrvale jäetud, võimaldades lühemaid andmepakettide pikkusi.

Madala andmeside intensiivsuse tüüplahenduseks võtamegi termostaadi näitu mõõtv mooduli, mis mõõdab korraga sise- ja välistemperatuuri, saates uuendusi vaid temperatuuri muutuste korral. Andmed edastatakse krüpteerimata kujul. Antud tüüplahenduse analüüsiks on testides 10-baidised ehk lühema paketipikkusega testid.

### **2.2.2. Kõrge andmeside intensiivsus**

Kõrgema intensiivsuse põhjuseks on tüüpiliselt andmed, mida tahetakse kõrvaliste isikute eest kättesaamatuna hoida. Nendeks võivad olla moodulid, mis juhivad turvasüsteeme, garaažiuksi, saunasid või mistahes elektrivõrguga tihedalt seotud juhtmoodulid nagu näiteks lambilülitid. Sedasorti kriitilisema iseloomuga andmed vajavad krüptograafilist kodeerimist ning tihtipeale pidevat kontrollteavitusi, et seade

on töökorras ning sellega ei ole midagi juhtunud. Sedasorti turvalisuse nõue tõstab oluliselt vahetatava info mahtu ning andmevahetuse sagedust.

Kõrge andmeside intensiivsuse tüüplahenduseks võtame krüpteeritud andmevahetusega turvasüsteemi mooduli, mis on ühendatud välisuksega. Mooduli eesmärgiks on tagada ukse valve, valve sisse- ning väljalülitamine ning selle tarbeks kesksüsteemiga kasutajatunnuste autentimine. Mooduli töökorras olekut kontrollitakse regulaarselt kontrollpakettide saatmisega. Antud tüüplahenduse analüüsiks on testides 32 ja 64 baidised ehk maksimaalse paketi pikkusega testid. Kuna CC2530EM puhul, tarkvara ning seadmeid käsitlevates peatükkides kirjeldatud põhjustel, ei olnud võimalik modifitseerida paketi pikkust, ei analüüsita CC2530EM puhul antud tüüplahendust.

## **2.3. Kasutatud seadmed**

Antud peatükis tuuakse välja olulisemad tehnilised näitajad ning selgitatakse seadmete valikut. Tootjate poolt koostatud moodulite kohta käivad detailsed tehniliste andmete lehed on ära toodud kasutatud kirjanduse all [1]-[4].

### **2.3.1. nRF24L01+ ja nRF24L01+PA+LNA**

Tegemist on Nordic Semiconductors'i poolt väljastatud 2.4 GHz ISM sagedusvahemikus toimiv madala voolutarbega raadioside mooduliga. Voolutarve nRF24L01+ puhul ei ületa 14 mA ja nRF24L01+PA+LNA puhul ei ületa 45 mA. Mooduli operatiivpinge 1.9 - 3.6 V (keskmise 3.3V) on igati sobilikult standardne, mis ühildub paljude tänapäeva mikrokontrolleritega. nRF24L01+ ja nRF24L01+PA+LNA on praktiliselt täpselt sama moodul. Ainus vahe on, et viimasel on lisaks signaali tugevdamiseks juures ka LNA ehk madala müraga võimendi ning tavaline signaali võimendi ja antenn. Sellele lisaks on nRF24L01+PA+LNA moodulil erinevaid lisafiltrid ja elemendid, mis side seisukohast pole olulised. Edaspidi viitame käesolevatele moodulitele kui NRF24 moodulid.

**nRF24L01+ ja nRF24L01+PA+LNA** andmesidet kirjeldavad võimalikud seadistused:

- Edastuskiirus: 250 kbps, 1 Mbps, 2 Mbps
- Paketi pikkus: Registri mahutavus 1-32 baiti.

- Saatja võimendus: 0, -6, -12, -18 dBm
- Sagedusvahemik: 2.400 – 2.500 GHz
- Tundlikkus: -104 dBm
- RSSI eristusvahemik: puudub RSSI

Saatja võimenduse all on mõeldud mooduli kiibi sisest signaali võimendust. „+PA+LNA“ puhul lisandub sellele PA ja LNA moodulite ning antenni võimendus, mis kõik kokkuliidetuna on ligikaudu +32dB.

Antud moodulitepaar on töö skoopi võetud soodsa 2.4 GHz sagedusvahemikus töötava mooduli näitena, mis on standardne, hästi konfigureeritav ja madala võimsustarbega. Peamiseks miinuseks on positiivse võimendusteguri puudumine.

### **2.3.2. MRF89XAM8A**

MRF89XAM8A, edaspidi lühendatud kui MRF89, on Microchip Technology Inc. poolt 868 MHz ISM sagedusvahemiku jaoks toodetud, kuni 25 mA tarbiv raadioside moodul. Toimib operatiivpingel 2.1–3.6V (keskmine 3.3V) .

**MRF89XAM8A** andmesidet kirjeldavad võimalikud seadistused:

- Edastuskiirus: 2, 10, 33, 100 kbps
- Paketi pikkus: Registri mahutavus 1-64 baiti.
- Saatja võimendus: -8 , -5, -2, +1, +4, +7, +10, +13 dBm
- Sagedusvahemik: 863–870 MHz
- Tundlikkus: -107 dBm
- RSSI vahemik: -44 kuni -107 dBm

Antud moodul sai uurimiseks valitud soodsa 868 MHz sagedusvahemikus toimiva ning rohkeid töörežiime pakkuva mooduli näitena, millel on kõigele lisaks ka madal võimsustarve (max 90 mW). Peamiseks miinuseks on võrdlemisi madal andmeedastuskiirus.

### 2.3.3. CC2530EM

Texas Instruments'i poolt CC2530DK[4] arenduskomplekti osana väljastatud 2.4 GHz raadioside moodul. Toimib 2.0V-3.6V pingel ning voolul, mis ei tohiks ületada 29 mA.

**CC2530EM** andmesidet kirjeldavad võimalikud seadistused:

- Edastuskiirus: 100, 200, 500, 1000 kbps
- Paketi pikkus: 10 baiti
- Saatja võimendus: -3, 0, +4 dBm
- Sagedusvahemik: 2.394 – 2.507 GHz
- Tundlikkus: -101 dBm
- RSSI vahemik: -27 kuni -101 dBm

Minimaalne RSSI eristusvahemik pole tehniliste andmete lehelt leitav, mistõttu on esitatud mooduliga katseliselt leitud minimaalne RSSI.

Antud moodul on töö skoopi võetud peamiselt võrdluseks kui hinnaklassilt kallim, hästituntud ja pikema arendusminevikuga alternatiiv eelnevatele moodulitele.

### 2.3.4. Kasutatud mikrokontrollerid

Kontrollerid mille abil sidemoodulite juhtimist teostatakse, on Texas Instruments MSP430G2553 LaunchPad[5] ning Texas Instruments SmartRF05 Evaluation Board [4].

MSP430G2553 LaunchPad on 16 MHz taktsagedusel toimiv, 512 baidise mäluga mikroprotsessor, millel on 20 viiku. Madal voolutarve 230  $\mu$ A (2.2V) 1 MHz juures ning 0.5  $\mu$ A ooterežiimis ja tööpingel 1.8 V kuni 3.6 V, mis on ideaalne tööks koos eelkirjeldatud NRF24 ja MRF89 moodulitega. Koos madala maksumusega teeb see kõik kokku antud kontrollerist ideaalse juhtelemendi nutikodu lahenduste tarvis. Lisaks headele tehnilistele omadustele on Texas Instruments loonud kontrolleri programmeerimiseks suurepärase tasuta arenduskeskkonna, mis teeb töö tarkvaralise

lahendusega oluliselt lihtsamaks. MSP430 mikrokontrolleri abil ongi käesolevas töös lahendatud moodulite, väljaarvatud CC2530EM, juhtimine.

SmartRF05 on osa CC2530DK[4] arenduskomplektist ning on algselt loodud just spetsiaalselt erinevate 2.4 GHz moodulite hindamiseks. Eelnevalt kirjeldatud CC2530EM on samasse komplekti kuuluv. Plaat on madala voolutarbega, vahemikus 0.4  $\mu$ A kuni 29 mA standardses 2V-3.6V pingevahemikus. SmartRF05 Evaluation Board sisaldab endas, nagu nimetusest võib arvata, erinevaid lisafunktsionaalsusi, mis ei ole antud töö ega potentsiaalsete nutikodu lahenduste seisukohast olulised seetõttu ei ole SmartRF05 ka sobilik lahenduste loomiseks. Küll on aga antud CC2530DK kasutamine hea võrdluse andmiseks kallimate, ennast juba tõestanud moodulitega.

Kuna kontrollerid ei ole otseselt töö uurimisobjektiks, ei ole otstarbekas nende kirjeldustel pikemalt peatuda. Täpsemad kirjeldused on antud vastavate seadmete tehniliste andmete lehtedel [4],[5].

## **2.4. Sooritatavad testid**

Andmesidet on võimalik iseloomustada paljude tehniliste näitajate abil. Kõigist erinevaist näitajatest on kohalejõudnud pakettide osakaal ülesande tarbeks kõige parem, kuna oluline on teada, missugune andmehulk päriselt kohale jõudis. Kõik muud näidud, mis antud andmevahetuse kohta käivad, on teisejärgulised, kuna kontrollerite vahelise suhtluse seisukohast huvitab meid eelkõige kui suurt osa andmetest tuli korduvalt saata ning kas need üldse edukalt edastatakse. Seetõttu ongi andmeside efektiivsuse hindamise peamiseks aluseks võetud kohalejõudnud pakettide protsent. Madalama tähtsusega lisaindikaatorina on kasutatud RSSI näitu, nende moodulite puhul, mis seda võimaldavad.

Aktsepteeritav pakettide kadu oleneb loodava lahenduse andmevahetuse iseloomust. Isikliku kogemuse põhjal võib näiteks Voice over IP sessioonil selleks olla pea 10% ilma kvaliteeti tugevalt mõjutamata. Samas kvaliteetse audio- või videomaterjali otseedastuse võib kvaliteeti mõjutada ka paari protsendiline kadu. Arvestades, et meie edastame peamiselt operatiivkäske, mille edastamise kiirus ei ole otseselt oluline, võime kriitiliseks pidada pakettide kadu üle 60% ehk alla 40% vastuvõetud pakette. Isegi kui pakettide kadu tekib, saame alati pakette korduvalt edastada, sest aeg ei ole piirav



faktor. Siiski ei saa suuremat kadu lubada, kuna pakettide pidev kordusedastus tekitab suurema voolutarbe, mis omakorda vähendab mooduli aku järjestikust toimimisaega. Testid sooritatakse maksimaalsel edastuskiirusel väljaarvatud esimese testi puhul, kus sooritatakse testid ka aeglasemal kiirusel. Kasutatakse võimendamata ja võimendatud signaale ning lühikesi ja maksimaalseid pakettide pikkusi.

CC2530EM mooduli puhul ei olnud võimalik modifitseerida paketi pikkust, mistõttu tuli testid sooritada antud mooduliga vaid 10 baiti pikkuste pakettidega. Et võrdlusi lihtsustada võeti seesama 10 baiti lühikese paketi pikkuseks teistel moodulitelgi. NRF24 moodulid võimaldasid maksimaalset paketi pikkust 32 baiti ning MRF89XAM8A puhul 64 baiti. Vastavaid maksimaalseid pikkuseid testides ka rakendati.

NRF24 moodulite puhul loetakse võimenduseta testiks NRF24L01+ mooduli tulemusi 0 dB võimendusega. Võimendusega testiks loetakse NRF24L01+PA+LNA mooduliga sooritatud mõõtmisi. NRF24L01+PA+LNA võimenduseks on arvestuslikult 32 dBm kiibisisese võimenduse 0 dBm juures. CC2530EM puhul on väiksemaks võimenduseks võetud 0 dBm ning maksimaalseks 4 dBm. MRF89XAM8A puhul on vastavateks näitajateks 1 dBm ning 13 dBm. NRF24 moodulite maksimaalseks edastuskiiruseks on 2 Mbps, MRF89XAM8A puhul 100 kbps ning CC2530EM puhul 1Mbps.

Et hinnata moodulite efektiivsust erinevates sisekeskkondades, on kõigepealt vajalik kontrollida moodulite sidevõimekust ilma segavate faktoriteta, mis sooritatakse esimeses testis. Selle testi sisuks on vaadelda moodulite toimimist lamedal maastikul ilma vahepealsete signaali tõkestavate elementideta vahemikus vähemalt 1-50 meetrit. Selline vahemik peaks katma suurema osa võimalikest lahendustest, kuna oluliselt suuremat elamispinda esineb harva. Vahemaade konkreetsed väärtused tuuakse ära analüüsi peatükis 3. Ülejäänud testid koostatakse läbi erinevate võimalike takistuste, kaugustel, mida antud keskkond võimaldab. Sisekeskkonnas teostatud testide jaoks kasutatud maja korruste plaanid on nähtaval LISA 1, 1. ja 2. joonis.

Erinevalt teistest testides sooritatakse esimene test ka maksimaalsel ja madalamal edastuskiirusel, et võrrelda andmeside kadude erinevusi kiiruse muutmisel. Väiksemal kiirusel kasutati kiiruseid, mis oleksid ligikaudu pool maksimaalse edastuskiiruse väärtusest. NRF24 moodulite puhul vastavalt 1Mbps, CC2530EM puhul 500 kbps ning MRF89XAM8A puhul parema variandi puudumisel 33 kbps.

## 2.5. Tarkvara

Kuna tarkvara loomine ei ole otseselt uurimuse üks eesmärkidest vaid pigem abivahend, on programmeerimisel testide teostamiseks lähtutud lihtsusest. Kõik üleliigne, mida ei ole otseselt tarvis testide sooritamiseks, on kõrvale jäetud. Antud peatükis on vastavalt moodulile ära toodud olulisemad koodilõigud koos kirjeldustega.

### 2.5.1. nRF24L01+ ja nRF24L01+PA+LNA

Kuna nRF24 moodulite näol on juhtimise seisukohalt tegu identsete moodulitega on nende juhtimiseks kasutatud kood sama. Mooduli juhtimiseks on kasutatud vabavaralist Enrf24 draiverit [6]. Programmi kood on koostatud kasutades C++ keelt, vabavaralises tasuta keskkonnas ENERGIA [7].

Programmi funktsionaalne osa töötab lõpmatus tsüklis *Loop* millele eelneb algseadistuse *Setup* funktsioon, kus pannakse testide eel paika vajalikud seadistused. Kuna seadistuste määramine hõlmab endas ainult parameetrite väärtustamist, ei ole vajadust nende pikemaks kirjeldamiseks. Koodi algosas on defineeritud kõik koodi funktsionaalses osas kasutatavad väärtused, mille tegelik väärtus ei ole funktsionaalsuse mõistmiseks oluline.

Järgnevalt esitatakse saatjamooduli põhitsükli kood joonisel 1 ning selle selgitus.

Koodi põhimõte on saata välja kindel arv pakette, antud juhul defineeritud kui *PACKET\_COUNT* mille väärtuseks on 10 000. Igal tsüklil kirjutatakse registrisse *radio.print()* funktsiooniga saadetava paketi väärtus ning edastatakse see käsuga *radio.flush()*. Kui vastav pakettide loendur *sent\_packets* jõuab piirväärtuseni suurendatakse indeksit *i*, ning hakatakse edastama järgmist tüüpi pakette kuni jõutakse lõppu. Kui kontroll  $i < 2$  ei ole enam tõene, hakatakse edastama stringi *str\_end* sarnaselt eelnevale.

```

void loop() {
    if(i < 2){
        if(sent_packets[i] < PACKET_COUNT){
            switch (i) {
                case 1:
                    radio.print(str_long);
                    break;
                case 0:
                    radio.print(str_short);
                    break;
            }
            radio.flush(); // Force
            sent_packets[i]++;
            if(sent_packets[i] == PACKET_COUNT){
                i++;
            }
        }
    }
}

```

*Joonis 1. NRF24 saatja mooduli põhitsükli koodi väljavõte.*

Järgnevalt esitatakse vastuvõtja põhitsükli kood joonisel 2 ning selle selgitus.

Koodi põhimõte on väga lihtne. Põhitsükli alguses olev *while* tsükkel paneb koodi seisma seniks, kuni mooduli registris on lugemisvalmis väärtus. Seejärel loetakse registrist *inbuf* nimelisse baidimassiivi (pikkus 33) paketi väärtus mida võrreldakse *strcmp()* funktsiooniga baidi massiivi ehk stringiga. Kõigepealt sooritatakse alati lühema stringi ehk *str\_short* kontroll, kuna see toimib kiiremini kui pikema stringi ehk *str\_long* kontroll. Oluline on ära märkida, et juhul kui tegemist ei ole lühema stringiga on teine kontroll siiski vajalik, kontrollimaks, et stringi väärtuses ei ole edastamise ajal toimunud muutusi. Võrdluse edukal läbimisel suurendatakse vastava paketitüübi loendi *recieved\_packets* suurendamine, tsükkel jõuab lõppu ning kõik algab otsast peale järgmise paketi ootamisega. Kui saatja on lõpetanud testpakettide saatmise, on registrist loetav string *str\_end*, mille edukal võrdlusel sooritatakse tulemuste printimine UART porti, mis on loetav tavalise lauaarvuti või sülearvuti poolt.

```

void loop() {
    while (!radio.available(true));
    if (radio.read(inbuf)) {
        if (!strcmp(inbuf, str_short)){
            recieved_packets[0]++;
        } else if (!strcmp(inbuf, str_long)){
            recieved_packets[1]++;
        }
        if(!strcmp(inbuf, str_end)){
            Serial.print("Short packets recieved:");
            Serial.println(recieved_packets[0]);
            Serial.print("Long packets recieved:");
            Serial.println(recieved_packets[1]);
        }
    }
}

```

*Joonis 2. NRF24 vastuvõtja mooduli põhitsükli koodi väljavõte.*

### **2.5.2. MRF89XAM8A**

MRF89 mooduli juhtimiseks on kasutatud TTÜ ATI Instituudi poolt koostatud spetsiaalset selle mooduli jaoks mõeldud draiver tarkvara [8]. Programmi kood on koostatud Texas Instruments'i arenduskeskkonnas Code Composer Studio versioon 6 [9].

Kood on funktsionaalsuselt analoogne NRF24 mooduli toimimisele, kuid kasutab draiverist põhjustatud erisuste tõttu natuke erinevaid funktsioonide nimetusi. Nagu ka eelnevates näidetes, toimub koodi täitmine lõpmatus tsükliks, seetõttu esitatakse järgnevalt ainult väljavõte MRF89 mooduli jaoks kasutatud põhitsükli koodist, mis paketid välja saadab.

```

if(i < 4){
    if(packet_count[i] < TESTPACKETS){
        // Send data over radio
        Radio_Tx(TxPacket, payload_length, ADDR_REMOTE, &error);
        packet_count[i]++;
        if(i < 2) __delay_cycles(DELAY);
    }
}

```

*Joonis 3. MRF89XAM8A saatja mooduli koodiväljavõte*

Saatja koodis kasutatud *TESTPACKETS* on funktsionaalsuselt sama definitsioon mis *PACKET\_COUNT* nRF24 moodulite koodis. Paketi saatmiseks kasutatakse funktsiooni *Radio\_TX()*, mille sisu ja funktsionaalsuse kirjeldus on olemas draiveri kirjelduses.

Ka vastuvõtja kood on üldises pildis sarnane nRF24 vastuvõtja moodulis kasutatule.

```
if (Radio_Rx(RxPacket, &len, 1000, &rssi_rx, &error)) {
    // If error
    if (error == ERR_RX_WRONG_LENGTH) {
        UART_Send_Data("!RF reInit!\r\n");
        Radio_Init(RF_DATA_RATE, TX_POWER, RF_CHANNEL, &error);
    } else if(error == EXIT_TIMEOUT){
        UART_Send_Data("!RF timeout!\r\n");
    }
} else { // No error
    uint8 testIndex=(uint8)RxPacket[3];
    if(testIndex > 0 && testindex < 4){
        packet_count[testIndex]++;
        if(rssi_rx != 0) rx_avg[testIndex] = rx_avg[testIndex] +
(rssi_rx - (rx_avg[testIndex]))/(packet_count[testIndex]);
    } else if (testIndex == 5)
}
```

*Joonis 4. MRF89XAM8A vastuvõtja mooduli koodiväljavõte*

Vastuvõtja koodis näeme peamist erinevust paketi tuvastuses. Kuna draiver teostab automaatselt CRC kontrolli, ei ole vajadust kogu paketi võrdluseks vastuvõtmisel. Selle asemel on teostatud esimese andmebaidi väärtuse võrdlus, mille põhjal määratletakse, millisesse testi antud pakett kuulub. Ülejäänud osa koodist on andmete edastamine UART porti.

Lisaks on vastuvõtja koodis ka RSSI väärtuste esitamiseks mõõtmise kohta kasutatud aritmeetilist keskmist, mis on sooritatud valemiga (1). Valemi realiseerimiseks võib koodi kujul näha näite eelviimasel real. Andmete puhastamiseks on välja jäetud 0 väärtused, mis viitavad veale RSSI arvutamisel moodulis, kuna 0 ei ole lubatud väärtusvahemikus.

$$rx_{avg} = rx_{avg} + \frac{rssi_{rx} - rx_{avg}}{packet\_count} \quad (1)$$

Antud valemis on  $rx_{avg}$  vastuvõetud pakettide RSSIde arvutuslik keskmine. Uue  $rx_{avg}$  arvutamiseks iga uue paketi saabumisel lahutatakse uuest mõõdetud tulemusest  $rssi_{rx}$

keskmise, saades seeläbi teada erinevuse keskmisest. Lahutamise tulemus jagatakse seejärel läbi saabunud pakettide arvuga *packet\_count*. Valem on tuletatud tavalisest aritmeetilise keskmise valemist, kus kõik mõõtetulemused liidetakse kokku ning jagatakse pakettide arvuga. Antud valem on väga mugav ja sobilik kasutamiseks mikrokontrollerites, kuna ei vaja kõiki tulemuste meelespidamist vaid võimaldab tulemusi summeerida nende saabumise hetkel.

### **2.5.3. CC2530EM**

CC2530DK sisaldab endas juba kaasa pakendatud nn PER testi tarkvara ehk paketi vea sageduse hindamise tarkvara. See tarkvara võimaldab luua kahe RF05 tüüpi kontrolleri vahel andmeside läbi CC2530EM moodulite. Antud koodi muutmiseks on vaja spetsiaalselt tasulist arendustarkvara, mille tasuta litsents lubas modifitseerida ja kompileerida vaid väikesemahulist koodi. Kuna testprogramm ületas seda mahtu oluliselt, ei olnud võimalik seda muuta, et saata erineva pikkusega andmepakette.

## **2.6. Testimise teostusmetoodika**

Peatükis on antud lühikirjeldus põhimõtetest, mida rakendati testide sooritamisel lähtuvalt testide olemusest, riistvarast ning tarkvaralisest lahendusest.

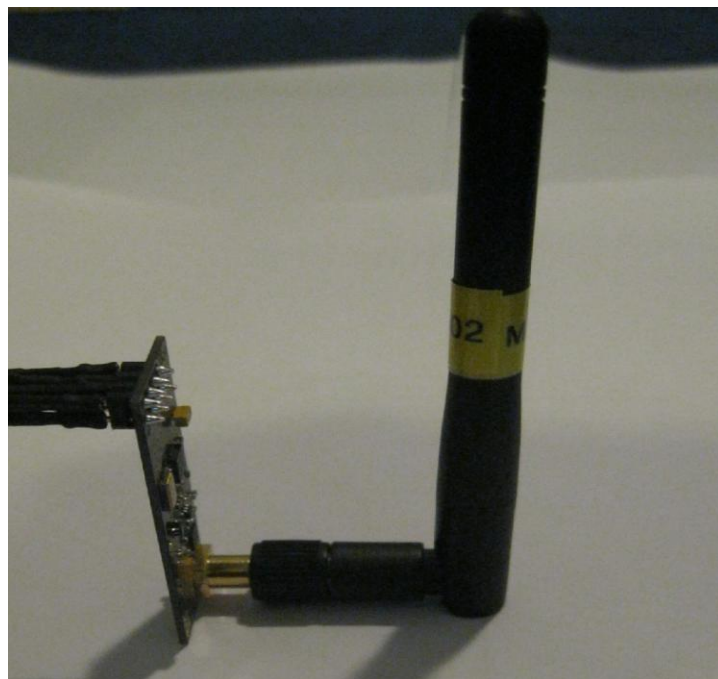
Kõigi testide sooritamise ajal olid kõik seadmed paigaldatud ligikaudu 0.5 m kõrgusele maapinnast 20x20 cm puidust alusele. Saatjate ja vastuvõtjate vahemaade arvutamisel kasutati 20m pikkust ELLIX mõõdulinti. Alusele paigutamise eripärast ning mõõtmistäpsusest tulenevalt on reaalsed kaugused hinnanguliselt  $\pm 0,20$  meetrit, kaugustel üle 20 meetri  $\pm 1$  meeter. Testseadmed testiti läbi ükshaaval, vähendamaks signaali saatmisel esinevat müra. Sooritamise hetkel olid moodulite läheduses asuvad sideseadmed nagu telefonid ja sülearvuti Wi-Fi moodul välja lülitatud. Keskkonnas levivaid 2.4 GHz signaalid võivad tulemusi teataval määral mõjutada, kuid selle välistamiseks puudusid võimalused ning ka otsene vajadus, kuna tavalises kodukeskkonnas oleks sarnased mõjurid tõenäoliselt samuti olemas.

Väliskeskkonnas sooritatud testide puhul oli temperatuur ligikaudu 8 kraadi Celsiuse skaalal. Sisekeskkonnas sooritatud testide puhul oli temperatuur ligikaudu 18 kraadi Celsiuse skaalal. Sisekeskkonnas seadmete vahel saatmise ajal liikumist ei toimunud.

Kuna välikeskkonnas tehtud testid olid sooritatud sõidutee äärsel kõnniteel residentsaalpiirkonnas (testid 1.1, 1.2), üritati minimeerida inimeste sattumist testseadmete vahelisele alale testide käivituse ajastamise ning testide sooritamisega õhtustel aegadel. Täielikult ei suudetud inimeste sattumist seadmete vahele välistada, kuid mõjud peaksid olema minimaalsed.

Kui testi tulemused tulid oluliselt erinevad ootuspärasest, sooritati sama test pärast tehnilist kontrolli koheselt uuesti, välistamaks tehnilist viga. Kui ka järgneva testi tulemused olid ligilähedased, jäid kehtima algsed tulemused.

Testide sooritamise käigus paigutati sidemoodulid üksteise suunal vabalt valitult, kuid ei üritatud leida ideaalset nurka, peegeldamaks potentsiaalselt loodavate lahenduste olukordi, kus ei ole ideaalne nurk ja asukoht alati võimalikud. Erandiks siinkohal NRF24L01+PA+LNA antenni nurk millega prooviti testide sooritamise ajal, mitte ootuspärase tulemuste tõttu, läbi erinevaid antenni nurki. Üldjuhul oli aga antenni nurk nagu näha joonisel 5. Erinevuse korral sellest tüüpseadistusest on see analüüsis mainitud.



*Joonis 5. nRF24L01+PA+LNA antenni nurk*

Antud asend valiti kahel põhjusel. Esiteks, on see reaalses olukorras antenni kõige tavapärasem asend ning teiseks, on see testide sooritamise tarvis kõige stabiilsem asend.

### 3. Testimise tulemuste analüüs

Antud peatükis on esitatud eelneva peatüki alamosades püstitatud testide tulemused, nende põhjal sooritatud analüüs ning esitatud järeldused. Viimases alampeatükis on esitatud järeldused erinevate moodulite sobilikkuse kohta nutimajas kasutamiseks. Lisaks meeldetuletus, et CC2530EM puhul on analüüsis mõeldud vaid madala intensiivsusega tüüplahendust.

#### 3.1. Test 1 - Tõketeta, erinevatel kiirustel

Antud test on tehtud võrdluse andmiseks, mistõttu seda teiste testide analüüsis ka tihti peale mainitakse. Teiseks, võrdselt tähtsaks, eesmärgiks on uurida andmeside efektiivsuse erinevusi erinevatel kiirustel. Testid on sooritatud välikeskkonnas siledal asfalteeritud kõnniteel, kus seadmete vahel puudusid segavad faktorid.

Tabel 1. Esimese testkonfiguratsiooni tulemuste võrdlustabel aeglastel kiirustel.

Test 1.1	MRF89XAM8A				CC2530EM		NRF24L01+	
Kiirus	33 kbps				500 kbps		1 Mbps	
Võimendus:	1 dBm				0 dBm		0 dBm	
Pakett:	10 B		64 B		10 B		10 B	32 B
Kaugused	%	RSSI	%	RSSI	%	RSSI	%	%
1m	100%	-44	100%	-44	100%	-53	100%	100%
5m	100%	-47	100%	-47	100%	-60	99.98%	99.75%
10m	100%	-60	100%	-60	100%	-75	99.94%	99.92%
20m	100%	-65	100%	-64	98.49%	-75	100%	100%
30m	99.83%	-71	100%	-70	94.46%	-75	99.46%	99.99%
40m	99.85%	-72	100%	-72	99.45%	-74	100%	99.96%
50m	100%	-74	100%	-74	99.55%	-76	99.25%	98.83%
60m	90.58%	-80	77.96%	-80	99.47%	-81	93.66%	82.06%
70m	82.34%	-81	47.02%	-81	97.08%	-82	91.43%	85.58%
80m	100%	-79	100%	-79	84.51%	-84	96.88%	71.29%
	MRF89XAM8A				CC2530EM		NRF24L01+LNA+PA	
Võimendus:	13 dBm				4 dBm		32 dBm	
Kaugused	%	RSSI	%	RSSI	%	RSSI	%	%
1m	100%	-44	100%	-44	100%	-50	100%	100%
5m	100%	-47	100%	-47	100%	-55	99.96%	99.68%
10m	100%	-60	100%	-60	100%	-73	99.78%	99.63%
20m	100%	-57	100%	-57	100%	-67	83.43%	57.14%
30m	100%	-61	100%	-61	99.93%	-73	62.92%	30.05%
40m	100%	-64	100%	-65	100%	-68	16.76%	6.76%
50m	100%	-68	99.91%	-68	100%	-68	0	0
60m	100%	-72	98.76%	-74	100%	-73		
70m	99.31%	-81	98.40%	-76	100%	-75		
80m	100%	-72	100%	-72	99.30%	-82		



Tabel 2. Esimese testkonfiguratsiooni tulemuste võrdlustabel maksimaalsetel kiirustel.

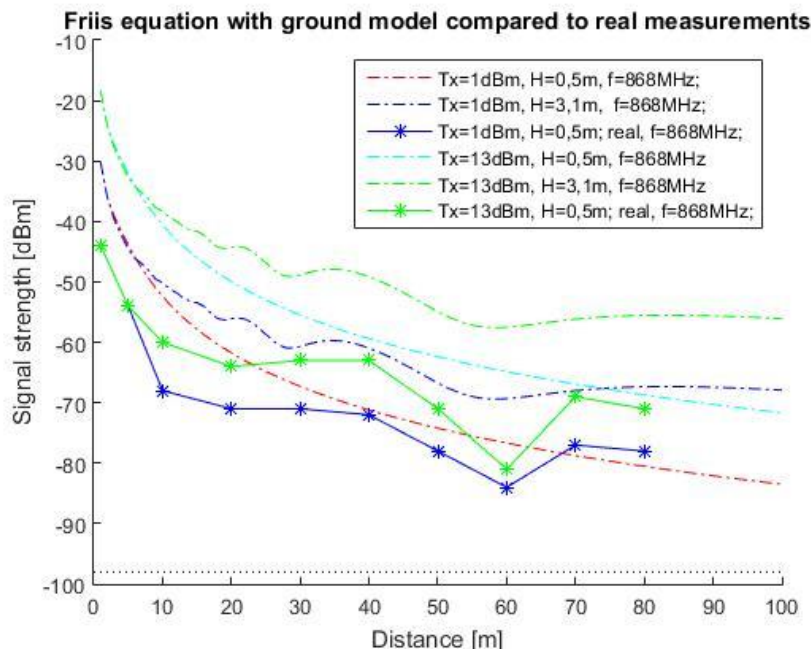
Test 1.2	MRF89XAM8A				CC2530EM		NRF24L01+	
Kiirus	100 kbps				1 Mbps		2 Mbps	
Võimendus:	1 dBm				0 dBm		0 dBm	
Pakett:	10 B		64 B		10 B		10 B	32 B
Kaugused	%	RSSI	%	RSSI	%	RSSI	%	%
1m	100%	-44	100%	-44	100%	-59	99.57%	99.55%
5m	100%	-54	100%	-54	100%	-73	99.70%	99.82%
10m	100%	-68	100%	-68	100%	-80	99.72%	98.67%
20m	100%	-71	100%	-71	98.67%	-84	100%	100%
30m	100%	-71	99.98%	-72	99.61%	-91	98.90%	96.63%
40m	100%	-72	100%	-72	97.35%	-93	65.24%	84.40%
50m	94.76%	-78	73.93%	-79	86.11%	-96	98.01	92.85%
60m	13.51%	-84	1.37%	-85	93.59%	-97	0.91	4.61%
70m	99.97%	-77	97.78%	-77	42.71%	-98	72.62	49.75
80m	99.76%	-78	99.82%	-78	71.70%	-98	1.07%	0.97%
	MRF89XAM8A				CC2530EM		NRF24L01+LNA+PA	
Võimendus:	13 dBm				4 dBm		32 dBm	
Kaugused	%	RSSI	%	RSSI	%	RSSI	%	%
1m	100%	-44	100%	-44	100%	-55	100%	100%
5m	100%	-54	100%	-54	100%	-70	99.92%	99.73%
10m	100%	-60	100%	-61	100%	-78	99.91%	99.89%
20m	100%	-64	100%	-65	99.87%	-74	80.44%	50.46%
30m	100%	-63	100%	-64	99.97%	-69	32.64%	20.99%
40m	100%	-63	100%	-63	99.79%	-74	0.02%	0
50m	100%	-71	99.10%	-73	99.14%	-75	0	0
60m	38.52%	-81	58.29%	-81	99.69%	-70		
70m	100%	-69	100%	-69	99.96%	-76		
80m	100%	-71	100%	-71	75.96%	-81		

Tabelite 1 ja 2 esmasel vaatlusel hakkavad kohe silma langused ning pärasised tõusud 40-70m vahemikus, mis ei pruugi olla ootuspärased, kuid ei ole sellegipoolest seotud tehniliste probleemidega. Antud mõõtmised on kinnitatud printsiibiga mis on kirjeldatud peatükis 2.7. Kuna kordusmõõtmistel saadi sarnased tulemused püstitan siinkohal hüpoteesi, et sellised signaali kõikumised on seotud Fresneli tsoonidega. Efekt on sedasorti lahtisel pinnal põhjustatud tavaliselt lainete peegeldumisest, mistõttu võib laine vastuvõtjani jõuda vastandfaasis, mis vähendab signaalitugevust.

Et kontrollida arvamusi Fresneli tsoonide kohta, võrdleme mõõtetulemusi teoreetilistega. Võrdlus on sooritatud tarkvaraga MatLab[10], kasutades simulatsiooni võrrandeid mida on kasutatud seda teemat käsitletud artiklis [11].

Simulatsiooni tulemustest joonisel 6, on näha teoreetiliste väärtuste ja mõõtetulemuste sarnaseid tendentse mõlema mõõteseria puhul. Tulemuste üldiselt madalamad

väärtused teoreetilistest on ootuspärased. Näeme, et ka simulatsioonis on näha märgatav lang 50-70 meetri kohal mõlema võimendustaseme puhul. Reaalsed mõõtetulemused on märgitud tärnidega.



Joonis 6. Fresneli efekt. Teoreetiliste ja reaalse tulemuste võrdlus MATLABis.

MatLab'is sooritatud simulatsiooni MRF89 mooduli teoreetiliste ja tegelike väärtuste võrdluse tulemuste põhjal võib arvata, et tegemist võib tõesti olla Fresneli tsoonist põhjustatud signaali kaoga, ehk hüpoteesi ei saa välistada, kuid ei saa ka otseselt kinnitada. Teoreetiliste väärtustega langeb kõige paremini kokku simulatsioon 3.1 meetri kõrgusel. Millest selline erinevus tekib ei ole kindel, kuid üks võimalikest põhjustest on, et moodul oli maapinna suhtes kerge nurga all, mistõttu kaod on teoreetilistest erinevad. Fresneli tsoonide mõju antud tulemustele on hüpoteetiline, kuid ei ole antud töö uurimise eesmärgiks, mistõttu ei ole seda pikemalt kajastatud.

Antud testi tulemusena võib järeldada, et MRF89 ja CC2530EM efektiivseks töökauguseks ilma takistuseta võib lugeda kuni 80 meetrit ning enamgi, kuid seadmete seadmisel ligikaudu 40 meetrist kaugemale peab hakkama arvestama Fresneli tsoonide mõjudega. nRF24L01+ mooduli puhul võib arvestuslikult maksimaalseks kauguseks võtta 70 meetrit, kuid Fresneli efekti mõjude tõttu tuleks maksimaalset töökaugust rohkem uurida.

nRF24L01+PA+LNA mooduli puhul võib viimaseks efektiivseks töökauguseks lugeda 20 meetrit, kuna sealt edasi hakkavad tulemused kiirelt langema, kuni andmeside puudumiseni 40 meetri kaugusel. Kas halvad tulemused on seotud Fresneli efekti või halva mooduliga on hetkel ebaselge. Probleem ei tohiks olla tarkvaraline, kuna väiksematel vahemaadel toimib andmeside korralikult. Andmeside prooviti ka peatükis 2.7 erinevast standardasendist erineva antenni seadistustega, kuid antenni asendi muutmine ei andnud märkimisväärselt erinevaid tulemusi.

### 3.2. Test 2 – Post, betoon

Antud test on koostatud eesmärgiga uurida signaali kadu väiksemate objektide korral, mis kodukeskkonnas tihtipeale esinevad. Uurimisobjektiks sobis ideaalselt 56x56 cm, maast laeni (2.8m) betoonist maja tugipost. Võib arvata, et kõigist üksikobjektidest on selle näol ühega tihedamaist, ehk teisisõnu peaks antud testi tulemus andma nõ pessimistliku hinnangu analoogsete üksikobjektide mõjust signaalile. Antud testi seadmete paigutus on toodud lisas 1 joonisel 3.

Tabel 3. Teise testi tulemuste võrdlustabel.

Test 2	MRF89XAM8A				CC2530EM		NRF24L01+	
Võimendus:	1 dBm				0 dBm		0 dBm	
Pakett:	10 B		64 B		10 B		10 B	32 B
Kaugused	%	RSSI	%	RSSI	%	RSSI	%	%
0.6 m	100%	-44	100%	-44	100%	-55	100%	100%
0.2 / 1.5 (2m)	100%	-44	100%	-44	100%	-59	100%	100%
1.5 / 0.2 (2m)	99.60%	-47	100%	-47	97.93%	-64	100%	100%
3.5m	99.85%	-51	1	-49	99.54%	-70	100%	100%
4.5m	100%	-53	1	-54	100%	-73	100%	100%
6.5m	99.68%	-61	100%	-61	99.76%	-74	99.20%	94.28
9m	98.20%	-78	97.03%	-75	98.47	-81	100%	100%
Test 2	MRF89XAM8A				CC2530EM		NRF24L01+LNA+PA	
Võimendus:	13 dBm				4 dBm		32 dBm	
Kaugused	%	RSSI	%	RSSI	%	RSSI	%	%
0.6 m	100%	-44	100%	-44	100%	-51	100%	100%
0.2 / 1.5 (2m)	100%	-44	100%	-44	100%	-53	100%	100%
1.5 / 0.2 (2m)	100%	-44	100%	-44	100%	-59	98.09%	98.99%
3.5m	100%	-44	100%	-44	98.74%	-67	99.88%	99.90%
4.5m	100%	-46	100%	-47	99.97	-70	100%	99.99%
6.5m	100%	-54	100%	-55	100%	-63	98.63	97.94
9m	100%	-71	99.49%	-64	100%	-69	98.82	98.40

Tabelis toodud kaugused 0.2 / 1.5 väljendavad teste kus saatja on 0.2 meetri kaugusel postist ja 1.5 / 0.2 väljendavad teste kus vastuvõtja on 0.2 meetri kaugusel postist.

Ehkki erilist muutust andmekadudes tähendada ei saa, võime 2-meetrise kauguse RSSI näidust järeldada, et signaali segab rohkem vastuvõtja lähedus tõkkele kui saatja lähedus tõkkele. Muudes kaugustes puuduvad märkimisväärsed erinevused esimese testi tulemustest.

Paariprotsendilised paketikaod võib lugeda tühisteks, mistõttu võib öelda, et kõik moodulid tulid antud seadistustes suurepäraselt toime mõlema tüüplahenduse puhul ning säärane üksikobjekt ei tohiks avaldada antud moodulite puhul märgatavat mõju andmesidele. Täiendavalt oleks võimalik uurida erinevate materjalide ja rohkema arvu väiksemate objektide mõju. Piisava massi objektide puhul võime aga tulemusi lähendada alljärgnevat testide tulemustele, mistõttu ei peetud sarnaste testide kordamist rohkemate objektidega otstarbekaks.

### 3.3. Test 3 – Üks sein, kipsplaat puitkarkassil

Antud test on koostatud eesmärgiga uurimaks signaali levikut ruumide vahel ning läbi objektide, mis võib elamutes protsesside automatiseerimisel ette tulla. Antud test on esimene kuuest sarnasest (testid 3 – 8), mis seavad signaali tee järjest suuremat tõkestust. Seinaks on tavaline puitkarkassiga 18 cm paksune, soojustatud ning kipsplaadiga kaetud sein. Antud testi seadmete paigutus on toodud lisas 1 joonisel 4.

Tabel 4. Kolmanda testi tulemuste võrdlustabel.

Test 3	MRF89XAM8A				CC2530		NRF24L01+	
Võimendus:	1 dBm				0 dBm		0 dBm	
Pakett:	10 B		64 B		10 B		10 B	32 B
Kaugused	%	RSSI	%	RSSI	%	RSSI	%	%
0.5m	100%	-44	100%	-44	99.98%	-56	100%	100%
1.5m	100%	-44	100%	-44	99.61%	-70	100%	100%
5m	100%	-54	100%	-54	99.67%	-72	100%	100%
7m	100%	-55	100%	-54	96.60%	-92	99.93%	99.58%
	MRF89XAM8A				CC2530		NRF24L01+LNA+PA	
Võimendus:	13 dBm				4 dBm		32 dBm	
Kaugused	%	RSSI	%	RSSI	%	RSSI	%	%
0.5m	100%	-44	100%	-44	100%	-50	100%	100%
1.5m	100%	-44	100%	-44	100%	-51	100%	100%
5m	100%	-45	100%	-46	100%	-61	100%	100%
7m	100%	-47	100%	-47	99.97%	-83	100%	100%

RSSI näitude põhjal võime võrdlusest tabeliga 2 järeldada, et olulisi erinevusi signaali tugevuses ei esinenud kuni 4. testkauguseni. Tähelepanu väärivad CC2530 madala võimsusega tulemused 7 meetri kaugusel. Pea 3,5% lang edukalt vastuvõetud pakettide protsendis, mida muidu võiks pidada tühiseks, tasub ära märkida ligikaudu -10 dBm erinevuse taustal. Ehkki andmekao mõttes osutub see tühiseks, tasub antud tulemus meeles pidada järgnevate testide tulemuste vaatlemisel.

Paketikaod alla 1% võib lugeda tühiseks. Üldiselt võib antud tulemuste põhjal väita, et kõik moodulid tuleksid antud seadistustes suurepäraselt toime mõlema tüüplahenduse puhul.

### 3.4. Test 4 – Üks sein, betoon

Antud test on teine kuuest sarnasest (testid 3 – 8), mis seavad signaali teele järjest suuremat tõkestust. Tõkkeks on 40 cm paksune, betoonist, krohvikihiga kaetud sein. Kaugused on võetud sarnaselt eelmisele, ühe seinaga sooritatud testile. Antud sein on paksem kui järgnevates testides kajastatud betoonseinad. Antud testi seadmete paigutus on toodud lisas 1 joonisel 5.

Tabel 5. Neljanda testi tulemuste võrdlustabel.

Test 4	MRF89XAM8A				CC2530EM		NRF24L01+	
Võimendus:	1 dBm				0 dBm		0 dBm	
Pakett:	10 B		64 B		10 B		10 B	32 B
Kaugused	%	RSSI	%	RSSI	%	RSSI	%	%
0.6m	100%	-49	100%	-50	100%	-75	100%	100%
2m	100%	-50	100%	-54	100%	-79	100%	100%
5m	99.79%	-63	100%	-63	100%	-86	99.88%	99.24%
7m	99.60%	-73	99.41%	-73	96.20%	-99	96.30%	91.87%
	MRF89XAM8A				CC2530EM		NRF24L01+LNA+PA	
Võimendus:	13 dBm				4 dBm		32 dBm	
Kaugused	%	RSSI	%	RSSI	%	RSSI	%	%
0.6m	100%	-44	100%	-44	100%	-73	99.94	99.97
2m	100%	-46	100%	-45	100%	-73	49.13%	15.82%
5m	100%	-57	100%	-56	100%	-88	13.2%	1.6%
7m	100%	-66	99.90%	-65	96.74%	-92	0.03%	0%

MRF89 mooduli tulemuste põhjal võib öelda, et moodul tuleb antud seadistuses suurepäraselt toime,. RSSI näitude järgi saab märkida ligi 6 dBm langust igas testpunktis, võrreldes tõkestamata testi tulemustega. Millest võib järeldada signaali

teatavat minimaalset sumbumist 40 cm paksuses betoonseinas. Antud seadistuses sobib moodul kasutamiseks mõlemas tüüplahenduses.

CC2530EM mooduli tulemusi võib samuti pidada edukaks ja sobilikuks kasutamisel mõlemas tüüplahenduses. RSSI langus on ligikaudu 12 dB kõigis testpunktides. Tulemus 96%, 7 meetri kaugusel on sarnane tabelis 4 nähtud tulemustele.

Edukaks võib pidada ka nRF24L01+ ehk madala võimendusega mooduli tulemusi. 10% kadu 4. kaugusel pika paketi puhul tähendab teatavat andmeside efektiivsuse langust kõrgema intensiivsusega tüüplahendusele. Siiski on edukalt edastatud pakettide protsent piisavalt kõrge, et pakkuda töökindlat andmeedastust mõlemas tüüplahenduses.

Märkimisväärne lang on toimunud nRF24L01+PA+LNA mooduli puhul, kuid esimese testi tulemusi arvestades ei ole need otseselt üllatavad. Ehkki madala intensiivsuse puhul võiks 2 meetrisel kaugusel saadud tulemuste põhjal pidada moodulit antud olukorras kasutuskõlblikuks. Siiski võib 5 ning 7 meetrise kauguse tulemuste põhjal öelda, et nRF24L01+PA+LNA ei ole antud seadistuses sobilik töötama püstitatud tüüplahendustes.

### 3.5. Test 5 – Kaks seina, kipsplaat puitkarkassil

Antud test on kolmas kuuest sarnasest (testid 3 – 8), mis seavad signaali teele järjest suuremat tõkestust ning esimene kahe tõkkega test. Tõkkeks on kaks võrdset puitkarkassiga 18cm paksust, soojustatud ning kipsplaadiga kaetud seina. Antud testi seadmete paigutus on toodud lisas 1 joonisel 6.

Tabel 6. Viienda testi tulemuste võrdlustabel.

Test 5	MRF89XAM8A				CC2530EM		NRF24L01+	
Võimendus:	1 dBm				0 dBm		0 dBm	
Pakett:	10 B		64 B		10 B		10 B	32 B
Kaugused	%	RSSI	%	RSSI	%	RSSI	%	%
5m	99.70	-60	100%	-61	97.14%	-77	99.28	99.59
7m	100%	-65	100%	-64	99.77%	-85	99.18	98.72
9m	99.87%	-63	100%	-62	99.02%	-81	99.89	99.63
Test 5	MRF89XAM8A				CC2530EM		NRF24L01+LNA+PA	
Võimendus:	13 dBm				4 dBm		32 dBm	
Kaugused	%	RSSI	%	RSSI	%	RSSI	%	%
5m	100%	-54	100%	-52	99.97%	-79	10.65%	5.73%
7m	100%	-57	100%	-57	100%	-82	0%	0%
9m	100%	-56	100%	-55	100%	-84	0%	0%

Edukaks ning tüüplahendustele sobilikuks võib pidada kõigi moodulite tulemusi, väljaarvatud nRF24L01+PA+LNA, mis ületas kriitilise piiri oluliselt igas testkauguses, mistõttu on selle kasutamine antud seadistuses välistatud mõlemas tüüplahenduses. Märkimisväärseid pakettide kadusid teistes testtulemustes tähendada ei saa. RSSI näitades on MRF89 mooduli puhul näha 12-16 dBm langust kõigis testpunktides ning CC2530EM puhul 16-20 dBm langust kõigis testpunktides, võrreldes tõkestamata signaaliga sarnastel kaugustel.

### 3.6. Test 6 – Kaks seina, betoon

Antud test on neljas kuuest sarnasest (testid 3 – 8), mis seavad signaali teele järjest suuremat tõkestust ning esimene kahe tõkkega test. Tõkkeks on kaks võrdset 20 cm paksust, betoonist, krohvikihiga kaetud seina. Mille summaarne kogupaksus on võrdne neljandas testis kasutatud seinale. Testkaugused on vastavalt võimalustele proovitud võtta lähedased eelmise testi kaugustele. Antud testi seadmete paigutus on toodud lisas 1 joonisel 7.

Tabel 7. Kuuenda testi tulemuste võrdlustabel.

Test 6	MRF89XAM8A				CC2530EM		NRF24L01+	
Võimendus:	1 dBm				0 dBm		0 dBm	
Pakett:	10 B		64 B		10 B		10 B	32 B
Kaugused	%	RSSI	%	RSSI	%	RSSI	%	%
3m	100%	-61	100%	-60	100%	-75	70.44%	49.14
5m	100%	-67	100%	-67	100%	-82	72.72%	52.66
7m	99.07%	-69	99.99%	-70	100%	-93	53.17%	49.03
	MRF89XAM8A				CC2530EM		NRF24L01+LNA+PA	
Võimendus:	13 dBm				4 dBm		32 dBm	
Kaugused	%	RSSI	%	RSSI	%	RSSI	%	%
3m	100%	-54	100%	-54	100%	-77	0%	0%
5m	100%	-60	100%	-60	99.23%	-85	0%	0%
7m	100%	-63	100%	-61	99.56%	-88	0%	0%

Sarnaselt eelmisele testile võib tüüplahendustele sobilikuks võib pidada kõigi moodulite tulemusi, väljaarvatud nRF24L01+PA+LNA, mille puhul puudus igas testkauguses andmeside täielikult, mistõttu on selle kasutamine antud seadistuses välistatud mõlemas tüüplahenduses. Tugevad kaod esinesid ka nRF24L01+ mooduli töös kuid jäid allapoole

määratletud kriitilisi väärtusi, mistõttu võib moodulit pidada mõlema tüüplahenduse jaoks kasutuskõlblikuks.

Märkimisväärseid pakettide kadusid teistes testtulemustes tähendada ei saa. RSSI näitades on MRF89 mooduli puhul näha ligikaudu 16 – 20 dBm langust kõigis testpunktides ning 20-30 dBm langust kõigis testpunktides, võrreldes tõkestamata signaaliga sarnastel kaugustel.

Samuti võib MRF89 ja CC2530 tulemusi pidada sarnaseks Test 4 saadud tulemustele kattuvate vahemaadega kaugustel, mis on oluline kuna seinte summaarne kogupaksus ja materjal on samad. NRF24 moodulite puhul sarnasus puudub.

### 3.7. Test 7 – Kolm seina, kipsplaat puitkarkassil

Antud test on viies kuuest sarnasest (testid 3 – 8), mis seavad signaali teele järjest suuremat tõkestust. Tõkkeks on kolm võrdset puitkarkassiga 18cm paksust, soojustatud ning kipsplaadiga kaetud seina. Testkaugused valitud vastavalt võimalusele. Antud testi seadmete paigutus on toodud lisas 1 joonisel 8.

Tabel 8. Seitsmenda testi tulemuste võrdlustabel.

Test 7	MRF89XAM8A				CC2530EM		NRF24L01+	
Võimendus:	1 dBm				0 dBm		0 dBm	
Pakett:	10 B		64 B		10 B		10 B	32 B
Kaugused	%	RSSI	%	RSSI	%	RSSI	%	%
9m	99.64%	-67	100%	-67	99.98%	-94	97.21%	94.59%
11m	96.48%	-79	87.75%	-79	99.99%	-95	57.28%	35.50%
13m	99.54%	-73	100%	-73	99.66%	-95	20.96%	17.52%
Test 7	MRF89XAM8A				CC2530EM		NRF24L01+LNA+PA	
Võimendus:	13 dBm				4 dBm		32 dBm	
Kaugused	%	RSSI	%	RSSI	%	RSSI	%	%
9m	100%	-60	100%	-61	100%	-87	0%	0%
11m	100%	-73	99.59%	-73	96.68%	-91	0%	0%
13m	100%	-65	100%	-64	100%	-90	0%	0%

Nagu ka eelnevates testides, on MRF89 ja CC2530EM puhul andmeside kaod tühised. RSSI näidud on samadel kaugustel mõõdetutest vastavalt 12-16 dB ja 18-23 dB madalamad kõigis punktides ehk teisisõnu võrreldavad test 1 tulemustega 20m - 30m. Moodulid sobivad suurepäraselt antud konfiguratsioonist tüüplahenduste loomiseks.

nRF24L01+ mooduli tulemuste põhjal näeme, et seina ligidal on tulemused head, kui hakkavad seejärel kiirelt langema. Tulemuste kaugustel 11 meetrit ja 13 meetrit põhjal,



võib öelda, et moodulit võib proovida kasutada antud konfiguratsioonis madala tüüplahenduse näites, kuid krüpteeritud andmeside puhul ei saa töökindlust tagada. nRF24L01+PA+LNA puhul andmeside puudus täielikult. Moodul ei ole sobilik antud testkonfiguratsioonis kasutamiseks.

### 3.8. Test 8 – Kolm seina, betoon

Antud test on kuues ja viimane sarnastest (testid 3 – 8), mis seavad signaali teele järjest suuremat tõkestust. Tõkkeks on kolm võrdset 20 cm, betoonist, krohvikihiga kaetud seina. Testkaugused on valitud vastavalt võimalustele. Antud testi seadmete paigutus on toodud lisas 1 joonisel 9.

Tabel 9. Kaheksanda testi tulemuste võrdlustabel.

Test 8	MRF89XAM8A				CC2530EM		NRF24L01+	
Võimendus:	1 dBm				0 dBm		0 dBm	
Pakett:	10 B		64 B		10 B		10 B	32 B
Kaugused	%	RSSI	%	RSSI	%	RSSI	%	%
5 m	99.26%	-76	99.91%	-72	99.40%	-96	50.84%	37.08%
8 m	100%	-73	99.58%	-72	94.83%	-95	11.78%	11.36%
Test 8	MRF89XAM8A				CC2530EM		NRF24L01+LNA+PA	
Võimendus:	13 dBm				4 dBm		32 dBm	
Kaugused	%	RSSI	%	RSSI	%	RSSI	%	%
5 m	100%	-71	100%	-65	97.99%	-96	0%	0%
8 m	99.95%	-65	100%	-64	100%	-93	0%	0%

MRF89 ja CC2530EM puhul on andmeside kaod tühised. RSSI näidud on samadel kaugustel mõõdetutest vastavalt MRF89 ja CC2530EM puhul ligikaudu 32 dB ja 40 dB madalamad kõigis punktides ehk teisisõnu võrreldavad test 1 tulemustega 70m - 80m. Moodulid sobivad suurepäraselt antud konfiguratsioonist tüüplahenduste loomiseks.

nRF24L01+ puhul näeme, et 5m kaugusel ehk praktiliselt seina vastas on moodulite tulemused enamvähem töökõlbulikud, kuid kauguse suurenemisel langeb andmeside kiirelt üle kriitilise piiri. Moodul ei ole sobilik antud testkonfiguratsioonis tüüplahendustes kasutamiseks.

nRF24L01+PA+LNA puhul andmeside puudus. Moodul ei ole sobilik antud testkonfiguratsioonis tüüplahendustes kasutamiseks.

### 3.9. Test 9 – Klaasaken

Antud test on tehtud uurimaks signaali levimist läbi klaasi, mida akende või vaheseinte kujul võib kodukeskkonnas ette tulla. Test on tehtud läbi kolmekordse pakettakna.

Tabel 10. Üheksanda testi tulemuste võrdlustabel.

Test 9	MRF89XAM8A				CC2530EM		NRF24L01+	
Võimendus:	1 dBm				0 dBm		0 dBm	
Pakett:	10 B		64 B		10 B		10 B	32 B
Kaugused	%	RSSI	%	RSSI	%	RSSI	%	%
1m	99.46%	-47	100%	-47	100%	-49	100%	100%
2m	100%	-44	100%	-44	100%	-58	100%	100%
7m	100%	-54	100%	-54	100%	-64	100%	100%
9m	99.87%	-54	100%	-54	100%	-61	100%	98.87%
	MRF89XAM8A				CC2530EM		NRF24L01+LNA+PA	
Võimendus:	13 dBm				4 dBm		32 dBm	
Kaugused	%	RSSI	%	RSSI	%	RSSI	%	%
1m	100%	-44	100%	-44	100%	-42	100%	100%
2m	100%	-44	100%	-44	100%	-48	100%	100%
7m	100%	-47	100%	-47	100%	-56	100%	100%
9m	100%	-46	100%	-46	99.99%	-55	99.88%	99.99%

Kõik moodulid läbisid käesoleva suurepärase tulemustega. Võib järeldada, et klaasaken märkimisväärset kadu andmeside seisukohalt ei tekita ning antud seadistustes toimivad kõik moodulid mõlemas tüüplahenduses suurepäraselt. Puuduvad tähelepanuväärsed erinevused tõkestuseta tulemustega andmepakettide ning ka RSSI näitude osas.

### 3.10. Test 10 – Korrus

Antud test on loodud uurimaks signaali levikut läbi korruse, mis võib olla vajalik mitmekorruselise elumaja lahenduse loomisel. Lisaks materjali läbivusele lisandub siin seadmete kõrguse erinevus 3,2 m. Ühe korruse põranda paksuseks on 46 cm, millest 24 cm on betoonplokkidest ning ülejäänud 12 cm on puitpõrand ning betooni ja puitlaudade vaheline soojustus. Korruste põrandate paksused on identsed. Kahe korruse korral on signaali edastatud keldri ja maja teise korruse vahel.

Tabel 11. Kümnennda testi tulemuste võrdlustabel.

Test 10	MRF89XAM8A				CC2530EM		NRF24L01+	
Võimendus:	1 dBm				0 dBm		0 dBm	
Pakett:	10 B		64 B		10 B		10 B	32 B
Kaugused	%	RSSI	%	RSSI	%	RSSI	%	%
1 korrus	99.26%	-62	99.91%	-62	99.99%	-85	100%	100%
2 korrust	79.85%	-82	18.29%	-82	0%	0%	0%	0%
	MRF89XAM8A				CC2530EM		NRF24L01+LNA+PA	
Võimendus:	13 dBm				4 dBm		32 dBm	
Kaugused	%	RSSI	%	RSSI	%	RSSI	%	%
1 korrus	100%	-54	100%	-55	100%	-81	90.71%	83.43%
2 korrust	94.35%	-78	93.01%	-77	9%	-98	0%	0%

Moodulite sobivust andmete edastusel läbi ühe korruse võib pidada heaks. Mitte ükski moodul ei ületa kriitilist piiri ning on seega mõlema tüüplahenduse seisukohalt sobilikud. Kuna seadmed saaks paigutada nii, et keskjuhtimisseadme vastuvõtja on esimesel korrusel, peaks sidevõimekust mõlema korrusega kenasti säilima.

Ainsat sobivaks moodulit andmete edastamisel läbi kahe korruse võib pidada MRF89 moodulit, kuid edukaks krüpteeritud andmeedastuse tarvis oleks vajalik võimenduse kasutamine. Teiste moodulite puhul puudus andmeside läbi kahe korruse täielikult, mistõttu neid tüüplahenduste loomiseks läbi kahe korruse, kasutada ei saa.

Antud testi tulemusi võib pidada teisejärguliseks, need on sooritatud peamiselt lisainformatsiooni saamiseks ekstreemse juhtumina materjali läbivuse osas ning kõrguse erinevuse osas, mis ei olnud algselt osa töö eesmärkidest. Ka käesoleval juhul ei proovitud leida moodulitele ideaalseid nurki, vaid moodulid paigutati üksteise suhtes ligikaudselt.

### 3.11. Lõplikud järeldused testtulemuste kohta

Hüpotees kõigi moodulite sobivuse kohta nutimaja lahenduste loomisel osutus vääraks. Kasutuskõlblikuks võib pidada MRF89 ja CC2530EM moduleid, mis läbisid kõik testid ilma märkimisväärsete kadudeta ja kriitilisi andmekao piire ületamata, sobides seeläbi kasutamiseks nii tüüplahenduses kui ka konkreetselt testide sooritamiseks kasutatud hoones. CC2530EM puhul sooritati teste ainult madala intensiivsusega tüüplahenduse suhtes, kuid tuginedes headele tulemustele madalal intensiivsusel võib

arvata, et moodul toimiks ligilähedaselt või vähemalt kriitilisuse piire ületamata ka intensiivsema andmeside näite puhul. Teatavates tingimustes võib sobilikuks pidada nRF24L01+ moodulit, mis oleks sobilik kasutamiseks korterites või väiksemates elumajades, kus signaal ei pea läbima liiga paljusid tõkkeid nagu võis näha testide 7 ja 8 tulemustest.

Märkimisväärne on asjaolu, et 868 MHz MRF89 mooduli tulemused on kõigist moodulitest parimad nii edastatud pakettide kui ka RSSI osas. Hüpoteesi madalsagedusliku mooduli paremast levist erinevates keskkondades ei saa seega otseselt ümber lükata, kuid ei saa ka kinnitada, kuna võrdlus oli võimalik teostada vaid ühe mooduliga.

Testide 3-8 tulemuste analüüsi põhjal võib öelda, et nRF24L01+PA+LNA ei ole sobilik kasutamiseks nutikodu lahenduste loomisel kummassegi tüüplahendusse ega testkeskkonnana kasutatud hoones.

Alamülesannetes püstitatud hüpoteesidest võib valeks pidada hüpoteesi, et signaali nõrgenemine on sõltuvuses peamiselt läbitavate materjalide summaarsest kogupaksusest. Testi 4 ja 6 tulemuste võrdlemisel, olid tulemused oluliselt kehvemad testis 6, kus tõkete arv oli suurem. See annab alust arvata, et signaali tugevuse langus on seotud tõkete arvuga, mitte ainult läbitud materjali summaarse paksusega. Kuidas need omavahel täpsemalt sõltuvuses on, vajab täiendavat uurimist.

Kõigis testides võime näha madalama võimenduse juures halvemaid RSSI tulemusi praktiliselt kõigis testpunktides. Samuti on kõrgema võimenduse juures tulemused kas võrdelised või kõrgema edastatud pakettide protsendiga kui madalama võimenduse juures.

Sarnast tendentsi võib märgata andmepaketi pikkuse juures, kus pikema paketi puhul on üldjuhul edastatud väiksem protsent pakette kui lühema puhul. Seda võib seletada lihtsa tõsiasjaga, et pikema paketi puhul on lihtsalt rohkem võimalusi, kus viga saab tekkida. Samuti nägime esimeses testis, et suuremal edastuskiirusel olid testtulemused kehvemad kui aeglasemal edastuskiirusel.

Eelnevale tuginedes võib hüpoteesi võimenduse, andmesidekiiruse ja andmepaketi pikkuse kohta pidada õigeks. Kuid täpsemate seaduspärasuste leidmiseks tuleks antud nähtuste täpsemaks kirjeldamiseks koostada täiendavaid teste.

## 4. Kokkuvõte

Käesoleva töö sisuks ja peamiseks eesmärgiks oli raadiosidemoodulite MRF89XAM8A, CC2530EM, nRF24L01+ ja nRF24L01+PA+LNA. Peamine eesmärk oli jaotatud alamülesanneteks. Esiteks tuli testida antud mooduleid erinevatel kaugustel. Teiseks ülesandeks oli testida mooduleid erinevates keskkondades ning kolmandaks, testida mooduleid erinevates tehnilistes konfiguratsioonides.

Töö oli jaotatud kaheks suureks peatükiks, millest esimeses püstitati töö ülesanded ning nendest lähtuvad alljärgnevad hüpoteesid. Lisaks anti esimeses peatükis kirjeldused mõõtmisteks kasutatud testide põhimõtetest, seadmetest ja nende tarbeks kasutatud tarkvarast ning kirjeldati, kuidas nende abil ülesannet lahendati ja milliseid printsiipe sealjuures järgiti.

Põhiülesandest lähtuvalt oli peamiseks hüpoteesiks, et kõik moodulid on nutimajas kasutamiseks sobilikud ehk sobivad tüüplahendustes ning kasutatud testkeskkonnas kasutamiseks. Seda täiendati hüpoteesiga, et kõigist moodulites peaks madalama sagedusega moodul andma erinevates keskkondades parimaid tulemusi. Lisaks sellele püstitati lisahüpoteesid alamülesannete kohta.

Teises peatükis esitati testide tulemused testkonfiguratsiooni kaupa. Iga testi analüüs sooritati eraldi. Teise peatüki viimases alapeatükis tehti kokkuvõtlikud järeldused töö analüüsi ning hüpoteeside kohta.

Analüüsi tulemusena otsustati, et peamine hüpotees kõigi moodulite sobivuse kohta on vale. Mõlemale tüüplahendusele ning testkeskkonnana kasutatud majale lahenduse loomiseks sobivaks loeti MRF89XAM8A ning CC2530EM mooduleid. nRF24L01+ moodulit loeti sobivaks mõlemasse tüüplahendusse ning testkeskkonnana kasutatud hoonesse, teatavate piirangutega kasutuskeskkonnale ning peeti eelnevast kahest vähem töökindlamaks. nRF24L01+PA+LNA ei peetud sobivaks kasutamiseks tüüplahenduses ega testkeskkonnana kasutatud hoones.

Täiendav hüpotees madalsagedusliku mooduli parema levimise kohta jäi püsima, kuid otseseks kinnituseks oleks vajalik täiendav uurimine.

Alamülesannetes püstitatud lisahüpoteesidest jäi püsima hüpotees, et mida pikem on andmepakett, madalam võimendus ning suurem andmeedastuskiirus, seda kehvem on andmeside efektiivsus. Valeks osutus hüpotees, et signaali tugevuse langus on seotud pigem summaarse läbitud materjali paksusega. Osutus, et on alust arvata, et oluline on kui mitu tõket läbitakse, isegi kui summaarne paksus on sama.

Konkreetsete moodulite ja moodulite side edasiseks uurimiseks avaldus erinevaid võimalikke jätkuvaid variante ja ideid. Kuna antud uurimistöö oli koostatud just konkreetsete moodulite sobivuse hindamiseks, tuleks täiendava uurimise vajalikkust hinnata.

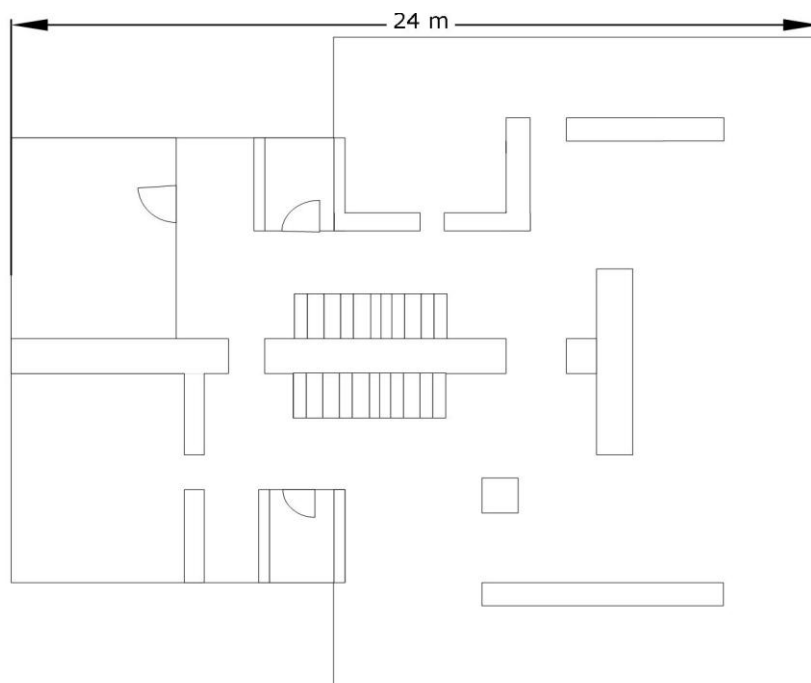
Töö tulemust pean edukaks, kuna põhiülesanne hinnata konkreetsete moodulite sobivust sai täidetud.

## Kasutatud kirjandus

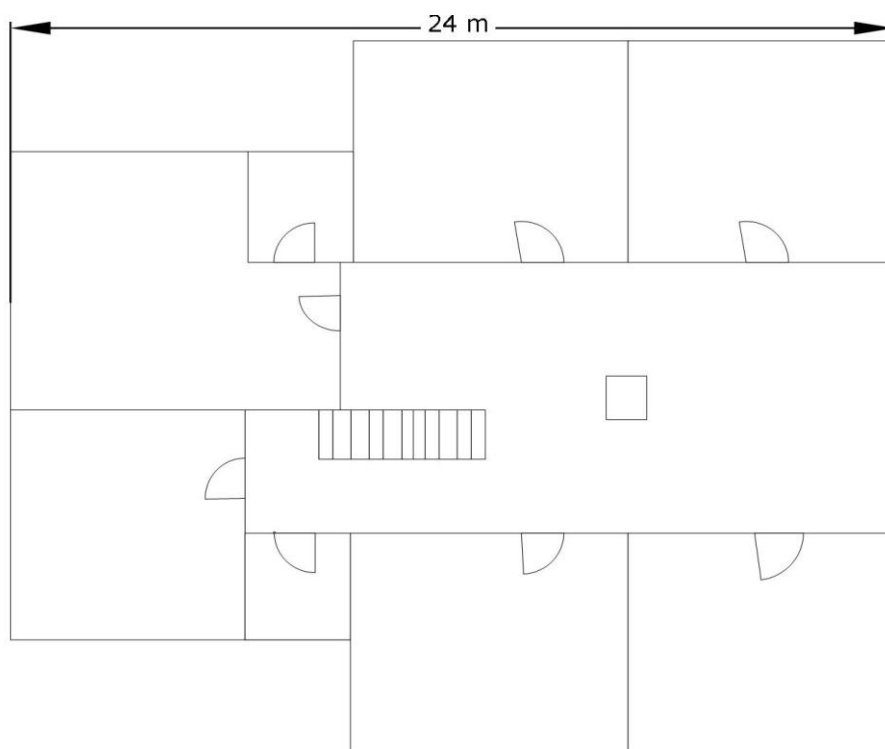
- [1] nRF24L01+ mooduli tehniliste andmete leht [WWW]  
[http://www.nordicsemi.com/eng/content/download/2726/34069/file/nRF24L01P\\_Product\\_Specification\\_1\\_0.pdf](http://www.nordicsemi.com/eng/content/download/2726/34069/file/nRF24L01P_Product_Specification_1_0.pdf) (19.05.2015)
- [2] nRF24L01+ LNA+PA mooduli tehnilisi andmeid kirjeldav veebilehekülg [WWW]  
[http://www.electfreaks.com/wiki/index.php?title=2.4G\\_Wireless\\_nRF24L01p\\_with\\_PA\\_and\\_LNA](http://www.electfreaks.com/wiki/index.php?title=2.4G_Wireless_nRF24L01p_with_PA_and_LNA) (19.05.2015)
- [3] MRF89XAM8A mooduli tehniliste andmete leht [WWW]  
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70651A.pdf> (19.05.2015)
- [4] CC2530DK tehniliste andmete leht [WWW]  
<http://www.ti.com/lit/ds/swrs081b/swrs081b.pdf> (22.05.2015)
- [5] MSP430 mikrokontrolleri tehniliste andmete leht [WWW]  
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430g2553.pdf> (22.05.2015)
- [6] nRF24 moodulite draiver [WWW] <https://github.com/spirilis/msprf24/wiki> (10.05.2014)
- [7] Energia [WWW] <https://github.com/energia/Energia/wiki> (26.05.2015)
- [8] MRF89XA mooduli draiver [WWW]  
[http://ati.ttu.ee/embsys/index.php/868MHz\\_wireless\\_connection](http://ati.ttu.ee/embsys/index.php/868MHz_wireless_connection) (26.05.2015)
- [9] Code Composer Studio [WWW] <http://processors.wiki.ti.com/index.php/Category:CCS>  
(26.05.2015)
- [10] Matlab [WWW] <http://se.mathworks.com/products/matlab/> (26.05.2015)
- [11] Mairo Leier. Ensuring Wireless Data Transmission - Performance Study from Field Deployment. - *IKTDK*, 25.-26.novembril 2011, Nelijärve. lk 80 – 84.



## Lisa 1 – Joonised

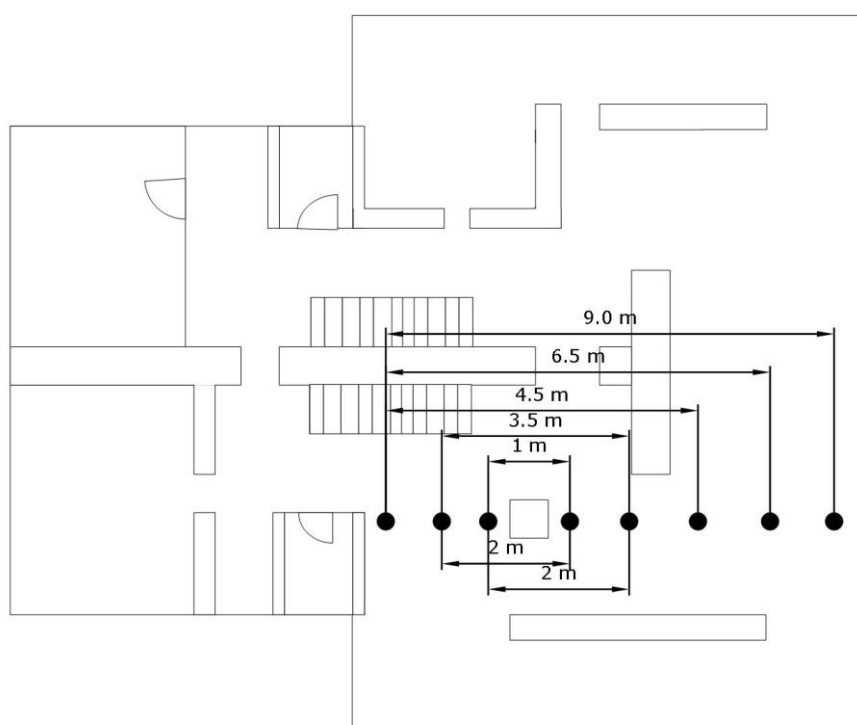


*Joonis 1. Esimese korruse plaan*

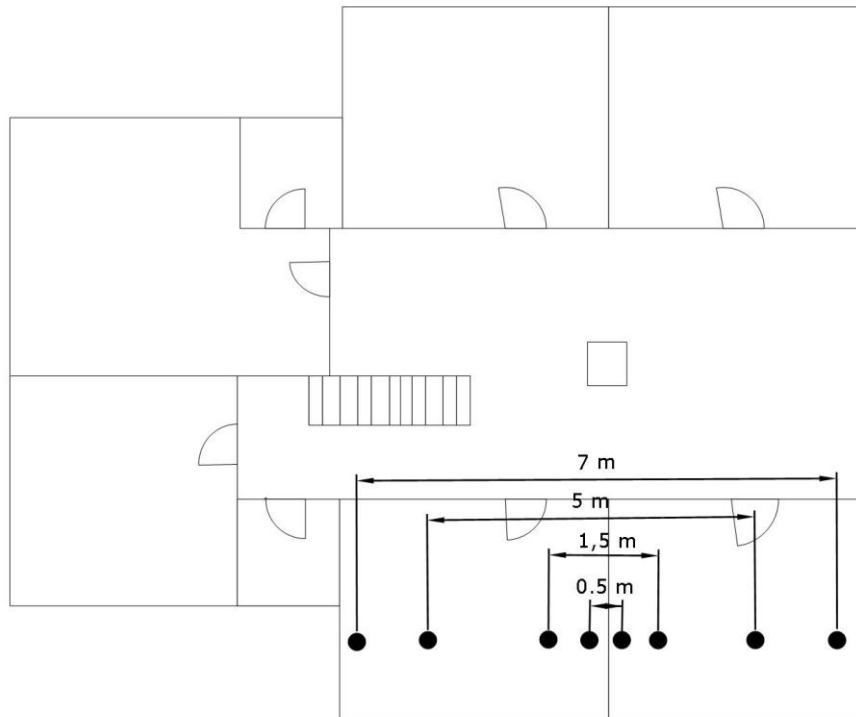


*Joonis 2. Teise korruse plaan*

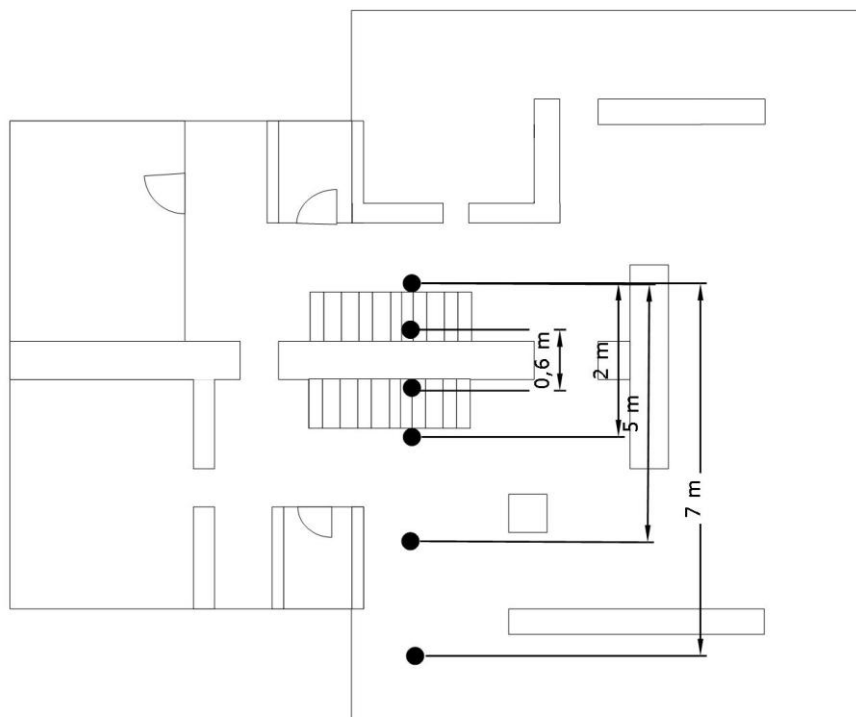
Allpool toodud joonised on illustratiivsed ning ei ole mõeldud andmete esitamiseks vaid nende täiendavaks kirjeldamiseks. Joonistel on märgitud seadmete asukohad musta täpiga ning saatja ja vastuvõtja vahemaad märgistatud mõõtketiga. Iga vahemikmärgistus vastab ühele testkonfiguratsioonile. Betoonist seinad on märgitud ristkülikutega. Puitkarkassile kinnitatud ja kipsplaadiga kaetud seinad on märgitud ühekordse joonega.



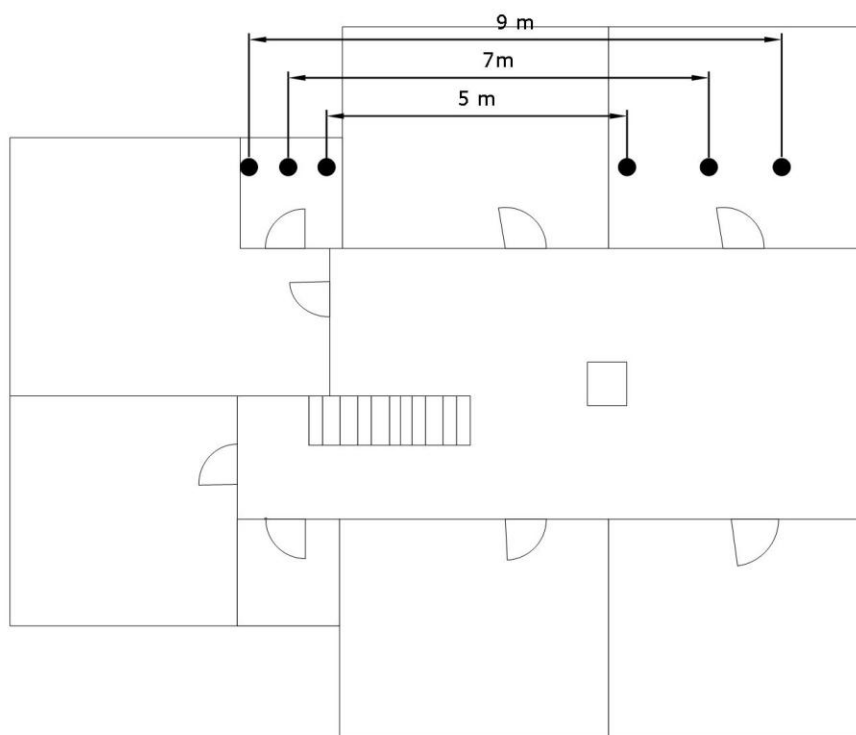
*Joonis 3. Seadmete paiknemine 2. testil.*



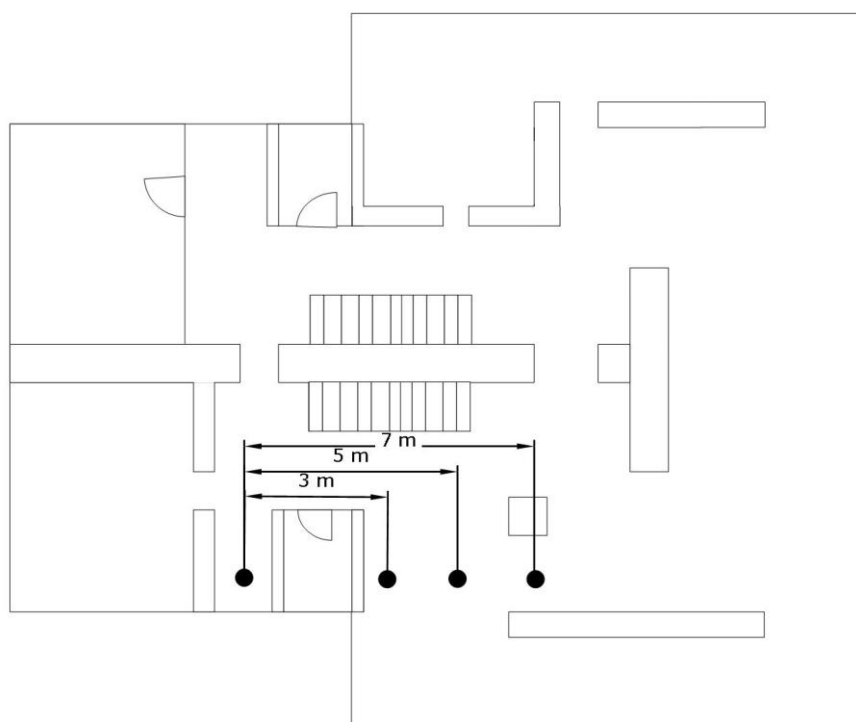
*Joonis 4. Seadmete paiknemine 3. testil.*



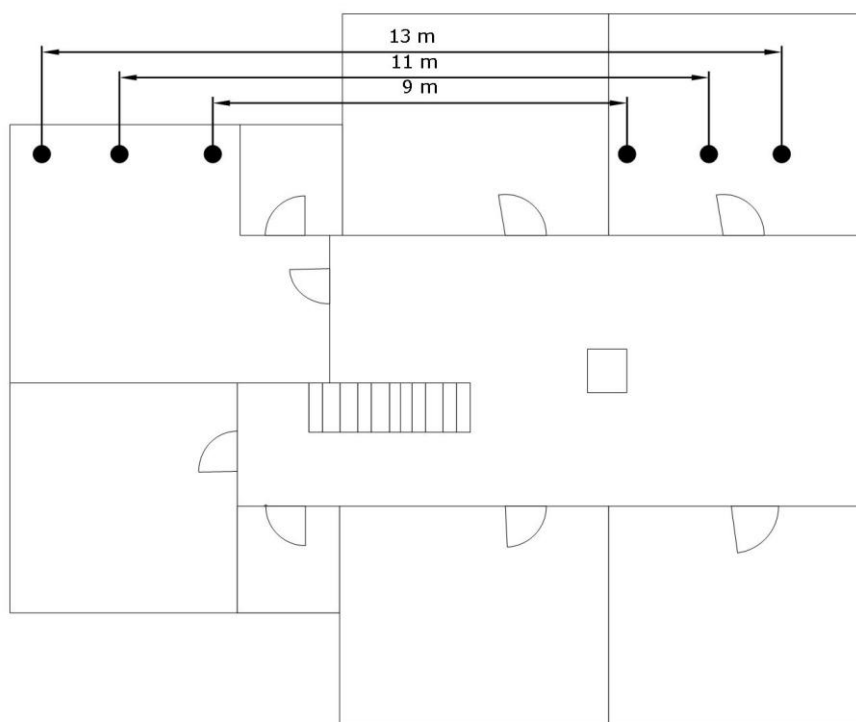
*Joonis 5. Seadmete paiknemine 4. testil.*



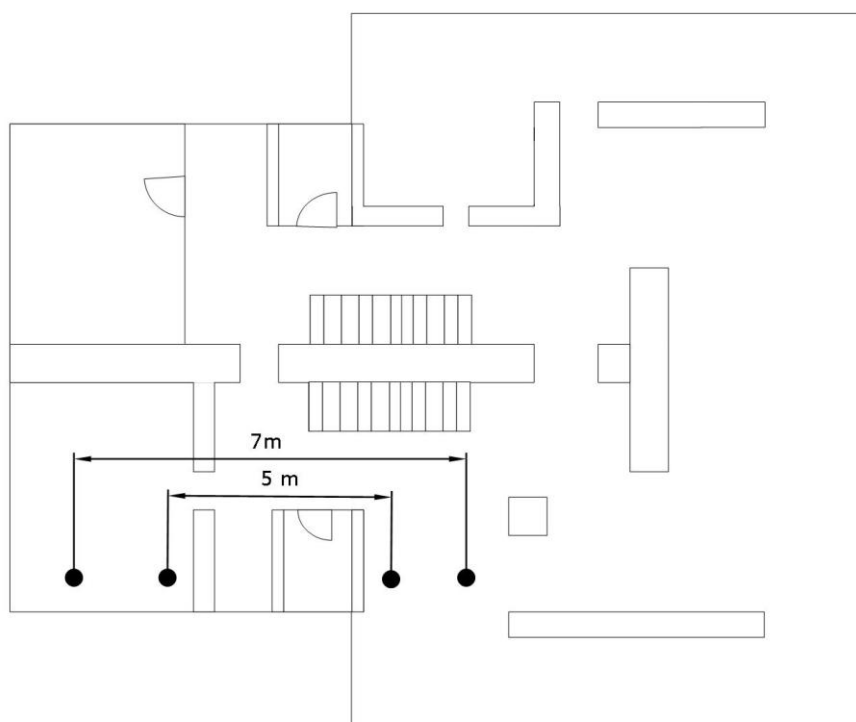
*Joonis 6. Seadmete paiknemine 5. testil.*



*Joonis 7. Seadmete paiknemine 6. testil.*



*Joonis 8. Seadmete paiknemine 7. testil.*



*Joonis 9. Seadmete paiknemine 8. testil.*