



Examensarbete

Elektroingenjör, 180 hp och Civilingenjör
i Datateknik, 300 hp

Elektromagnetisk modellering av Grimeton Radiostations VLF-antenn

Examensarbete 15 hp

Halmstad 2022-03-27

Lukas Lindqvist

Shaven Guli

Sammanfattning

Vid konstruktion av antenner idag används datorbaserade verktyg för att göra simuleringar i utvecklingsskedet för att se till att antennen uppnår eftersträvad prestanda. Denna teknik var inte möjlig att använda under de första årtiondena av 1900-talet då multipelantennen utvecklades, vilket är antenntypen som används vid Radiostationen i Grimeton. Detta tillsammans med den ringa dokumentationen om antennen i Grimeton skapar intresse hos teknikintresserade att veta mer om antennens funktion och varför den är konstruerad som den är.

I detta projekt görs simuleringar av antennen och ett tidssynkroniserat mätsystem byggs upp och programmeras, för att kunna användas till att göra mätningar på antennen. Detta görs för att öka trovärdigheten för resultatet av simuleringarna.

Simuleringarna visar att fasläget för spänningen mellan antennens toppnät och jordnät varierar mindre än 0,1 grad mellan antennens främre och bortre ände. Simulerad strömtäthet i toppnät och jordnät visar att det finns områden där strömmar från olika radiatorer tar ut varandra så att nettoströmmen där är nära noll. När olika parametrar varierades, så som konduktivitet och storlek på topp- och jordnät samt antalet radiatorer, så varierade strålningsresistansen för den simulerade modellen mellan 0,8 % och 3,9 %.

Det finns möjlighet att vidareutveckla detta arbete, genom att använda sig av resultatet av simuleringarna samt det uppbyggda mätsystemet. Fortsatt arbete kan vara att fortsätta studera litteraturen och bättre analysera resultaten i detta arbete samt vid behov utföra mätningar på antennen med det uppbyggda mätsystemet och fortsätta med simuleringar för att på djupet förklara vad som ger verkningsgradsökningen.

Abstract

In the design of antennas today, computer-based tools are used to make simulations in the development stage to ensure that the antenna achieves the desired performance. This technology was not possible to use during the first decades of the 20th century when the multiple antenna was developed, which is the type of antenna used at the Grimeton Radio Station. This together with the poor documentation about the antenna in Grimeton creates interest among technology enthusiasts to know more about the antenna's function and why it is designed as it is.

In this project, simulations are made of the antenna and a time-synchronized measurement system is built and programmed, in order to be used to make measurements on the antenna. This is done to increase the credibility of the results of the simulations.

The simulations show that the phase of the voltage between the antenna's aerial and ground conductors varies less than 0.1 degree between the antenna's near and far end. Simulated current density in aerial and ground conductors show that there exists areas where currents from different radiators cancel out so that the net current in these areas are close to zero. When various parameters were varied, such as conductivity and size of aerial and ground conductors as well as the number of radiators, the radiation resistance of the simulated model varied between 0.8% and 3.9%.

There is an opportunity to further develop this work, by using the results of the simulations and the built-up measurement system. Continued work can be done by continue studying the literature and better analyze the results of this work and, if necessary, perform measurements on the antenna with the built-up measurement system and continue with simulations to explain in depth what gives the efficiency increase.

Förord

Det finns en tillfredställelse i att avsluta det här projektet som kan liknas vid att nå slutdestinationen efter en lång och ansträngande resa. En resa som förvisso har medfört hårt arbete men som framför allt har gett nya kunskaper och erfarenheter. När projektet startade var vi osäkra på hur vi skulle ta oss till slutdestinationen. En sak vi kan säga med säkerhet är att inget hade varit möjligt utan den vägledning och det stöd som vi fått.

Vi vill rikta ett stort tack till vår handledare, Emil Nilsson. Vi vill tacka honom för hans vägledning och råd, samt stöd och motivation, vilket gjort arbetsgången intressant och lärorik. Vi vill tacka Per Sandrup som hjälpt till som handledare och med det tekniska inom projektet.

Vi vill också rikta ett stort tack till Arne Sikö som gjort intressanta mätningar i anläggningen och varit mycket delaktig i mätningarna samt besöken på Grimeton. Vi har genom Sikös belysande tankar och idéer kunnat ta fasta på den undersökning som varit nödvändig inom detta projekt. Genom Sikö har vi kunnat komma åt rikt litteratursmaterial och kontakt med övriga i vänföreningen, vilket varit ett stort bidrag för projektets stora framgång.

Inte minst vill vi också tacka EDRMedeso som sponsrat projektet med licensen för simuleringsmjukvaran Ansys Electronics Desktop som användes för att simulera antennen.

Det är många personer vi fått möta under projektet som alla förtjänar ett stort tack; Anders Larsson - för hjälp med mätningar och tekniska specifikationer om antennen, Fredrik Wiklund - som visat oss sändaren igång, Ola Hernvall - för bra fakta om antennen, Pererik Andreasson - för den tekniska hjälpen vi fått och för en god examination av vårt projekt, Björn Åstrand - för administration av kursen, Thomas Lithén - för lån av utrustning för projektet, Radioshistoriska föreningen i Västsverige - för bl.a. sponsring av resor. Vi tackar också Camilla Lugnet och alla andra på Världsarvet och i vänföreningen som vi mött under de trevliga besöken på radiostationen.

Det har varit givande att genomföra projektet och vi hoppas att det kan komma till nytta för ingenjörer och företag som riktat uppmärksamhet och väckt intresse för liknande projekt. Vi hoppas även att andra ingenjörer finner vår rapport inspirerande för framtida undersökningar.

Detta examensarbete har vi delat upp så att Shaven utvecklat mätsystemet och Lukas har gjort simuleringarna. Var och en har skrivit om sitt eget område.

Tack,

Shaven Guli & Lukas Lindqvist

Innehållsförteckning

1	Introduktion	2
1.1	Syfte.....	3
1.2	Mål.....	3
1.3	Avgränsningar	4
2	Bakgrund.....	5
2.1	En radiostation för kommunikation över Atlanten.....	5
2.2	Radiostationen i Grimeton.....	5
2.3	Radiostationens multipelantenn.....	7
2.4	Jordnätet och jordförhållandena	9
2.4.1	Jordnätet i marken	10
2.4.2	Jordsystemets luftburna del.....	10
2.5	Verkningsgrad hos antenner	11
2.6	Alexandersons multipelantenn	12
2.6.1	Multipelantennen	12
2.6.2	Balansnätet	13
2.6.3	Jordnätet	14
2.6.4	Elektrisk modell av antennen	15
2.7	Nutida forskning om likartade antenner	16
2.8	Tidigare arbeten för tidssynkroniserade mätsystem	19
3	Teori.....	21
3.1	Teoretisk bakgrund till ett mätsystem	21
3.1.1	Hårdvara	21
3.1.2	Kommunikationsgränssnitt	22
3.1.3	Programmeringsmiljöer	24
3.1.4	Samplingshastighet och lagringsenheter	25
3.1.5	Olika sätt att synkronisera tiden	25
3.2	Elektromagnetisk modellering.....	26
3.3	Ansys	27
3.3.1	Ansys HFSS	27
4	Metod.....	29
4.1	Skapande av 3D-modellen i Ansys HFSS	29
4.1.1	Den valda modellen	29

4.1.2	Olika varianter av antennenmodellen	31
4.2	Inställningar i Ansys HFSS	34
4.3	Simuleringar och exportering av data.....	34
4.3.1	Impedans och fält	34
4.3.2	Spänningar och strömmar	35
4.3.3	Avgiven strålning	36
4.3.4	Strömfördelning i jordplanet.....	36
4.3.5	Simulering av spolarna.....	37
4.4	Mätsystemuppbyggnad.....	38
4.4.1	Installationer.....	38
4.4.2	Programspråk för Arduino	38
4.4.3	Programspråk för Raspberry Pi.....	39
4.5	Utvärdering av PPS-signal från GPS.....	39
4.6	kommunikation mellan enheter	39
4.6.1	Antennen och Arduinos ADC	39
4.6.2	GPS-modul och Arduino Due	41
4.6.3	Arduino Due och Raspberry Pi	42
4.7	Impedansmätning	43
4.7.1	Bearbetning av mätdata.....	45
5	Resultat	46
5.1	Antennens impedans.....	46
5.2	Spänningens variation längs antennen.....	47
5.3	Strömtätheten i toppnät och jordnät	47
5.4	Strömfördelning i toppnätet och ström i nedledarna	48
5.5	Verkningsgraden för de olika modellvarianterna	50
5.6	Elektriska fält vid jordplanet	51
5.7	Strömfördelning i jordplanet	51
5.8	Uppmätt impedans.....	52
5.9	Spolarnas induktans.....	52
5.10	Magnetiska fält vid spolarna	53
5.11	Modell med kretselement	54
5.12	Simulering i Ansys HFSS.....	54
5.12.1	Resursåtgång för simuleringar	55

5.12.2	Svårigheter med simuleringarna i HFSS.....	55
5.13	Resultatet av mätsystemet	57
5.13.1	Programmet för mätsystemet	57
5.13.2	Presentationen av data.....	59
6	Diskussion.....	61
6.1	Modellen med krets-element	61
6.2	Mätningar och dess koppling till simuleringar	62
6.2.1	Antennens impedans	62
6.2.2	Spänning och ström.....	63
6.3	Strömfördelningen i jordplanet – jämförelse mot Alexandersons beräkningar	63
6.4	Fältstyrka vid antennen i Grimeton och hälsoeffekter	63
6.5	Jämförelse mot nutida forskning om likartade antenner	64
6.6	Mätsystem	64
6.7	Samhällskraven på teknisk utveckling	66
7	Slutsats	67
	Referenser	I
	Bilagor.....	IV
	A: Ritning över jordnätet.....	IV
	B: Ritning över balansnätet	V
	C: Beskrivning av jordnät och balansnät, Telegrafverket	IX
	D: Matlab-kod för impedansberäkning	XI
	E: Simulerad strömtäthet i jordnätet.....	XIV

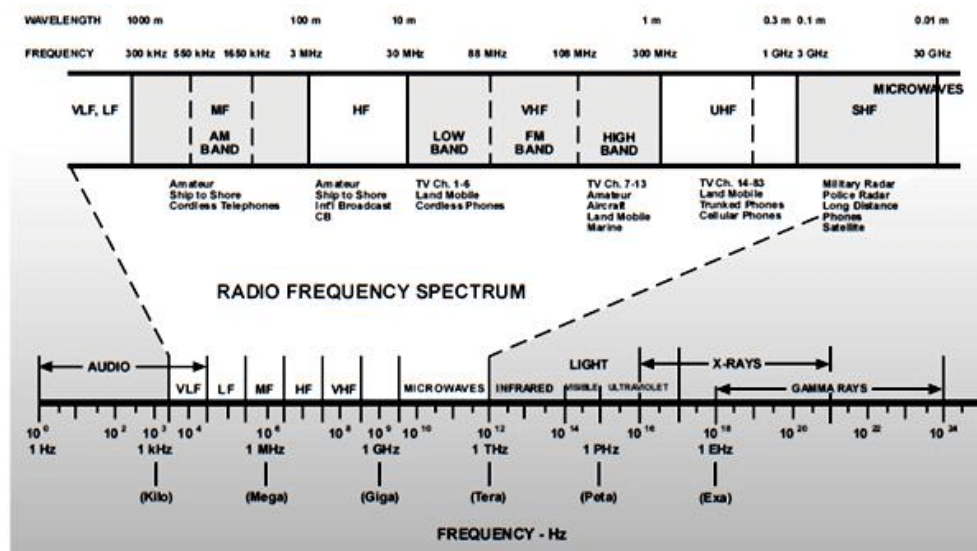
1 Introduktion

Radiostationen i Grimeton byggdes i slutet av första världskriget. Den uppfördes för att hålla kontakten med andra sidan atlanten och göra kommunikationen mindre störbar genom att undvika kablar som kan slitas av. Antennen arbetar i långvågsbandet (Figur 1) och togs i bruk 1924 och användes till 1940-talet för kommunikation om affärsuppgörelser och möjliggjorde för svenskamerikaner att hålla kontakten med släkten. Antennen är en så kallad multipelantenn bestående av sex stycken 127 meter höga torn längs en sträcka av cirka två kilometer. Det fanns 35 liknande radiostationer runt om i världen när kommunikation skedde med långvåg¹ [1]. Grimeton radiostation är den numera enda kvarvarande i sitt slag världen över. Radiostationen blev listad som världsarv år 2004 och är nu ett turistmål. Sändaren startas upp vid ett par tillfällen om året för att hålla maskinen i gott skick.

Sändaren utgörs av en elektrisk motor som driver en generator för att alstra elektrisk energi med frekvensen 17,2 kHz som antennen arbetar på. Multipelantennen består av ett toppnät av åtta parallella linor längs antennen uppe i tornen och vid varje torn en nedledare som är de aktiva, strålande elementen i antennen. Under antennen ligger ett jordnät som en matta av nedgrävd koppartråd. Nedledaren ansluter till jordnätet via en spole. Figur 2 visar stationshuset som inrymmer sändaren. De tre första antenntornen syns också i bilden.

Information om antennen som finns tillgänglig är begränsad. Anledningen till detta antas vara att tiden då antennen konstruerades var möjligheterna att modellera antenner mycket låg. Intresset för att veta mer om antennen, dess funktion och teknik är stor bland teknikintresserade. Därför avser detta projekt att söka svar på vissa frågeställningar om antennens funktion.

¹ Antalet radiostationer i världen avser de stationer med en effekt över 100 kW och där sändaren precis som i Grimeton bestod av en elektromekanisk konstruktion med en motor som drev en högfrequensgenerator.



Figur 1: Långvåg (20 km – 1 km) tillhör VLF-bandet (3 kHz – 30 kHz) som ligger längst ned i radiofrekvensspektret. © 1996 Harris Corporation [2].



Figur 2: Radiostationen i Grimeton. Stationshuset med antenntornen i bakgrunden.

1.1 Syfte

Detta arbete har som syfte att bidra med kunskap om hur antennen till radiostationen i Grimeton fungerar. Att hitta möjlighet att förbättra de sändningar som görs är också en nytta med projektet.

1.2 Mål

Det som önskas uppnås av projektet är följande

- Att ta fram en 3D-modell av antennen i Ansys HFSS för elektromagnetiska simuleringar.

- Undersöka hur strömmar rör sig i antennen för att studera källan till multipelantennens ökade verkningsgrad gentemot en enkel monopol-antenn.
- Studera antennspänningens fasskillnad mellan olika positioner längs antennen.
- Bygga upp ett mätsystem för att mäta olika spänningsnivåer, fasskillnaden i olika delar av antennen och kunna återskapa en signal. Detta sätter krav på att systemet måste vara synkroniserat i tid och ha en tillräckligt snabb samplingshastighet.
- Mäta antennens impedans.
- Genom resultaten av simuleringar och mätningar ta fram en modell med elektriska krets-element för hur antennen belastar sändaren.

1.3 Avgränsningar

Fokus i det här projektet kommer vara på att ta fram en simuleringsbar modell. Mycket av utforskandet i antennens funktion kommer kunna göras i eventuella framtida projekt som detta arbete lägger grunden till. Simuleringsarbetet avgränsas till att enbart fokusera på själva antennen och inte hur dess omgivande natur påverkar antennen. Ingen raytracing för att se hur strålningen breder ut sig över jordklotet kommer utföras. Inte heller tas hänsyn till hur jorden runt jordnätet påverkar. En avgränsning som gjorts inom utforskandet av verkningsgraden är att endast studera hur olika parametrar inverkar på verkningsgraden. Det innebär ett inget värde för verkningsgraden för antennen till Grimeton Radiostation bestäms från simuleringarna.

Inga mätningar med det mätsystem som utvecklas i projektet kommer göras på antennen. Sändaren är endast i gång vid få tillfällen om året så inget tillfälle att mäta på antennen kommer finnas när mätsystemet är färdigutvecklat och inom tidsramarna för projektet. Övriga mätningar som kan vara relevanta för projektet, så som att mäta sändarens utspänning kommer göras av Arne Sikö, vänföreningen Alexander. Mätningar kommer också handledas av Per Sandrup, Högskolan i Halmstad.

2 Bakgrund

Det har diskuterats av vänföreningen Alexander som sköter radiostationen hur den fungerar och de tyckte att det enda som kunde ge riktiga svar var en elektromagnetisk simulering och därav kom detta projekt. Föreningen gör en del mätningar och det är nu medan denna enda maskin fungerar som det är möjligt. Simuleringar nu kan ge idéer om nya saker man vill mäta. Att antennen är en multipelantenn med sex radiatorer i stället för bara en enkel monopolantenn har med en ökning av verkningsgraden att göra, men det är inte helt klart på vilket sätt det fungerar. Jordnätet är också dåligt dokumenterat varför det är konstruerat just som det är. Verkningsgraden är bra att känna till för att veta hur stor effekt som strålas ut från antennen så att beräkningar om hur långt signalen når kan göras. Vid sändningarna av vänföreningen Alexander kan inte alltid full effekt matas ut. Det kan ha med väderleken att göra. Fortsättningen i detta kapitel ger en bakgrund till varför radiostationen i Grimeton kom till, hur den är uppbyggd och vad som var känt om antenner på tiden då den konstruerades.

2.1 En radiostation för kommunikation över Atlanten

Första världskriget hade gjort det svårt att hålla kontakt med omvärlden. Telegrammen på den tiden gick via kablar, atlantkabel på havets botten [3]. Kriget visade på sårbarheten att skicka meddelandena via kabel eftersom ledningarna kunde saboteras av fienden. När freden kom letade man efter alternativ till kablar för att undvika det i framtiden. Innan kriget kunde de radiosändare som fanns i Sverige bara nå korta avstånd. År 1920 förslog kungliga Telegrafverket att skapa trådlös förbindelse över atlanten till USA. Det skulle bidra till att främja affärssuppgörelser men även att ha kontakt med svenskamerikaner. Det valdes ett system från Radio Corporation of America (RCA). Platsen för antennen skulle vara västkusten för fri sikt till Amerika. Signalen skulle gå fri från Norge, Danmark och Skottland. Hösten 1922 blev den exakta platsen, Grimeton, bestämd och vid årsskiftet började bygget. Vintern två år senare var anläggningen färdig. I slutet av 30-talet började Grimeton Radiostations långvågssändare få konkurrens av kortvågssändare, men den användes ändå in på 40-talet. Kortvågssändare byggdes på samma plats som långvågssändaren i Grimeton. 1945 stod kortvågssändarna för nästan all trafik.

2.2 Radiostationen i Grimeton

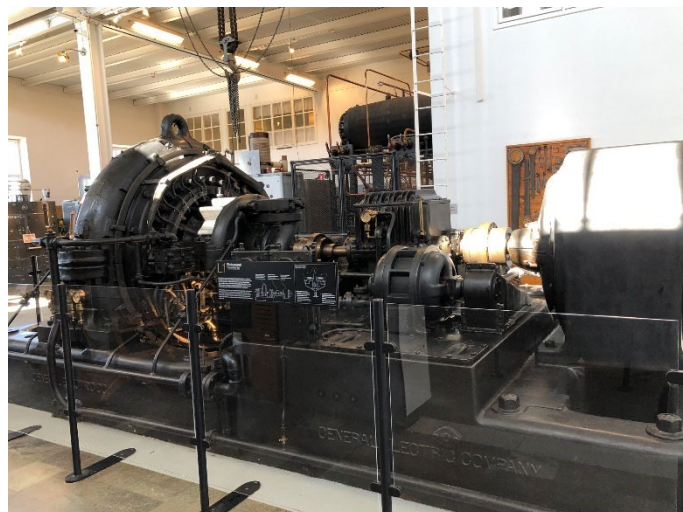
Radiostationen består av ett stationshus och antennen utanför. Stationshuset inrymmer sändaren som genererar signalen till antennen. Sändaren består av en 450 kW elmotor som driver en generator. Generatoren, den så kallade Alexandersonalternatorn efter uppfinnaren Ernst F. W. Alexanderson, visas i Figur 3.

Alternatorn roterar med ett varvtal drygt 2 100 varv per minut som genererar den frekvens 17,2 kHz som långvågssändaren i Grimeton sänder på. Från alternatorns flera lindningar samlas energin ihop i en luftlindad transformator med en sekundärlindning. Utspänning och ström från transformatorn är 2 kV respektive 100 A vilket ger en uteffekt på 200 kW.

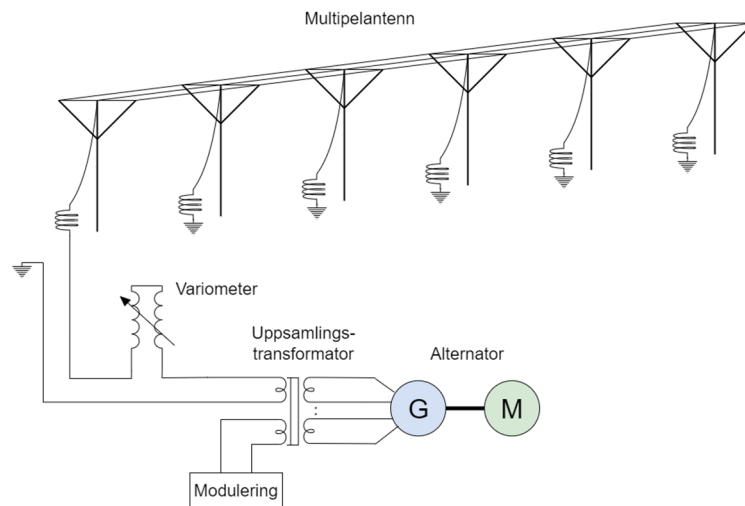
Via en variabel induktans, variometer, leds strömmen ut på antennen. Variometern används för att finavstämman antennen för resonans vid 17,2 kHz. Variometern består av en inre spole som kan vridas inuti en yttre spole. I ena ändläget samverkar fälten från de båda spolarna och induktansen är maximal. I andra ändläget motverkar fälten varandra och induktansen är minimal. I mittenläge, 90 grader, är variometerns induktans 0.59 mH [4]. Sändarens utgångsimpedans uppges vara $3\ \Omega$ resistans + $70\ \Omega$ induktiv reaktans [4]. Figur 4 visar elektriska vägen mellan sändare och antenn. Antennen beskrivs med ingående i avsnitt 2.3.

En mätning av ström och spänning till antennen har gjorts av Arne Sikö i samband med detta projekt. Vid det tillfället var spänningen 6,65 kV rms och strömmen 60 A. Strömmens fasläge var 76 grader efter spänningen vid 17,23 kHz. Aktiva utmatade effekten blir då 97 kW.

I Grimeton fanns ursprungligen två långvågssändare. En skrotades på 1960-talet men den andra finns kvar och är brukbar än idag. Tre gånger om året tas antennen i bruk av vänföreningen Alexander. Dessa tillfällen är Alexandersondagen, FN-dagen och julaftons morgon. Åtskilliga radioentusiaster världen över rattar in sina långvågsmottagare vid dessa tillfällen för att lyssna på meddelandet från Grimeton.



Figur 3: Alexandersonalternatorn inne i stationshuset



Figur 4: Principen för hur sändaren är kopplad till antennen

2.3 Radiostationens multipelantenn

Antennen till Grimetons långvågssändare består av sex stycken 127 meter höga torn med 384 meters mellanrum som bär upp åtta parallella linor av fosforbrons vilket utgör antennens toppnät. Antenntornen visas i Figur 5, med torn nummer 6 i förgrunden.

Höjden ovanför marken där toppnätet är upphängt i tornen är 116 meter. Från toppnätet vid varje torn går en ledning ned mot marken vilken benämns nedledare och är antennens aktiva strålande delar. Nedledarna är vid torn 2, 4 och 5 bara anslutna till ena halvan av toppnätet så som visas i Figur 7. Det kommer av ett snösmältningssystem som fungerade genom att leda en lågfrekvent nätström genom topplinorna och krävde att hålla linorna åtskilda för att leda strömmen fram och tillbaka till ena änden av toppnätet.

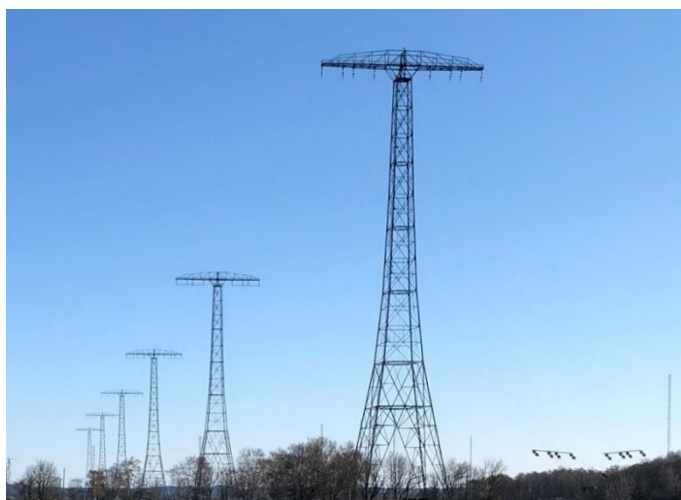
Nedledarna ansluter till en så kallad förlängningsspole monterad på ett betongfundament på marken. Spolarna utgörs av cirka 80 varv med litzkabel lindade i en 10-kantig form med 20 plan med fyra varv i varje plan. Resistansen hos varje spole beräknas vara $0,24 \Omega$, baserat på tillverkarens data över kabelns resistans. Spole nummer 1 visas i Figur 6. Antalet varv på spolarna ger antennen sin resonansfrekvens och kan behöva ändras. Tabell 1 anger antal varv som användes vid ett tillfälle i slutet av december 2021.

Spolens andra ände ansluter till ett jordnät i form av en matta av nedgrävda koppartrådar under hela antennen. Jordnätet är fundamentalt för antennen och en viktig del att undersöka i detta projekt. Jordnätet förklaras mer ingående i avsnitt 2.4. Varje nedledare tillsammans med jorden formar då en monopelantenn.

En sådan antenn bestående av flera parallella radiatorer kallas multipelantenn (eng. multiple antenna/multiple tuned antenna). Multipelantennen är också E. F. W. Alexandersons patent och ingår i uppfinnarens pakettlösning för

trans-oceaniska radiosändare bestående av alternator, multipelantenn och modulator.

Grimetons arbetsfrekvens 17,2 kHz motsvarar en våglängd av 17 400 meter. En monopolantenn ska vara en kvarts våglängd lång för att komma i resonans och stråla bra. Höjden på Grimetons antenn är strax över 100 meter och utgör endast 0,57 % av våglängden, vilket normalt leder till låg verkningsgrad, men med hjälp av Alexandersons lösning att skapa en multipelantenn möjliggjordes en bättre verkningsgrad. Mer om teorin bakom antennens funktion och hur verkningsgraden förbättras med en multipelantenn jämfört med en enkel monopolantenn förklaras i avsnitt 2.6.



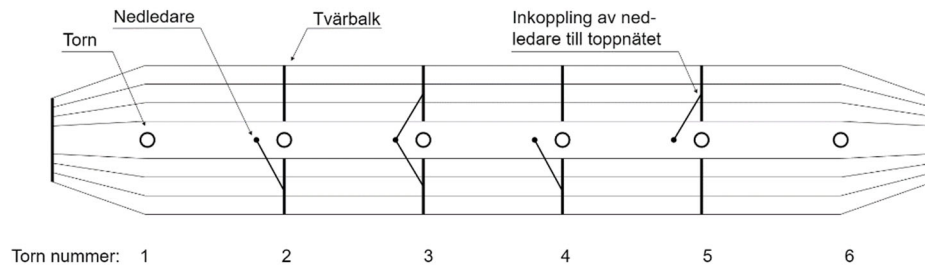
Figur 5: Den två kilometer långa antennen.



Figur 6: Spolen närmst stationshuset genom vilken strömmen till antennen matas in.

Tabell 1: Antal inkopplade varv på förlängningsspolarna i december 2021

Spole nummer	Varvantal
1	78
2	77
3	78
4	76
5	77
6	77



Figur 7: Principskiss över toppnätet. Varannan nedledare är ansluten till varannan halva av toppnätets åtta linor, förutom nedledare tre som på senaste tiden varit ansluten till båda. Förr leddes en ström genom antennen för att smälta isbark vilket krävde att halvorna var separerade.

2.4 Jordnätet och jordförhållandena

För en monopolantenn som den i Grimeton så behövs ett ledande jordplan under antennen. Ett perfekt jordplan med stor utsträckning och god ledningsförmåga skapar en spegelbild av strålningen från monopolantennen så den verkar som en dipolantenn [5]. I Grimeton utgörs detta jordplan av ett nät med koppartrådar nedgrävda i jorden på ett djup mellan 0,3 och 0,6 meter. På så sätt skapas kontakt mellan antennens jordanslutning och den ledande jorden som då kan utgöra en förlängning av jordplanet utanför kopparnätets utsträckning. Jordnätet fungerar också som ena plattan i en plattkondensator för att skapa en kapacitans mellan antennens vertikala del och jord för en monopolantenn, eller kapacitans mellan toppnätet och jord som för antennen i Grimeton som har ett stort toppnät.

För jordnätet kan det vara aktuellt att känna till egenskaperna hos den jord som finns i Grimeton. De används inte i detta projekt men jordens elektriska egenskaper anges av Högman och Dagås [4] till

Ledningsförmåga: 0,015

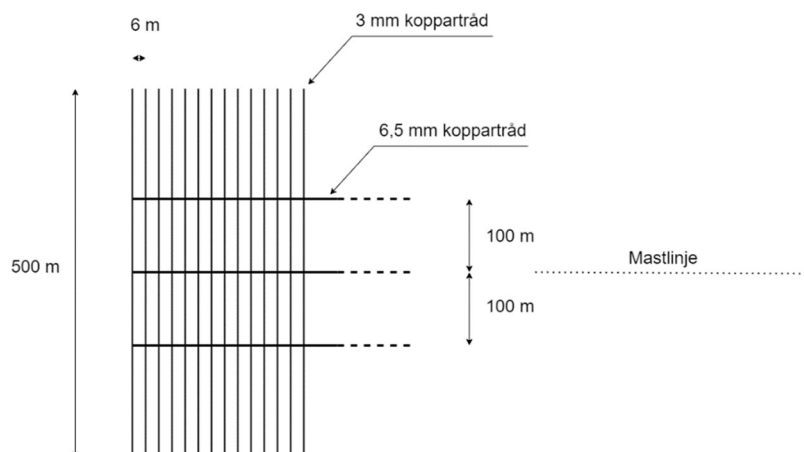
Relativ dielektricitetskonstant: 15

Enheten för ledningsförmågan saknades i referensen men misstänks vara Siemens per meter.

Norén [6] beskriver arbetet på 1920-talet med uppförandet av radiostationen och utgrävningen för mastfundamenten. Vid mast 1 till 3 bestod marken av lera ned till ett djup av 3,5 meter. Vattenförande lager påträffades först vid 3,5 meters djup. Vid mast 4 till 6 bestod marken av sand uppblandad med sten omedelbart under matjorden. Sanden fortsatte ned till berggrunden och var rikt vattenförande. Jordsystemet består dels av de nedgrävda trådarna, dels av ett system av luftledningar på trästolpar. En beskrivning av hur jordsystemet är uppbyggt finns i bilaga C. Ritningar av jordsystemet finns i bilaga A och B. En sammanfattning av hur jordsystemet är uppbyggt ges nedan.

2.4.1 Jordnätet i marken

Jordnätet består av glödgad koppartråd av 3 millimeter diameter som förlagts i 500 meters längder vinkelrät mot linjen av antennmaster (mastlinjen) med 6 meters mellanrum längs hela antennlängden om drygt 2 kilometer. Djupet är 0,3 meter under markytan i det område om 150 meter på vardera sida om mastlinjen där Televerket köpt in marken och 0,6 meter under markytan i det område med nyttjanderätt, där marken skulle vara brukbar. De 3 millimeters koppartrådarna ansluts till varandra med två 6,5 millimeters koppartrådar som löper längs antennen, en på vardera sida 100 meter från mastlinjen. En tredje 6,5 mm koppartråd löper mitt i mastlinjen och är förbunden med något 10-tal av de tvärgående trådarna. Principen för hur jordnätet är uppbyggt visas i Figur 8. Vid varje mastfundament finns två jordplåtar som är förbundna med masten och 6,5 mm-tråden i mastlinjen. Under spolarna finns extra tvärgående trådar. De är 50 m långa och har ett inbördes avstånd 1,5 m. I ändarna är dessa extra tvärgående trådar anslutna till varandra med längsgående 6,5 mm koppartråd. Totalt består jordnätet av 204 000 meter koppartråd till en vikt av 14 ton. En ritning av jordnätet återfinns i bilaga A.

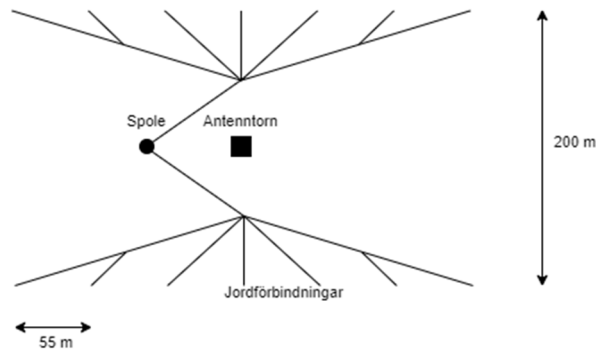


Figur 8: Principen för hur jordnätet är uppbyggt med tvärgående 3 mm koppartrådar som kopplas samman med hjälp av 6,5 mm koppartrådar som går längs den 2 km långa antennen.

2.4.2 Jordsystemets luftburna del

För att ansluta spolarna till jordnätet finns ett luftburet så kallat uppsamlingssystem eller balansnät. Balansnätet består av ett nät av 6 mm

koppartråd upphängt på trästolpar. Från vardera av spole 2 till 6 grenar balansnätet ut åt båda sidor av mastlinjen till ett träd av ledningar enligt Figur 9. Två parallella 6 mm koppartrådar går ut åt varje sida från spolarna. Vid stolparna i balansnätets yttre ände, 100 meter från mastlinjen, ansluter balansnätet till jordnätet i totalt 14 punkter för varje spole, sju på ena sidan och sju på andra. Dessa sju par av anslutningspunkter är jämnt fördelade längs det område av 384 meter som är hör samman med respektive mast och spole. På så sätt är spolarnas jordförbindelser utspridda över ett stort område och inte anslutna i endast en punkt till jordnätet.



Figur 9: Balansnätet förbinder spolarna med jordnätet i sju punkter på vardera sida om mastlinjen

2.5 Verkningsgrad hos antenner

En antenn, som är det element för att omvandla elektrisk energi till strålning som sänds ut i omgivningen, kan inte omvandla all den elektriska effekt som matas in till strålning. Strömmar som krävs i antennen ger värmeförluster när de möter resistanser i antennens ledande delar. Förlustresistansen betecknas som jordresistansen, R_j .

En antenn kan betraktas ha en resistans i serie med strömmen, strålningsresistansen R_r , så att utstrålad effekt beräknas som $P_r = I^2 R_r$, där I är antennströmmen.

Strålningsverkningsgraden erhålles då som

$$\eta_r = \frac{R_r}{R_j + R_r} \quad (1)$$

Strålningsresistansen ges av nedanstående formel [7]

$$R_r = 1578 \left(\frac{h}{\lambda} \right)^2 \left(\frac{I_{eff}}{I} \right)^2 \quad (2)$$

och är som visas proportionell mot kvadraten på de båda förhållandena, dels förhållandet mellan antennens effektiva höjd (h) och våglängden (λ), dels förhållandet mellan medelvärdet av strömmen i antennens vertikala del (I_{eff}) och strömmen i antennens bas (I).

För en inverterad L- eller en T-antenn, där antennens horisontella delar som inte bidrar till den vertikala strålningen, har mycket större area än den vertikala delen, kan antas att fältlinjerna för E-fältet mellan antennens horisontella del och jord går vertikalt i hela området så att antennens kapacitans helt är koncentrerad mellan de horisontella delarna och jord. All ström som går in i antennens bas kommer då gå genom hela den vertikala ledaren för att ge laddning till kapacitansen hos de horisontella ledarna. Då är $I_{eff} = I$, så att uttrycket för strålningsverkningsgraden kan förenklas till

$$R_r = 1578 \left(\frac{h}{\lambda} \right)^2 \quad (3)$$

För en multipelantenn som den i Grimeton som formar flera hopsatta T-antennor med ett stort toppnät kan antas att denna förenkling ger trovärdigt resultat och det är den förenklade formeln som används i litteraturen vid beräkning av strålningsresistans för multipelantennor. Det inger dock anledning att studera hur strömmen fördelar sig över antennen i Grimeton. Första och sista nedledarna som utgörs av att toppnätets samtliga åtta linor lutar ned mot marken kan göra att strålningsresistansen för dessa radiatorer är något lägre än för övriga.

För att uppnå hög verkningsgrad skall, vid antagande att den förenklade formeln gäller, antennen vara hög i förhållande till våglängden och förlustresistansen låg.

2.6 Alexandersons multipelantenn

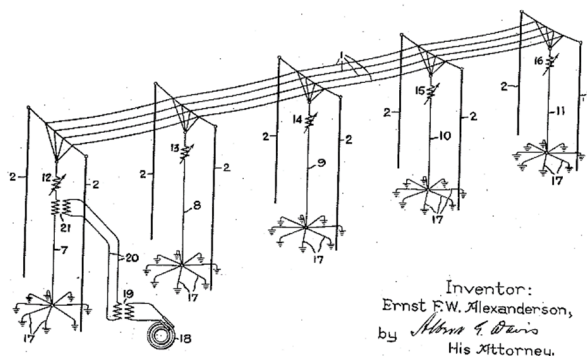
I tre patent av Ernst F. W. Alexanderson beskriver uppfinnaren tre olika förbättringar som ökar verkningsgraden på antenner som används för långvågs-sändningar. De tre patenten är: Multipelantennen [8], Balansnätet [9] och Jordnätet [10].

2.6.1 Multipelantennen

Den grundläggande förbättringen av antenners verkningsgrad var att Alexanderson kom på en antenn med flera jordförbindelser – multipelantennen, som visas i Figur 10.

Alexanderson förklarar i sitt patent att det elektriska och det magnetiska utstrålade fälten från en monopolantenn är proportionella mot strömmen och spänningen, men att effektförbrukningen är produkten av ström och spänning så att effektförbrukningen är proportionell mot kvadraten på styrkan hos de utstrålade fälten. Detta samtidigt som den totala fältstyrkan från flera system är den algebraiska summan av den momentana fältstyrkan hos vart och ett av systemen. Det innebär att en låg effekt eftersträvas för att hålla verkningsgraden hög. Flera parallella radiatorer med liten ström i varje är därför bättre än en radiator med stor ström. Tidigare hade gjorts försök med flera parallella radiatorer men problem uppstod i att få dem att stråla i fas.

Alexandersons multipelantenn var lösningen på att få flera parallella radiatorer att stråla i fas. Lösningen var att mata alla radiatorer med hög spänning och låg ström i den transmissionsledare som leder energin ut till radiatorerna. På så vis skulle det inte uppstå någon fasskillnad längs med transmissionsledaren. Tidigare hade antenner matats i serie med en kapacitans och en induktans. Vid resonans uppstår då ett minimum i impedans och strömmen är hög. Genom att i stället mata antennen parallellt med kapacitansen och induktansen uppstår i stället ett maximum i impedansen vid resonans och strömmen blir låg men det krävs hög spänning. Alexanderson förklarar att det går att åstadkomma med en vanlig transformator där sekundärlindningen kopplas mellan toppnät och jordnät, mellan vilka också nedledare och spolar är inkopplade. I stället för en transformator utnyttjade Alexanderson resonansen för att höja upp spänningen. Första resonanskretsen, bestående av första spolen och den del av kapacitansen mellan toppnätet och jordnätet som laddas upp av första spolen, matas på ordinarie sätt i serie med spolen och kapacitansen. Vid resonans blir då spänningen över reaktanserna höga. Spänningen över kondensatorn matar resten av resonanskretsarna via toppnätet, vilka då utgörs av parallellresonanskretsar med hög impedans. Energin kan då ledas långa sträckor med låga förluster vilket skulle undvika att en fasskillnad uppstod.



Figur 10: US Patent 1360167 [8].

2.6.2 Balansnätet

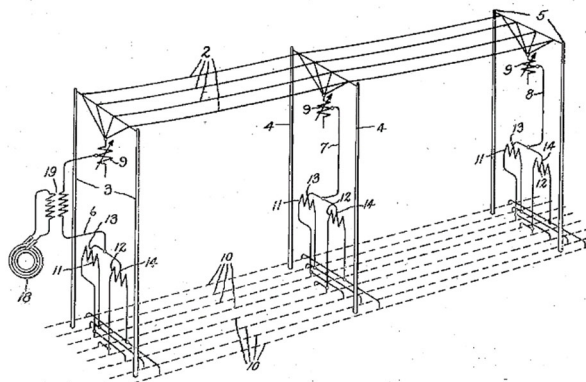
Nästa patent på området antenner sökte Alexanderson 1918, året efter patentansökan för multipelantennen. Upptäckten är en vidareutveckling av multipelantennen och bygger på att fördela jordströmmarna i jordnätet lika på olika delar och på så sätt minska jordresistansen ytterligare.

Tidigare hade antenners jordanslutning bestått av ett nät av ledare som grävts ned i marken inom ett område av liknande storlek som antennens toppnät. Antennens jordledning anslöts till en punkt i detta nätverk. Delarna av jordnätet närmst antennens jordanslutning leder då en stor del av strömmen och jordnätets yttre delar leder endast en liten del av strömmen.

Jordresistansen blir då mycket större än den skulle varit om alla delar av jordnätet ledde lika mycket ström.

Alexandersons patent beskriver ett system av ledningar kort över marken som ansluter antennens nedledare på så utspridda platser som möjligt. Med hjälp av lämpligt valda reaktanser hos balanseringsspolar i jordsystemet kunde strömmen fördelas jämnt mellan samtliga jordförbindningar. Jordförbindningarna och balanseringsspolarna syns i Figur 11.

Alexanderson upptäckte också att det gick ytterligare minska jordresistansen genom att utöver de direkta jordförbindelserna använda ett nät av ledningar ovan jord som kopplar kapacitivt till jord och utgör en alternativ väg för strömmen att röra sig. Då användes ledningar som sprider sig radiellt ut från nedre änden av förlängningsspolen och är isolerade från jord.

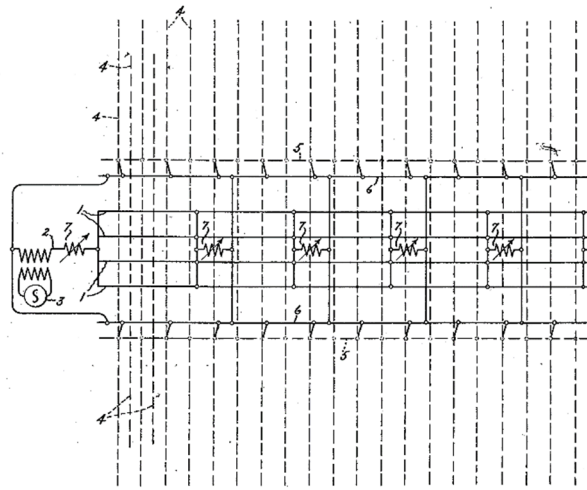


Figur 11: US Patent 1360168 [9].

2.6.3 Jordnätet

Det sista av de tre patenten som beskrivs här ansökte Alexanderson fyra år senare, 1922. Det beskriver jordnätet så som det är utformat i Grimeton med trådar nedlagda vinkelrät mot antennens längd. Ett sådant jordnät hade Alexanderson funnit att ytterligare minskade jordresistansen. De jordnät som tidigare använts hade varit så små att bara en liten del av de strömmar till antennens kapacitans leddes genom de nedgrävda trådarna i jordnätet och en stor del av strömmarna behövde ledas genom jorden. Jordens sämre ledningsförmåga än kopparledningarna innebar en högre förlustresistans än om jordnätet sträckte sig längre utanför antennen. Alexanderson hade gjort beräkningar som visade att om jordnätet sträckte sig 1,5 - 2,5 gånger antennens effektiva höjd utanför toppnätets projicering på marken så skulle 75 % - 90 % av strömmen ledas genom jordnätets ledare. Alexanderson skriver att det inte gör mycket nytta att låta jordnätet sträcka sig längre än $3/16$ våglängd utanför toppnätet. Våglängden är då våglängden i jorden vilken enligt Alexanderson beror på jordens ledningsförmåga och minskar med minskad resistans hos jorden. Den är mycket mindre än våglängden i luften. De tvärgående ledningarna sammankopplas av två eller flera bussledningar i

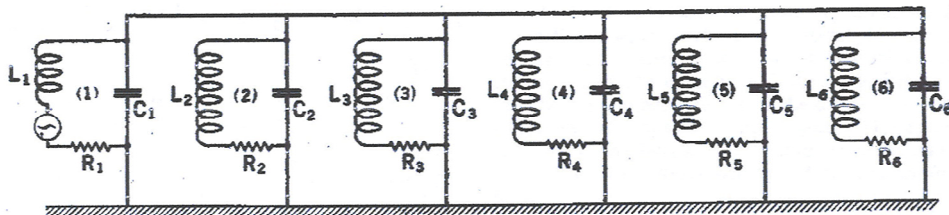
marken och liknande bussledningar ovan mark. Alexandersons jordnät visas i Figur 12.



Figur 12: US Patent 1677698 [10].

2.6.4 Elektrisk modell av antennen

Figur 13 visar en ekvivalent krets till hur antennen belastar sändaren, från tillverkaren av anläggningen i Grimeton; Radio Corporation of America (RCA) [11]. I modellen antas att kapacitansen mellan toppnätet och jord fördelas till de olika resonanskretsarna. Toppnätet i antennen ska både utgöra ena plattan i kondensatorn för den pendlande energin och leda ut ström för att försörja antennen med energi. Med tanke på antennens dimensioner kan det behöva verifieras att modellen är korrekt. Antennen har en längd ca. 1 900 meter mellan första och sista tornet. Våglängden antennen arbetar på är 17 400 meter. Antennen kan antas utgöra någon form av transmissionsledare med våghastighet samma som ljushastigheten. För en våg som matas in i ena änden skulle då en fasskillnad $360^\circ \times (1\,900 / 17\,400) = 39,3^\circ \approx 40^\circ$ uppstå mellan ändarna. Om denna fasskillnad finns så strålar inte alla radiatorer i fas.

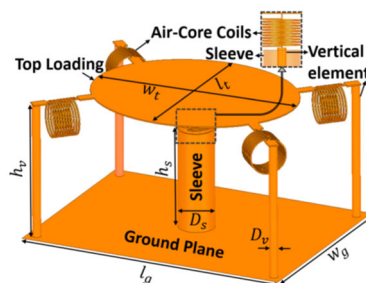


Figur 13: Elektrisk modell av antennen från 1924 av RCA [11]. De sex resonanskretsarna består av en varsin spole (L_i) och en viss andel av kapacitansen mellan toppnätet och jord (C_i). Energi matas in av källan till vänster i serie med första resonanskretsen.

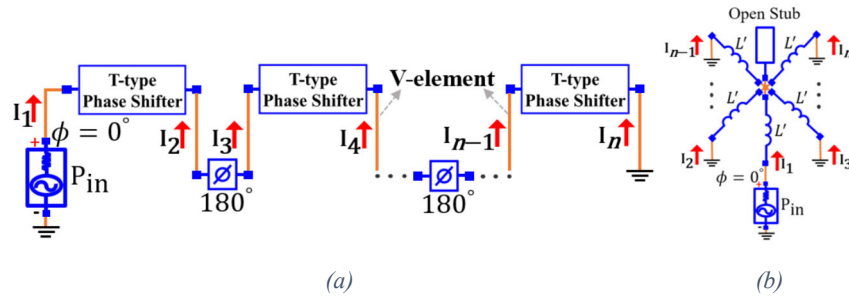
Ett steg i att verifiera modellen är att ta reda på om det finns en fasskillnad i spänning på olika platser över antennen och om strömmarna i de sex nedledarna går i fas. Det förmodas att inga tidigare simuleringar har gjorts av en multipelantenn som den i Grimeton, eftersom datorprogram för det ändamålet inte existerade vid utvecklingen av antenntypen. Att mäta fasskillnaden kräver också teknik för att tidssynkronisera mätvärdena från de

2.7 Nutida forskning om likartade antenner

Jihun och Dagefu utvecklade en antenn för kommunikation mellan förarlösa fordon [12]. Antennen är elektriskt kort och består av flera sammansatta element. Figur 14 visar en 3D-modell av antennen. Frekvensen är 42 MHz med en våglängd 7,1 meter. Antennens höjd var 0,2 m vilket är 1/36 våglängd. Jordplanet hade dimensioner 30 cm x 41 cm. De flera radiatorerna binds ihop genom att i toppen av varje element sitter en spole som är kopplad till en platta som ger kapacitans mot jord. På så vis beskriver Jihun och Dagefu det som att spolarna tillsammans med kapacitansen mellan topp-plattan och jordplanet skapar flera fasvridningsnätverk som vrider strömmen 180 grader så att de vertikala strömmarna går i fas i alla element, som visas i Figur 15. I Jihuns och Dagefus arbete gjordes fullvågssimuleringar i HFSS samt att en modell tillverkades. Vid simuleringarna varierades antalet element mellan ett och fem. Den tillverkade modellen bestod av ett inmatande element och fyra extra element. De fann att verkningsgraden ökade från 24 % för ett element till 48 % med fem element.

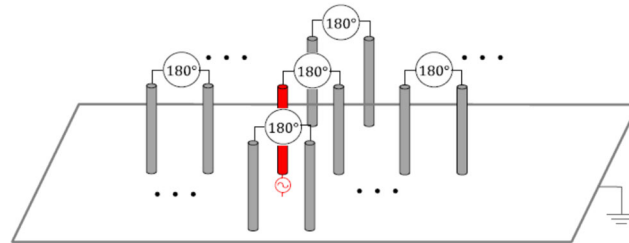


16



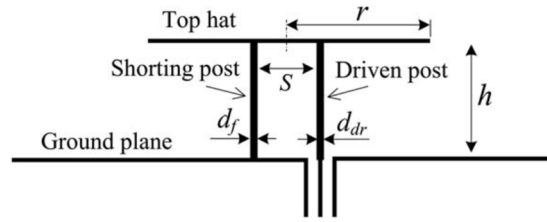
Figur 15: Schematisk representation av antennens fasskiftsnätverk (a) som byggs upp av spolar och kapacitans (b) [12]. © 2022 IEEE.

Rao och Sarabandi simulerade en elektriskt kort antenn $1/150$ våglängd hög och $1/16$ våglängd i horisontell utsträckning för 40 MHz resonansfrekvens [13]. Antennen bestod av par av så kallade parasitiska element som inte är hopkopplade med ledare, enligt modellen i Figur 16. Här överförs energin enbart genom att EM-fälten kopplar mellan de olika elementen som sitter tätt ihop. Denna antenn fungerade precis som den av Jihun och Dagefu att verkningsgraden ökade av att antalet vertikala element ökades. Genom att i simuleringarna sätta materialets resistivitet till noll kunde värdet av strålningsresistansen erhållas som den resulterande simulerade resistansen. Strålningsresistansen ökade från $0,23 \Omega$ för ett element till närmre 10Ω för nio element.

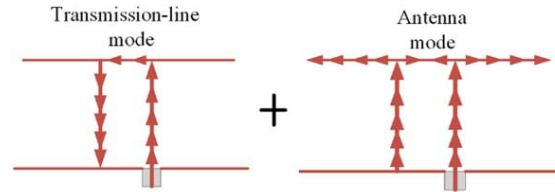


Figur 16: Konfiguration med par av vertikala element med 180 grader fasskiftare i toppen på antennen av Rao och Sarabandi [13]. I botten av den röda ledaren matas energi in. Övriga par är parasitiska. © 2018 IEEE.

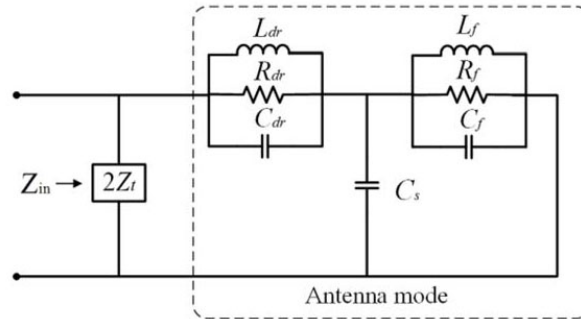
Yang et al. simulerade en antenn med två parallella element [14]. Antennens resonansfrekvens var 500 MHz och antennens höjd var 20 mm vilket är $1/300$ våglängd. Ett inmatande element och ett inkopplat efter ett 180 grader fasskiftsnät som skissen i Figur 17 visar. De beskriver att antennen har två funktionssätt: transmissionsledarfunktion och antennfunktion. Figur 18 visar hur strömmarna går i de olika funktionssätten. En ekvivalent modell av antennen vid antennfunktion togs fram av Yang et al. vilken visas i Figur 19. Impedansen för kretsmodellen visas tillsammans med impedansen från fullvågssimuleringar i Figur 20. De två impedanserna stämde bra överens med varandra.



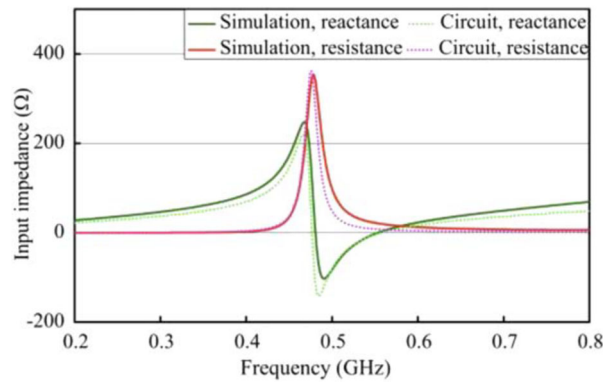
Figur 17: Antenn med två parallella element av Yang et al. [14]. © 2017 Wiley Periodicals, Inc.



Figur 18: Antennen hade två olika funktionssätt beroende på vilken frekvens den matades med [14].
© 2017 Wiley Periodicals, Inc.



Figur 19: En modell med kretselement togs fram. Den består av en spole i serie med matningen samt en spole och en kapacitans parallellt som last efter spolen på matningen [14]. © 2017 Wiley Periodicals, Inc.



Figur 20: Impedans från fullvågssimuleringar tillsammans med impedansen från den ekvivalenta kretsmodellen [14]. © 2017 Wiley Periodicals, Inc.

Best studerade egenskaperna hos elektriskt små antenner med multipla element uppbyggda av trådar [15]. I arbetet gjordes simuleringar med EZNEC [16]. För antennerna varierades dess höjd, storlek (volym som de tar upp), geometri och antalet element. Best fann att för olika antenner med olika geometri men med samma höjd och som tar upp samma volym så var

verkningsgraden densamma. Verkningsgraden bestäms då av höjden samt av hur stor yta som antennen är utspridd på.

I litteraturen anges att strålningsresistansen för en antenn med flera element är proportionell mot N^2 , där N är antalet element antennen består av. Polivka och Vrba tog fram ett analytiskt uttryck för hur avståndet mellan elementen påverkar exponenten i uttrycket för strålningsresistansen [17]. De fann att exponenten minskade från 1,97 för ett inbördes avstånd av $1/20$ våglängd till 1,77 för avståndet $1/5$ våglängd, med $N = \{2, 3, 4\}$. Att strålningsresistansen ökar med ökat antal element bygger på att fälten mellan de olika elementen kopplar till varandra så att en ömsesidig resistans uppstår. På så vis förklaras att när avståndet ökas så minskas denna koppling och exponenten i uttrycket för strålningsresistansen minskar med ökat avstånd.

Det beskrivs i de studier som sammanfattats ovan att de multipla antennerna gav högre verkningsgrad än en enskild monopolantenn, men vad som ligger till grund för verkningsgradsökningen tas inte upp. Därför utreds det vidare i detta arbete med att simulera antennen i Grimeton.

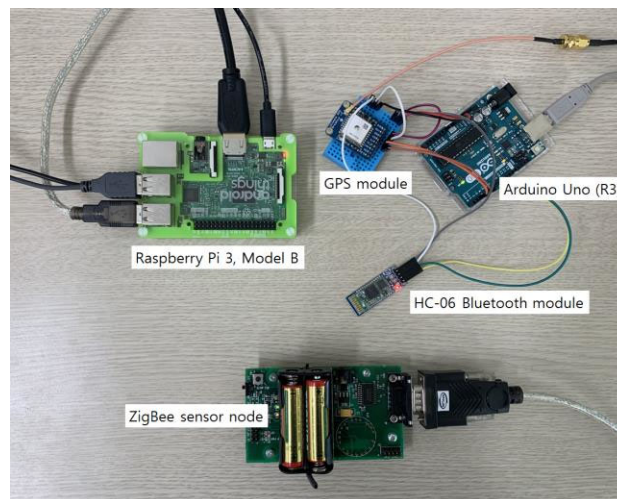
2.8 Tidigare arbeten för tidssynkroniserade mätsystem

Ett sensornätverk består av flera sensornoder som har till uppgift att övervaka och registrera det fysiska förhållandet i omgivningen. Sensornoderna har ett centralt läge där information om omgivningen lagras och skickas vidare till nästa nod, tills att den når mottagaren av informationen. Sensornätverk används i många områden som bl.a. maskinanläggningar för övervakning, medicin och hälsovård, logistik. Det grundläggande anledningen av användningen av sensornätverk är händelsedetektering, periodisk mätning och spårning och insamling av data. För att kunna åtgärda fel i tillämpningar som använder sig av sensornätverk är det viktigt att veta när en händelse inträffat. I ett projekt gör Soyoung Hwang en studie av en tillämpning av nätverks klock-modell på ett heterogent sensornätverk [18]. Vid applicering av sensornätverket övervägs tre standard sensornätverks prototyp plattformar; Arduino som är en elektronisk prototypplattform med en öppen källkod och som är enkel att använda för att bygga elektroniska objekt. Raspberry Pi som är en serie av små enkortsdatorer som tillsammans fungerar som en enkel dator. ZigBee som är ett protokoll för att koppla samman smarta enheter.

Soyoung Hwang använder här satellitnavigeringssystemet GPS som referensklocka för att få aktuell standardtid till Arduinon. GPS:en tillhandahåller främst två tjänster, Precise Positioning Service (PPS) och Standard Positioning System (SPS). Tjänsterna har navigeringssignaler som gör det möjligt att bestämma position, hastighet och UTC-tid.

Arduinon distribuerar aktuella standardtiden i sin tur till Raspberry Pi via Bluetooth i format av systemtiden i Raspberry Pi. Raspberry Pi har ett Linux-baserat operativsystem med egen systemtid och programmeringsgränssnitt (API) för systemtid. Raspberry Pi håller standardtiden med sin egen systemtid. Raspberry Pi distribuerar vidare standardtiden till ZigBee via seriell kommunikation.

Systemet är uppkopplad på följande sätt:



Figur 21. Enheter som används i experimentet [18]. © 2019 Journal of Communications.

För att verifiera att system fungerar rätt i tid skickar Arduinon GPS-tiden med sin systemtid som en sekunders markör varannan sekund. Raspberry Pi skriver i sin tur ut sin systemtid och Arduinons systemtid, som tas emot via Bluetooth i terminalen varannan sekund.

Raspberry Pi uppdaterar här sin egen systemtid till aktuell standardtid. ZigBee sänder sin systemtid och Raspberry Pi systemtid, som tas emot via seriell kommunikation till Raspberry Pi terminal varannan sekund [18].

Pardo-Zamora et al. utvecklade ett system för att mäta spänningar och strömmar i elnätet för att undersöka störningar på elnätet och hur de förflyttar sig mellan olika delar av eldistributionssystemet [19]. Där behövdes precis som här mobila enheter som kunde placeras ut på olika geografiska platser i elnätet och spara tidsstämplade data som senare kunde synkroniseras för att finna hur störningen såg ut vid olika platser och hur snabbt den förflyttade sig. Där användes PPS-utgången från en GPS-mottagare för tidsstämplingen. En FPGA användes för att hantera mätdata.

Koo et al. utvecklade ett tidssynkroniserat mätsystem med en GPS-modul och Arduino Mega [20]. Detta arbete genomfördes för att utveckla ett system för att kunna genomföra mätningar trådlöst, ute på fält. För att få ett synkroniserat system användes PPS-utgången från GPS-modulen, som genererar en positiv flank vid början av varje UTC-sekund.

3 Teori

3.1 Teoretisk bakgrund till ett mätsystem

Mätsystemet är tänkt att användas för att mäta olika spänningsnivåer, fasskillnaden i olika delar av antennen och kunna återskapa en signal.

Uppbyggnaden av systemet måste vara anpassad för att kunna användas ute på ett fält där störningar kan förekomma som kan påverka mätresultatet. Detta kan bland annat göras med korta ledningar mellan enheterna.

För att bygga ett tidssynkroniserat mätsystem behövs flera komponenter.

- Det behövs en eller flera enheter som kan programmeras för att utföra önskad arbete.
- Komma åt den aktuella tiden.
- Programmeringsverktyg och programmeringsspråk för att kunna programmera enheter.
- Ett sätt att omvandla spänningssignaler till läsbar data.
- Kommunikationsgränssnitt för att möjliggöra kommunikation mellan enheter.
- En lagringsenhet.

3.1.1 Hårdvara

Mikrokontroller

En mikrokontroller är en IC-krets som består av alla komponenter nödvändiga för ett datorsystem; processor, arbetsminnet (RAM) och programminnet (ROM), systembuss och klocka som sammankopplar de interna komponenterna, I/O portar. Mikrokontroller används främst i inbyggda system för att styra och samverka med andra elektroniska enheter [21]. Oberoende av vilken modell av mikrokontroller som används, så måste den programmeras för att kunna styra andra enheter. Utvecklingskortet har en programmerings-port som enkelt med USB kan överföra koden från datorn till mikrokontrollern.

Utvecklingskort

Raspberry Pi och Arduino Due är olika typer av utvecklingskort. Raspberry Pi är ett utvecklingskort som utvecklades av Raspberry Pi Foundation, men är i storlek mycket mindre. Den här enheten kan som alla datorer köra flera program samtidigt. Den har en integrerad minneskortläsare som använder ett

minneskort i stället för en hårddisk. Den har en 700 MHz mikroprocessor med ARM-arkitektur och stödjer kommunikationsgränssnitten SPI, I²C och UART som beskrivs mer utförligt under rubriken ”Gränssnitt”.

Fördelen med Raspberry Pi för detta system är att den kan programmeras med olika programmeringsspråk, har en processorhastighet som är mycket snabbare än Arduinos och har mycket mer minne.

Arduino till skillnad från Raspberry Pi är inte en hel dator, utan en mikrokontroller. Enheten kör inte ett helt operativsystem, den fokuserar endast på en uppgift som är sketchen som användaren överför till Arduinon. En Arduino UNO har en 8-bitars AVR-mikrokontroller, en processhastighet på 16 MHz och som Raspberry Pi stödjer SPI, I²C och UART.

Fördelen med Arduinon för detta system är att den har en inbyggd ADC och kan användas för realtidsapplikationer [22].

För att kunna använda fristående utvecklingskort ute på öppna fält, där det inte finns möjlighet för vägguttag för strömförsörjning, är det möjligt att använda sig av ett batteri kopplat till DC-kontakten på utvecklingskortet.

Analog till Digital omvandlare (ADC)

I mikrokontrollern Arduino finns en inbyggd ADC. ADC:n omvandlar den inkommande analoga signalen, i form av en spänning, till ett digitalt nummer mellan 0–1023, för att göra det läsbart och hanterbart för mikrokontrollern.

3.1.2 Kommunikationsgränssnitt

Det finns många olika kommunikationsgränssnitt som har framkommit och utvecklats med tiden i syfte att upprätta kommunikation mellan mikrokontroller och periferienheter. Gränssnitt är uppdelat i två huvuddelar, parallella och seriella.

Det parallella gränssnittet skickar flera bitar samtidigt vid överföring av data. Fördelen med detta är att fler bitar kan överföras med samma hastighet samtidigt som en bit skickas på ett seriellt gränssnitt. Nackdelen är att det parallella gränssnittet kräver fler ledare mellan mikrokontroller och periferienheter, vilket kan medföra större chans till förlust av data. Parallell överföring används främst inuti datorer för att den typen av dataöverföring är bäst lämpad för dataöverföring inom mycket korta sträckor. I detta projekt kommer fokuset vara på den seriella kommunikation som är säkrare och bättre lämpade ute på fält.

Den seriella kommunikationen som skickar en bit i taget är uppdelad i synkron och asynkron överföring. Synkron överföring har en separat ledare som genererar klocksignal från master enheten till slavenheterna för att hålla

dem synkroniserade i tid. Asynkron överföring kräver att slavenheten återskapar klocksignalen från masterenheten för att fungera synkade, detta brukar göras med start- och stoppbitar för varje paket som ska överföras.

Serial Peripheral Interface (SPI)

SPI är ett synkront kommunikationsgränssnitt som används för att upprätta kommunikation mellan MCU och periferienheter i serielläge. SPI-gränssnittet arbetar i full duplex där data kan skickas och tas emot samtidigt från båda enheterna. SPI gränssnittet kan endast ha en masterenhet, kopplad till flera slavenheter och gränssnittet har 4 populära ledare som används: Serial Clock (SCLK), Master Out Slave In (MOSI), Master In Slave Out (MISO) och Slave Select (SS). SPI gränssnittet används främst i system där hastighet och uppdatering spelar stor roll som i exempelvis SD-kort.

Inter-Integrated Circuit (I²C)

I²C är ett annat seriellt synkront kommunikationsgränssnitt men arbetar bara med två ledare, en för att överföra data (SDA) och en för att skicka klocksignal (SCL). I²C arbetar i halv duplex och är gynnsamt när flera enheter arbetar tillsammans. I²C kan koppla ihop upp till 127 enheter på samma buss. Dataöverföring sker genom samma ledare, vilket gör att masterenheten måste adressera slavenhet innan data skickas eller tas emot. Detta medför att hastigheten vid överföring av data är lägre än andra gränssnitt. I²C-gränssnittet används främst i system där flera enheter ska kopplas samman som exempelvis vid kommunikation med sensorer [23].

Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (UART)

Asynkron seriell kommunikation implementeras vanligtvis av UART protokollet. UART arbetar i full duplex med hjälp av två ledare, TXD som är den sändande ledare och RXD är den mottagande ledaren av UART:en. Storleken på datan som sänds är begränsad till 9 bit. Till följd av att UART är ett asynkront seriellt överföringsprotokoll saknar den en klocka och arbetar i stället med att överföra start- och stoppbitar som representerar början och slutet av ett meddelande. Överföringshastigheten på båda UART måste ligga inom 10% av varandra för att förhindra förlust av data [24].

Universal Serial Bus (USB)

USB är ett annat snabbt seriellt kommunikationsgränssnitt. Gränssnittet används för både datakommunikation och för strömförsörjning. Det mest vanliga användningsområdet för USB är för att överföra information mellan

olika enheter som bl.a. mellan en dator och en datormus, tangentbord och en annan mikrokontroller. USB kräver endast en port per enhet, men kan utökas med en USB-hubb som gör att flera enheter kan kopplas till en enhet.

Det finns både för- och nackdelar till vilket gränssnitt som borde användas beroende på projekt som ska utföras. SPI och I²C kan koppla samman flera enheter och UART kan endast koppla samman två enheter. SPI överför data med högre hastighet än I²C och UART.

USB är det snabbaste kommunikationsanslutningen, USB använder differentiell signalering som har högre tolerans mot brus än SPI och I²C som är single ended-signalering. UART kräver inte lika många ledare för att upprätta kommunikation som I²C (2 ledare) och SPI (4 ledare). I²C kan till skillnad från SPI anslutas till flera masterenheter.

3.1.3 Programmeringsmiljöer

Programmeringsverktyg

Arduino IDE är en utvecklingsplattform designad av Arduino.cc. Det är en öppen programvara som är gratis och enkel att använda med sina verktyg som förenklar processen. Programvaran används främst för att skriva, kompilera och ladda upp kod till Arduino-moduler. Programspråket som används i detta verktyg är C och C++. Koden som skrivs i Arduino IDE genererar en HEX-fil som laddas upp i Arduino-modulens mikrokontroller (styrenhet).

Thonny är en Python IDE som är förinstallerad på operativsystemet Raspberry Pi OS, för Raspberry Pi. Operativsystemet är väldigt enkelt att använda och är av den anledning ett bra alternativ för enklare uppgifter, som exempelvis att skriva data till filer.

Programmeringsspråk

C är ett av de äldsta generella programmeringsspråken genom tiderna, som utvecklades för att konstruera operativsystemet Unix. Språket har många användbara bibliotek och inbyggda operationer med olika funktioner. Det är ett kraftfullt programmeringsspråk som har många fördelar. Programspråket är väldigt snabbt och flexibelt, vilken programkod som helst skriven i C kan köras på vilken enhet som helst som stödjer C, utan att behöva justeras. C är ett kompilerat språk vilket gör den väldigt effektiv. De flesta programmeringsplattformar erbjuder C-kompilator, som i detta projekt Arduino IDE.

Python är ett av de populäraste programmeringsspråken på senare tid, på grund av mängden funktioner språket erbjuder. Språket har en enkel syntax,

är läsbar och tillämpad inom många områden som bland annat Software engineering, data science och machine learning. Python är till skillnad från C ett interpreterande språk.

3.1.4 Samplingshastighet och lagringsenheter

För att kunna komma åt datan som Arduinon skickar ut i efterhand behövs någon form av datalogging. Eftersom mätningarna görs ute på ett stort fält med fri sikt, valdes alternativet att använda en vanlig PC bort. En vanlig PC hade krävt kilometerlånga kablar uppkopplade till varje torn. Alternativen för lagring av data för detta projekt är att tillkoppla ett SD kort på Arduinon som kommunicerar med SPI gränssnittet eller att koppla upp en Raspberry Pi som läser in outputs från Arduinon och lagrar datan i filer på SD-kortet som sitter i Raspberry Pi via USB.

För att garantera att vår data kan återskapa signalen som mäts, så behöver samplingshastigheten vara minst mer än dubbla av den ursprungliga signalen enligt Nyquist samplingsteorem. Dvs minst mer än $17\,200 \cdot 2 = 34\,400$ samplingar per sekund.

3.1.5 Olika sätt att synkronisera tiden

Real Time Clock (RTC) kan användas om de synkroniseras vid ett tillfälle och sedan förväntas hålla tiden så noggrant att de förblir i fas.

Network Time Protocol (NTP) som är ett protokoll för att synkronisera klockor i ett nätverk. Trådlösa noder anslutna via WI-FI kan använda NTP för att synkronisera sina klockor med varandra. Precision Time Protocol (PTP) är ett liknande protokoll för att synkronisera klockor i ett nätverk. Skillnaden är att PTP håller högre noggrannhet.

En fördel med satellitnavigeringssystemet GPS är att noggrann tid kan erhållas från en GPS-mottagare. Mottagaren synkroniserar sin klocka med atomur uppe i satelliter. GPS kan användas som källa till tiden i ett NTP- eller PTP-nätverk.

Pulse Per Second (PPS) är en av de enklaste formerna av synkronisering protokollen. PPS är en signal som genererar en logisk hög nivå en gång per sekund. Normalt är pulsbredden på 100 ms. Eftersom den absoluta tiden inte kan indikeras av PPS-signalen, kan enheten konfigureras för att använda antingen manuell starttid eller dess aktuella starttid och använda PPS-signalen endast för att korrigera frekvensen.

konfigurera med manuell starttid innebär att enheten använder den första pulsen som tas emot på PPS-ingången som den konfigurerade starttiden. Resterande pulser räknas med en sekunds mellanrum från den föregående

pulsen. PPS kan användas för alla system som ska synkroniseras och konfigureras manuellt med samma starttid.

Konfigurering med dess aktuella starttid innebär att första pulsen är lika med enhetens aktuella tid och resterande pulser räknas med en sekunds mellanrum från den föregående pulsen.

I fallet med GPS som enhet, är den stigande kanten på PPS-signalen lika med början av UTC-sekunden given från GPS:en.

När PPS används som tidsreferens är det viktigt att enheten som matar ut PPS-signalen ger en stabil och konsekvent signal på 1 Hz [25].

3.2 Elektromagnetisk modellering

Vid utveckling och forskning inom elektroteknik, till exempel vid konstruktion av antenner är det viktigt att förstå hur de elektromagnetiska fälten samverkar med antennens förväntade omgivning. Fälten består av ett elektriskt fält (\mathbf{E}) och ett magnetiskt fält (\mathbf{H}). Materialen beskrivs av dess permittivitet (ϵ), permeabilitet (μ) och konduktivitet (σ). I materia (till skillnad från vakuum) kan också finnas en strömtäthet (\mathbf{J}) och en laddningstäthet (ρ). Sambanden ges av Maxwells ekvationer:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mathbf{J}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0$$

Med datorbaserade program kan elektromagnetisk modellering göras numeriskt genom att omgivningen delas upp i flera små element i vilka Maxwells ekvationer löses för att bestämma fälten i omgivningen. Det finns olika metoder för att göra denna uppdelning och beräkning som är lämpliga för olika ändamål. Exempel är Method of moments (MoM), Finite element method (FEM), Finite-difference time-domain (FDTD), Partial element equivalent circuit method (PEEC), Eigenmode expansion (EME) och Physical optics (PO). De tre grundläggande numeriska metoderna är MoM, FEM och FDTD [26]. Med gränsvillkor (boundary conditions) för volymen ihop med någon form av excitering kan då de olika integralekvationerna eller differentialekvationerna, beroende på metod, få ett numeriskt värde i varje punkt så att fälten för hela geometrin kan bestämmas. Det finns olika datorprogramvaror för elektromagnetisk modellering, vilka använder en av de ovan nämnda metoderna eller en kombination av flera. I detta arbete används Ansys HFSS vilken framför allt arbetar med FEM. Ingen mer

ingående beskrivning av de olika metoderna eller programvarorna för elektromagnetisk modellering ges i detta arbete.

3.3 Ansys

Ansys är ett företag grundat 1970 i USA som utvecklar programvara för modellering och simulering inom olika fysikaliska områden. Ansys Electronics Desktop är en datormjukvara som innehåller olika simuleringsverktyg för olika simuleringar: elektromagnetiska, termiska, elektromekaniska och simuleringar för signalintegritet. En av dessa är Ansys HFSS som används för elektromagnetiska simuleringar i frekvensdomänen [27]. Det finns fler simuleringsmjukvaror på marknaden än Ansys. Detta projekt blev sponsrat med en licens för Ansys Electronics Desktop, vilket därmed blev den mjukvara som användes.

3.3.1 Ansys HFSS

HFSS används för att beräkna de elektriska och magnetiska fälten omkring en tredimensionell modell av en elektrisk struktur. HFSS använder finita elementmetoden (FEM).

Modellen som ska simuleras förses med någon typ av excitering. Där matas energi in i modellen. Det kan vara en eller flera portar med en viss impedans som för en nätverksanalysator, men kan också vara en viss ström eller spänning. När portar används beräknar HFSS portarnas S-parametrar.

Processen i HFSS för att beräkna fälten är att modellen delas upp i flera finita element till ett "mesh". För varje element som vanligtvis är en tetraeder löses Maxwells ekvationer i ett variabelt antal punkter på tetraedern. På så vis kan de elektromagnetiska fälten beräknas. Antalet punkter styrs av val mellan Zero, First och Mixed order. Zero order löser bara fälten i en punkt i varje hörn av tetraedern. First order beräknar även fälten i en punkt mitt på varje kant.

Först skapas ett initieellt mesh. Därefter genomgår det en loop med flera pass av förfining av mesh. S-parametrarna beräknas för varje pass. Ett konvergenskriterium ställs in för när förfiningen ska avslutas. Det går ställa in minsta och största antal förfiningar. När konvergenskriteriet och minsta antal pass uppnåtts eller när max pass uppnåtts så avslutas förfiningen.

Resultatet från HFSS är parametrar för porten (S-, Y-, eller Z- m.fl. parametrar) samt fälten i varje punkt, exempelvis E-, H-fält eller strömtäthet J . Fälten representeras av ett tredimensionellt rum med komplexa tal. Fältnas fas i förhållande till den inmatade vågen, spänningen eller strömmen representeras med komplexa metoden.

Om modellens egenskaper vid olika frekvenser önskas studeras kan ett frekvenssvep därefter lösas. Då används samma mesh för alla frekvenser. Det kan vara interpolerande svep där ett fåtal frekvenser lösas och en kurva för S-

parametrar eller andra parametrar beräknas från de lösta frekvenserna. Ett diskret svep kan användas för att spara och möjliggöra plottning av fält för samtliga frekvenser som svepet innehåller.

Exciteringens storlek kan ändras efter att fälten bestämts. För en port kan t.ex. portens effekt ställas till 100 kW eller för en spänning kan spänningen ändras till 1 000 V. Med verktyget Fields Calculator kan olika beräkningar göras på de fält som genererats. Det kan vara t.ex. att integrera E-fältet längs en linje för att ta reda på spänningen mellan linjens ändar.

Olika metoder finns för att beräkna de matrisekvationer som uppkommer för att lösa Maxwells ekvationer. Antingen direkt lösningsmetod som beräknar en invers matris eller iterativ lösning som innebär att en lösning provas fram.

En strålningsgräns (Radiation Boundary) behövs för att HFSS ska kunna beräkna den utstrålade effekten. Gränsen behöver vara minst en kvarts våglängd bort från modellens strålande delar [28].

4 Metod

Parallellt med att utföra de elektromagnetiska simuleringarna av antennen har i projektet utvecklats ett system för att mäta strömmarna i antennens sex nedladare. Avsnitt 4.1 - 4.3 förklarar hur simuleringsarbetet gått till och 4.4 - 4.6 förklarar uppbyggandet av mätsystemet. Antennens impedans har mätts upp och metoden för mätningen redogörs för i avsnitt 4.7.

4.1 Skapande av 3D-modellen i Ansys HFSS

Metoden vid framtagandet av modellen av antennen i Ansys Electronics Desktop har varit att börja med en mycket förenklad modell och förfinas den till att mer och mer efterlikna hur den verkliga antennen är utformad.

4.1.1 Den valda modellen

Antennen må vara liten elektriskt sett, men består av många små trådar och ledningar som är svåra att hantera av simuleringsmjukvaran. Ju mer verklighetsbaserad modellen gjordes desto mer resurser krävdes för att simulera, i form av minne och tid. Hur väl modellen skulle stämma med verkligheten fick avvägas mot hur avancerad modellen skulle vara för simuleringsprogrammet att beräkna.

Den modell som användes för att ge resultaten i denna rapport består av följande förenklingar jämfört med den riktiga antennen.

Plattor för toppnät och jordnät

Jordnätets många trådar och toppnätets linor var svåra för simuleringsverktyget att hantera. I stället modellerades näten med plattor med en viss inställd konduktivitet. Konduktiviteten sänktes tills rimliga förluster och en rimlig bandbredd uppnåts. Värdet är 1×10^7 S/m.

Plattan för jordnätet har dimensionerna $500 \text{ m} \times 2320 \text{ m}$ och för toppnätet $50 \text{ m} \times 1920 \text{ m}$. Toppnätet är beläget 100 m över jordnätet och 200 m från kanten mot stationshuset.

Ingen jord omkring jordnätet

Den platta som motsvarar jordnätet omges av vakuum i modellen. Strömmar kan därför inte gå utanför den yta som tas upp av jordnätet. Det innebär också att inga dielektriska förluster uppstår i jorden. Våglängden i jordnätet är då i modellen våglängden i vakuum och inte våglängden hos ledningar som omges av jord som dielektrikum.

Spolar

Spolarna modelleras som en platta i Ansys som ges ett värde på induktans och resistans i serie och en strömriktning. Induktansen är satt till 10 mH och resistansen $0,239 \Omega$.

Plattorna som utgör spolarna är en meter höga och monterade fyra meter upp från marken. Nedledaren är därmed 95 meter lång.

Spolarna, förutom spole 1, är placerade mitt där tornet står och inte några meter därifrån som i verkligheten. Det innebär att nedledaren går rakt ned och ansluter till spolen i stället för att den svänger något som i verkligheten.

Nedledare

Nedledare består i den riktiga antennen av sex stycken parallella trådar som fördelas till en cylindrisk form av cirkulära brickor med jämna mellanrum längs nedledaren. I simuleringsmodellen utgörs nedledarna av kopparledningar med 8-kantigt tvärsnitt med 2 cm diameter.

Första nedledaren utgörs i den verkliga antennen av att de åtta topplinorna går snett ned mot marken och ansluter till första spolen. I simuleringsmodellen utgörs nedledare 1 av en 16 meter bred platta. Den är smalare än toppnätet för att motsvara att de åtta linorna kapacitansmässigt inte kan approximeras med en platta med hela bredden när avståndet till jord blir mindre i förhållande till separationen mellan linorna.

Sista nedledaren i modellen är som de övriga fyra nedledare, 2 – 5, en ledning rakt ned till spolen. I verkligheten utgörs denna nedledare också av de åtta topplinorna som sträcker sig lutande ned mot marken.

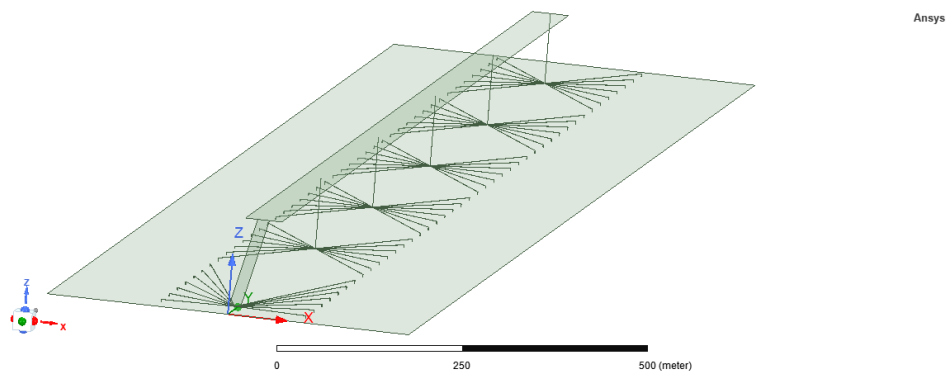
Inga torn

I simuleringsprogrammet krävs inga torn för att bära upp toppnätet. De har därmed prioriterats bort för att göra modellen mer simpel och lättare att simulera. Kapacitansen bör öka något med jordade torn.

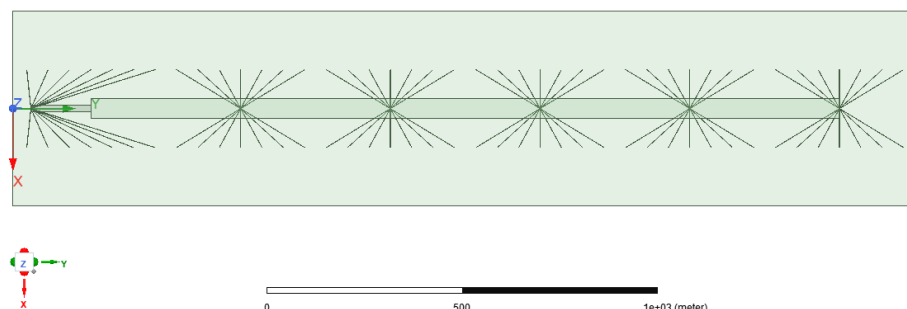
Balansnätet

Balansnätet som ansluter spolens nedre ände till jordnätet består i verkligheten av 6 mm koppartråd som bärs upp av trästolpar. I simuleringsmodellen består balansnätet av 0,5 m breda remsor 4 m ovanför jordplanet. Remsorna ansluter spolens nedre ände till jordnätet i sju punkter på vardera sida, 100 m ut från mastlinjen, precis som balansnätet gör i den riktiga antennen.

Modellen visas i Figur 22 och Figur 23.



Figur 22: Modellen av antennen i Ansys



Figur 23: Modellen av antennen i Ansys sedd rakt upifrån

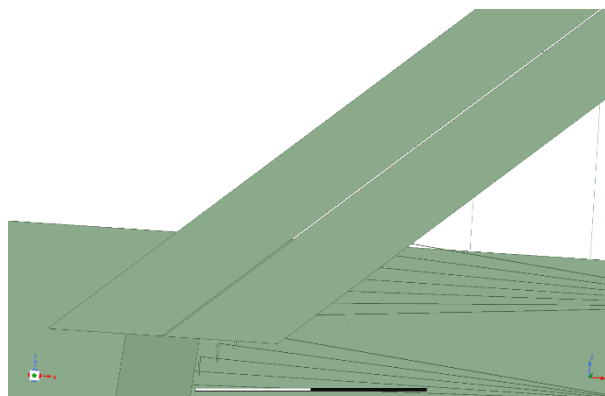
4.1.2 Olika varianter av antennenmodellen

På den i 4.1.1 beskrivna valda modellen gjordes ändringar för att skapa olika varianter av denna modell och studera hur ändringen påverkade antennens funktion. De olika varianterna, modell A – J redogörs för i Tabell 2.

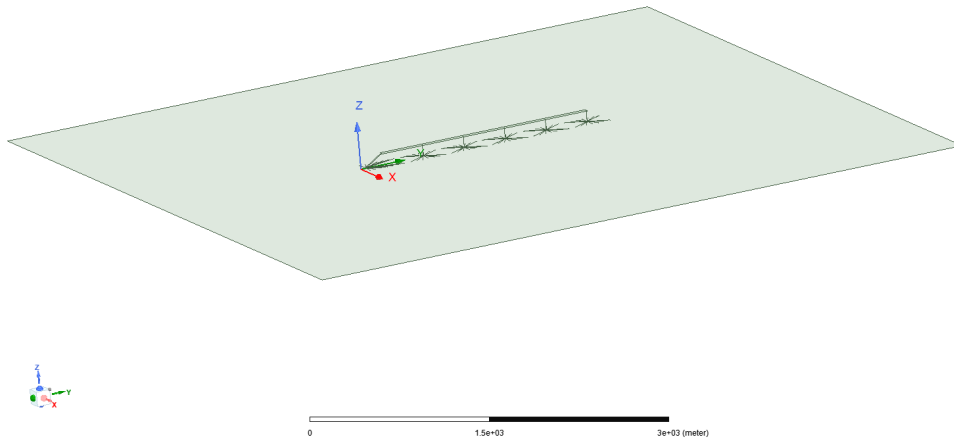
Tabell 2: De olika modeller som simulerades i HFSS.

Modell	Förändring
A. Initial modell	Utan förändring. Den modell som beskrivits i 4.1.1.
B. Delat toppnät	Plattan som toppnätet består av separerades i två halvor (Figur 24) för att motsvara hur det är kopplat i den verkliga antennen enligt Figur 7.
C. Halverad konduktivitet hos toppnätet	För att studera hur antennens förlusteffekt är fördelad mellan toppnät och jordnät minskades ledningsförmågan i toppnätet medan jordnätet var oförändrat.
D. Halverad konduktivitet hos jordnätet	Med samma motivering som för modell C minskades ledningsförmågan i jordnätet och med ordinarie konduktivitet enligt modell A för toppnätet.

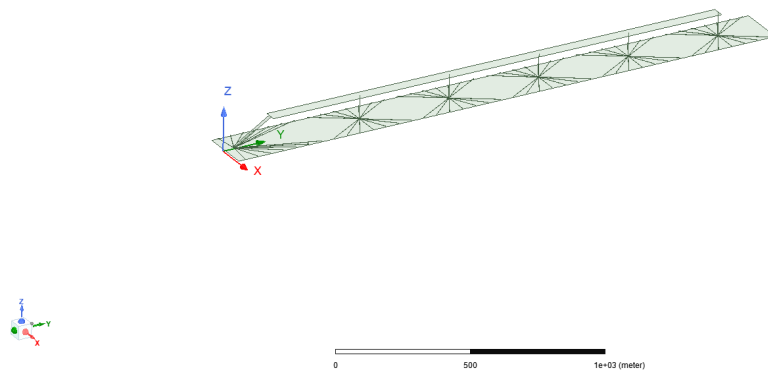
E. Halverad konduktivitet top- och jordnät	Både toppnät och jordnät har halverad ledningsförmåga mot modell A.
F. Korrekt resistans	Konduktiviteten har minskats ytterligare för att erhålla en resistans vid resonansfrekvensen som stämmer med den uppmätta.
G. Bredare jordplan	För att studera i hur stor utsträckning jordnätets/jordplanets utformning påverkar förlusteffekten gjordes det bredare än i modell A. Jordplanet utgjordes av en kvadrat, $6 \text{ km} \times 6 \text{ km}$ (Figur 25).
H. Smalare jordplan	Med samma motivering som för modell G skapades en variant med mindre jordplan med måtten $2320 \text{ m} \times 200,6 \text{ m}$ (Figur 26).
I. Spolar med olika induktans	Med inbördes olika induktans mellan spolarna ska strömmen vara olika i de olika spolarna enligt teorin. En spole som drar mer ström än de andra tar upp ett större område med strömmar i jordnätet på ett sätt som inte är optimalt för balansnätets utformning. I modell I har spole 4 induktansen 5 mH medan övriga har induktansen $12,5 \text{ mH}$.
J. Endast en radiator	Denna modell har endast radiator nummer 3 (Figur 27). Övriga spolar och nedledare har tagits bort. Induktansen är fortfarande 10 mH . Toppnätet har minskats till en sjättedel av längden. Multipelantennens förbättring av verkningsgraden kan jämföras med denna enkla monopolantenn.



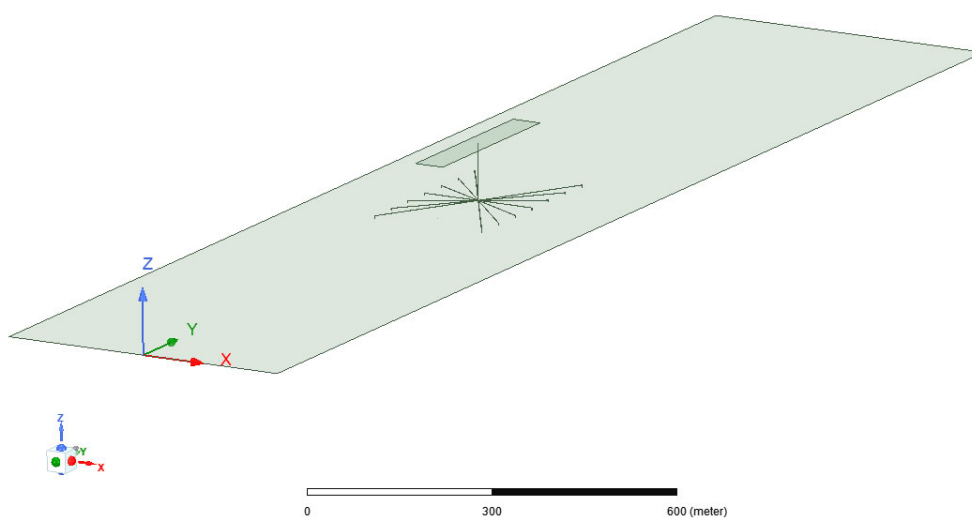
Figur 24: Toppnätet har i modell B delats i två halvor.



Figur 25: Modell med bredare jordplan (modell G). Här är jordplanet 6 000 meter brett i stället för 500 meter som i den valda modellen av antennen (modell A).



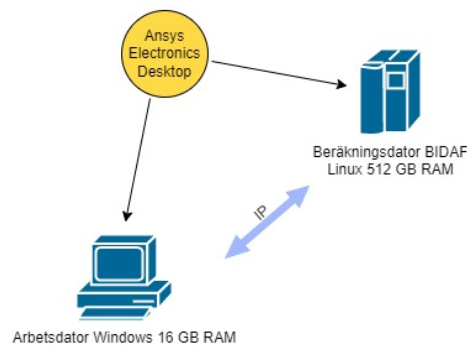
Figur 26: Modell med smalare jordplan (modell H). Här är jordplanet 200 meter brett i stället för 500 meter som i den valda modellen av antennen (modell A).



Figur 27: Modell J består av endast en radiator. Med denna modell kan jämföras hur verkningsgraden är för en enkel antenn jämfört med en multipelantenn.

4.2 Inställningar i Ansys HFSS

Versionen av Ansys Electronics Desktop som använts är version 2021 R2. Beräkningarna gjordes på en dator med mer kapacitet än datorn där användaren byggde upp modellen. Det illustreras av Figur 28. Den i arbetsdatorn skapade modellen skickas automatiskt via IP till beräkningsdatorn vid start av simulering. Resultaten skickas tillbaka till arbetsdatorn under simuleringen. Beräkningsdatorn (BIDAF) har 512 GB RAM-minne. Minnet begränsade så endast en processor kunde användas. Simuleringsverktyget i Ansys som använts var HFSS. Lösningstyp var HFSS med inställningar Network Analysis och Driven Modal. Lösningssolver för matrisekvationer i simuleringarna var Iterative Solver med 10^{-5} i relativt kvarstående fel. Som excitering i modellen användes Lumped Port med $50\ \Omega$ impedans.



Figur 28: Simuleringar distribuerade till BIDAF-datorn

4.3 Simuleringar och exportering av data

När modellen är skapad ska den simuleras och alla de resultat som önskas ska tas ut från Ansys.

4.3.1 Impedans och fält

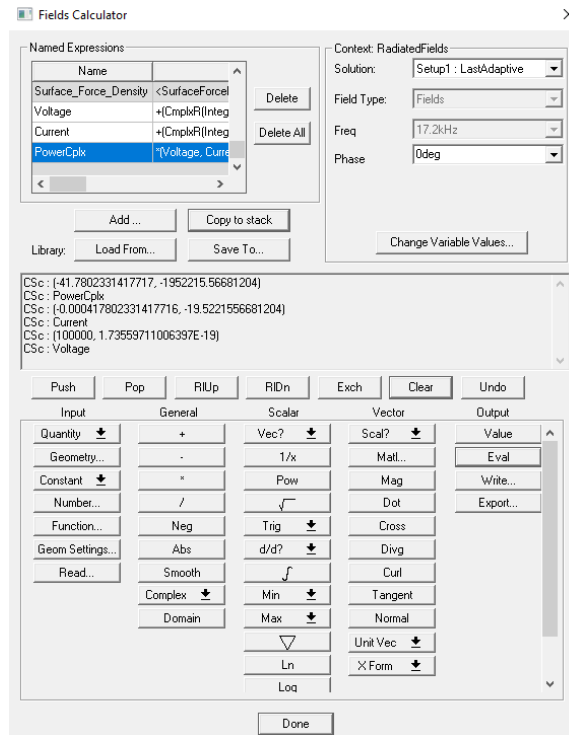
Ett resultat som önskades var antennens impedans. Med Lumped Port som excitering erhöles automatiskt portens impedans (Z-parametrar). När ett frekvenssvep simulerats kunde därför impedansen exporteras som data i en csv-fil och importeras och plottas i Matlab.

För att få data över fälten i antennen när den befann sig i resonans behövde först antennens resonansfrekvens hittas. I det interpolerande frekvenssvepet lokaliserades impedansens minimum och ett diskret frekvenssvep vid frekvenser i närheten av impedansminimumet löstes. De diskreta frekvenserna valdes med 0,005 kHz mellanrum och den frekvens av dessa med minst imaginärdel hos impedansen valdes som angiven resonansfrekvens för modellen.

Från lösningen vid resonansfrekvensen exporterades data över strömtäthet och E-fält. Exporteringen gjordes med Fields Calculator. Storheten valdes (J respektive E) och koordinaterna skrevs in för det område där fälten skulle exporteras. En fil med koordinater och komplex fältstyrka exporterades och fälten plottades i Matlab.

4.3.2 Spänningar och strömmar

För att ta reda på spänningens fasskillnad längs antennen och för att ta reda på hur stor strömmen är i olika punkter i toppnätet behöver spänningen respektive strömmen i de olika punkterna beräknas. Fields Calculator användes för att beräkna strömmar och spänningar från fälten. Användargränssnittet för Fields Calculator visas i Figur 29. Beräkning av spänning görs genom integrering av E-fältet och beräkning av ström görs genom integrering av J (strömtätheten). Till det behövs en linje att integrera längs i modellen i Ansys. Flera kopior i följd av en linje skapades genom att duplicera efter en vektor i Ansys. För spänningen mellan toppnät och jordnät skapades 960 vertikala linjer däremellan med två meters mellanrum och för strömmen i toppnätet skapades 192 tvärgående linjer mellan toppnätets långsidor med tio meters mellanrum. Fields Calculator behöver ett matematiskt uttryck för beräkning med varje linje. En textfil skapades med Matlab som innehöll alla uttryck med varje linjes namn. Uttrycken importerades i Fields Calculator. För att undvika att manuellt importera varje av de 960 uttrycken för spänningen skrevs ett Python-script med hjälp av Matlab som styrde Ansys att importera uttrycken. För att enkelt möjliggöra exportering av data för alla beräkningar valdes att först presentera beräkningarna i en plott i Ansys. Där behöver varje uttryck från Fields Calculator läggas till. Python-scriptet gjorde även detta. Från plottningen i Ansys exporterades data till en textfil som innehåller de komplexa talen som anger spänningen respektive strömmen till storlek och fas. Spänning och ström plottades i Matlab.



Figur 29: Användargränssnitt för Fields Calculator i Ansys.
Med Fields Calculator kan beräkningar göras på de
simulerade fälten. Exempelvis kan en spänning beräknas
genom att E-fältet integreras längs en linje.

4.3.3 Avgiven strålning

Strålningsverkningsgraden beräknades med hjälp av Infinite Sphere i Ansys. Då integreras Poyntings vektor över en sluten yta som omger modellen. Ytan ska vara ansatt som Radiation Boundary i Ansys. Radiation Boundary behöver vara en kvarts våglängd bort från strålande delar i antennen. För 17,2 kHz är det 4 350 meter. I den modell som simulerades fick detta avstånd vara lite för kort, 3 800 meter. Modellens storlek är i Ansys begränsad till maximalt 10 000 enheter. Om [meter] väljs som enhet så är maximal storlek 10 000 meter. Med en drygt 2 000 meter lång antenn kunde inte en mindre enhet användas utan att överskrida maximala storleken 10 000 enheter. Enheten kunde inte väljas större eftersom meshningen i Ansys inte stödde delar mindre än 0,001 enheter.

4.3.4 Strömfördelning i jordplanet

Hur strömmen i jordnätet avtog med avståndet från nedledaren vinkelrät mot antennens längd önskades simuleras. Till detta skapades en något annorlunda modell än för de andra simuleringarna. Jordplanet gjordes bredare. 3 kilometer brett i stället för 500 meter. Spolarna och de tidigare nedledarna togs bort och ersattes av en stående platta som sträckte sig mellan jordnät och toppnät i höjddled och längs hela toppnätet i längdled. Plattan valdes i Ansys som en spänningsexcitering som matar antennen med 17,2 kHz, 100 kV. Från jordnätets mittpunkt drogs en linje vinkelrät mot antennens längd och ut till

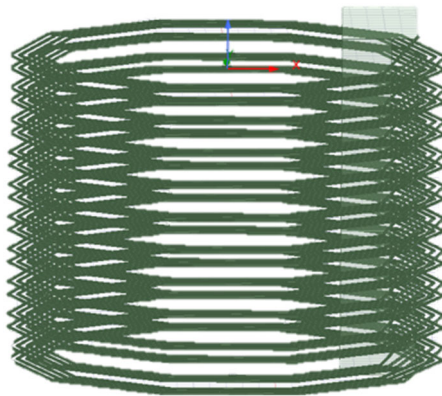
kanten på jordnätet 1,5 km från mittpunkten. Strömtätheten utefter linjen plottades i Ansys och data exporterades med Fields Calculator för att även plotta i Matlab.

4.3.5 Simulering av spolarna

Spolarna skulle simuleras av två anledningar. Dels för att ta reda på deras induktans, dels för att ta reda på hur stora magnetfält de skapar. Kraftiga tidsvarierande magnetfält misstänks kunna ha en negativ hälsopåverkan. Storleken på fälten i Grimeton kan vara bra att känna till för bedömning av hur nära arbetare och besökare kan vistas intill spolarna.

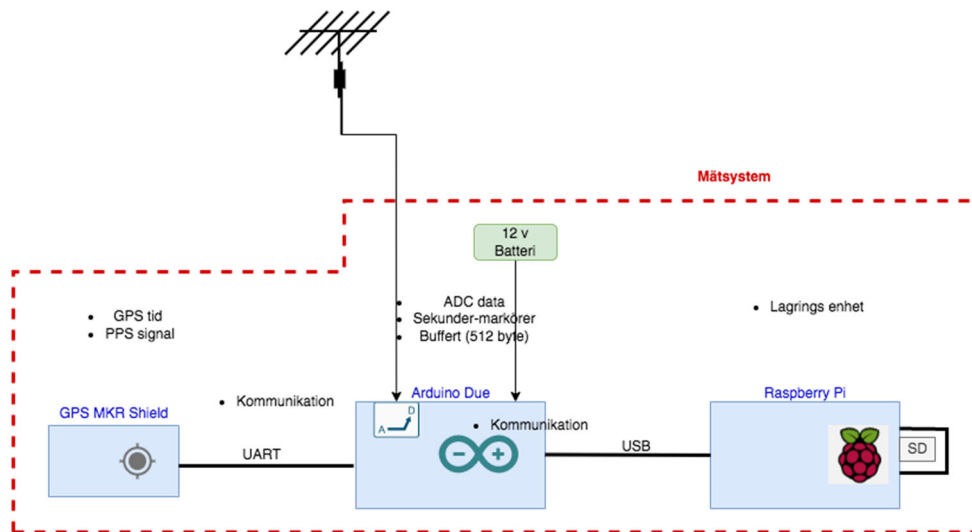
I Ansys skapades en modell av förlängningsspolarna enligt Figur 30. Den är 2,0 meter hög och 10-kantig med ytterdiameter 2,5 meter och består av 80 varv perfekt elektrisk ledare med ett 8-kantigt tvärsnitt med diametern 14 mm. Varven är lindade med fyra lager i varje plan så som spolarna är utformade. I Figur 6 visades en av radiostationens spolar. Spolen i Ansys matades med Lumped Port för att få ett värde på impedansen. Frekvensen var 17,2 kHz. Från impedansens imaginärdel, X , beräknades spolens induktans, L , enligt:

$$L = \frac{X}{2\pi f} = \frac{X}{2\pi \cdot 17200 \text{ Hz}}$$



Figur 30: Spole som simulerades i Ansys HFSS

4.4 Mätssystemuppbyggnad



Figur 31: uppbyggnaden av mätsystemet kopplad till antennen.

Figur 31 visar en översikt av uppbyggnaden av mätsystemet. Uppkopplingen sker med korta ledningar för att undvika störningar som kan induceras av fält. En Arduino som bär huvuddelen av programmet i systemet är kopplad till en GPS för att komma åt den nuvarande tiden och PPS signalen som GPS:en genererar. Arduinon har ett batteri och en tråd från antennen kopplad till sig för att kunna strömförsörjas samt ta in strömdata från antennen. En Raspberry Pi sitter kopplad till Arduinon och är systemets slutpunkt, Raspberry Pi sparar all inkommande data i en fil i det tillkopplade SD kortet. Mätssystemets uppbyggnad beskrivs mer noggrant med hjälp av tre huvudsakliga delar; (1) Koppla samman enheterna och installera program. (2) Programmera Arduinon och Raspberry Pi. (3) Utvärdera PPS-singaler för synkronisering.

Delarna förtydligas vidare nedan i följd.

4.4.1 Installationer

Operationssystemet Raspberry Pi OS installerades på Raspberry Pi eftersom det är ett av de vanligaste och utvecklade operativsystemet för Raspberry Pi. Operativsystemet är en uppsättning av grundläggande program och verktyg som gör att Raspberry Pi kan köras.

4.4.2 Programspråk för Arduino

Arduino enheten har till uppgift att läsa data från GPS:en, som skickas på UART porten, och att med sin befintliga ADC omvandla den analoga spänningen till ett digitalt värde mellan 0–1023. Datan skickas sedan ut till Raspberry Pi seriellt via en USB-kabel. Programmet valdes att skrivas i C, för att Arduino IDE stöder språket C.

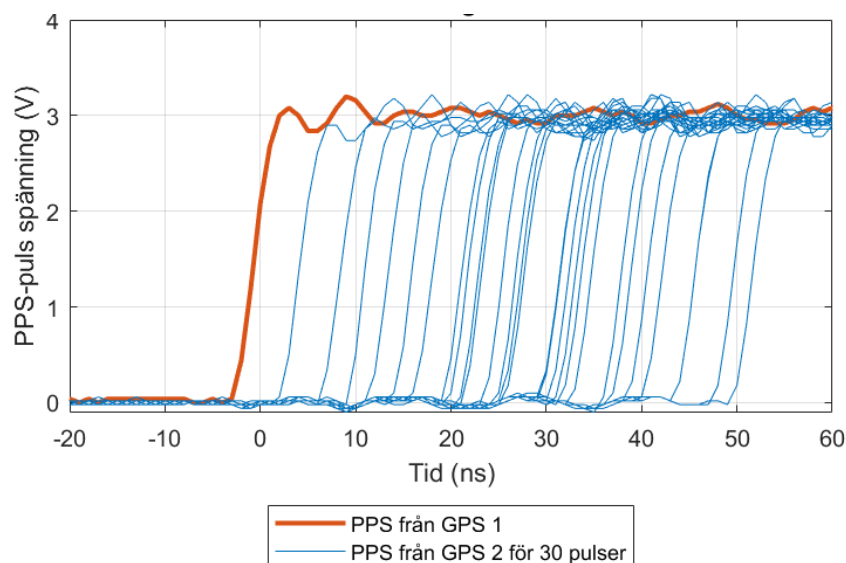
4.4.3 Programspråk för Raspberry Pi

Programmet på Raspberry Pi har till uppgift att läsa in all dataström input som skickas seriellt på USB-porten från Arduinon och att skapa en fil som är döpt till tiden första data sparats. Programmet på raspberry Pi är till för att logga data i en fil som i efterhand kan användas till att återskapa en signal. Programmet på Raspberry Pi är skriven på Thonny som är en Python IDE och därav skriven i Python.

4.5 Utvärdering av PPS-signal från GPS

Ett test gjordes för att säkerställa att PPS var ett fungerande alternativ för att synkronisera systemen i detta projekt.

Figur 32 visar PPS-signalen från två stycken GPS-mottagare ASX00017 Arduino MKR GPS shield med ublox-8 GPS. Tidsskillnaden mellan båda signalerna varierade inom några 10-tal nanosekunder. Den röda grafen representerar en signal från GPS 1 och används som en referens för att kunna se hur stor skillnaden kan vara från signalerna från GPS 2. I figuren kan vi se att det skiljer sig med ungefär 50 ns.



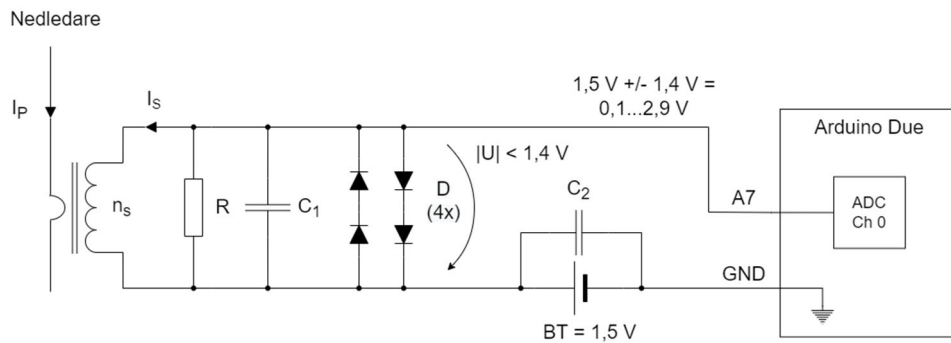
Figur 32: Felskillnaden mellan PPS signaler från två stycken GPS-mottagare ASX00017 Arduino MKR GPS shield med ublox-8 GPS.

4.6 kommunikation mellan enheter

4.6.1 Antennen och Arduinos ADC

De strömmkännande elementen som används för mätsystemet är strömtransformatorer. En strömtransformator avger en ström på sekundärsidan som är proportionell mot strömmen på primärsidan men mindre. Sekundärströmmen omvandlas till en spänning med lämpliga nivåer

för att skickas in på en av Arduinos analoga ingångar med hjälp av en krets enligt schemat i Figur 33, vilken förklaras nedan.



Figur 33: Schema över kopplingen mellan strömtransformatorns sekundärlindning och Arduinos analoga ingång. Kretsen består av en lastresistans för transformatorn samt lågpasfilter, klippkrets och DC-offset.

Komponentvärden

$$R = 1,0 \, \Omega$$

$$C_1 = C_2 = 1,0 \, \mu\text{F}$$

$$D = 1\text{N}4148$$

$$BT = 1,5 \, \text{V AA-batteri}$$

$$n_s = 100 \, \text{varv}$$

Kretsens uppbyggnad och funktion

Strömtransformatorn består av en toroidkärna med 100 varv koppartråd lindad runt kärnan vilket formar dess sekundärlindning. Kärnan träs på ledningen som leder strömmen från nedledaren. På så sätt får primärsidan ett lindningsvarv. Det ger ett förhållande 100:1 mellan primär- och sekundärström. Strömtransformatorn betraktas som en ideal strömkälla som driver ström genom R , C_1 (och vid höga strömmar genom D). Resistorn R har resistansen $1,0 \, \Omega$ vilket ger sekundärspänningen $1 \, \text{V}$ per $100 \, \text{A}$ primärström. C_1 formar tillsammans med R ett lågpasfilter för att filtrera bort eventuella högfrekventa störningar. Arduino Due tål maximalt en spänning $3,3 \, \text{V}$ på de analoga ingångarna. Spänningen får inte heller vara negativ [29]. Dioderna D används för att begränsa utspänningen från strömtransformatorn till ett intervall mellan plus och minus två diodframspänningsfall. Tillsammans med likspännings-komponenten av $1,5 \, \text{V}$ från batteri BT kommer spänningen mellan Arduinos analoga ingång och jord ($A7$ och GND) begränsas till ett intervall mellan $0,1 \, \text{V}$ och $2,9 \, \text{V}$. Det ger möjlighet att mäta AC-ström med ett toppvärde maximalt $140 \, \text{A}$ vilket motsvarar $100 \, \text{A}$ effektivvärde. $100 \, \text{A}$ anges som strömmen genom nedledarna då sändaren arbetar på full effekt, $200 \, \text{kW}$. $100 \, \text{A}$ anses därför som en rimlig maximal gräns som ger bra upplösning på mätvärdena. C_2 är en avkopplingskondensator för att säkerställa att ADC:ns samplingskapacitans laddas upp snabbt utan att

påverkas av batteriets interna resistans. Det är inte verifierat om C_2 verkligen är nödvändig eller om det skulle fungera lika bra utan. Ledningarnas induktans kanske har större reaktans än batteriets interna resistans och därav har större inverkan än resistansen.

Brytfrekvensen för det tidigare nämnda lågpassfiltret bestående av R och C_1 är

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC_1} = 159 \text{ kHz}$$

Vid 17,2 kHz är impedansen för C_1 parallellt med R 0,994 Ω vilket är mycket nära 1,0 Ω och inverkar därför inte på mätvärdet för strömmens amplitud. C_1 skapar en fasvridning av cirka 6 grader men denna fasvridning är lika för alla mätenheter. Med 1 % tolerans för R och 5 % tolerans för C_1 kan vinkeln för impedansen $R // X_C$ vara som minst -5,80 grader och som mest -6,54 grader. Det kan därmed skilja som mest 0,74 grader mellan olika mätenheter vilket kan vara acceptabelt.

4.6.2 GPS-modul och Arduino Due

En av uppgifterna för detta system är att ta reda på exakta tiden, detta görs med en GPS-modul, Arduino MKR GPS shield, som är baserad på u-blox SAM-M8Q GNSS. Modulen stöder både I²C och UART gränssnitten. UART gränssnittet valdes för kommunikationen mellan GPS-modulen och Arduinon, då I²C är mer gynnsamt för system där en master ska kommunicera med flera enheter och är långsammare än UART.

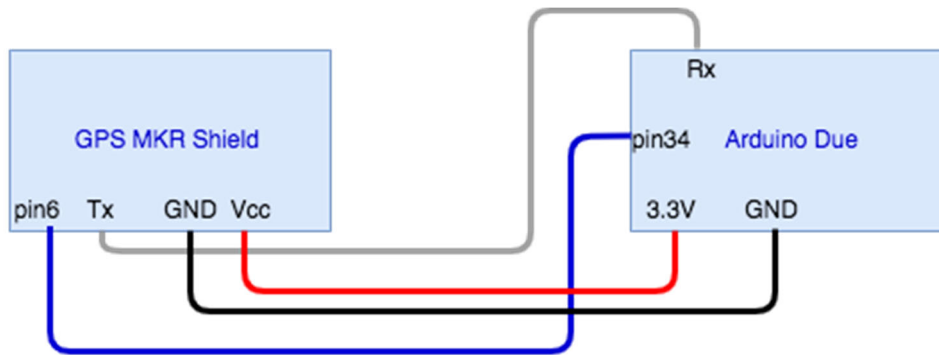
Figur 34 visar uppsättningen av UART kommunikationen mellan enheterna. Där Pin 6 på GPS:en är PPS-utgången och pin 34 på Arduinon är en digital ingång som ger ett interrupt i programmet på Arduinon varje gång den är hög.

Programmet fungerar på följande sätt:

GPS:en letar upp signalen från flera satelliter som anger information om den nuvarande positionen och tiden. Arduinoprogrammet checkar samtidigt i en loop flera gånger om GPS:en skickat någon information på UART:en.

När GPS tagit emot information från satelliterna ger den ut en output i standard NMEA-string format. En data-frame visas i Figur 35. Framen innehåller information om positionen, GPS-satelliter och tid. Den gulmarkerade delen anger tiden i UTC-tid.

Arduino programmet loopar igenom en byte i taget i framen och jämför med en byte åt gången i stringen "\$GNRMC,". När stringen är hittad sparas nästkommande 8 byte, "HHMMSS", som är representerar tiden och sparas i en ny string.



Figur 34: Uppsättning av UART kommunikation mellan GPS och Arduino due. Pin 6 på GPS MKR Shield är PPS-utgången.

```
$GNRMC,064018.00,V,,,,,220322,,,N*6B
$GNVTG,,,,,,N*2E
$GNGGA,064018.00,,,,,0,00,99.99,,,,,*73
$GNGSA,A,1,,,,,,99.99,99.99,99.99*2E
$GNGSA,A,1,,,,,,99.99,99.99,99.99*2E
$GPGSV,1,1,02,13,,11,17,,12*7C
$GLGSV,1,1,00*65
$GNGLL,,,,,064018.00,V,N*5F
```

Figur 35: En data-frame från GPS, som skickas ut på UART; en gång i sekunden. GPS-data innehåller UTC-tid. Ett av de tre fälten med tidsdata har markerats med gult.

4.6.3 Arduino Due och Raspberry Pi

Efter tester med båda metoderna för att lagra data på SD-kort, beskrivna i teoridelen, visade sig alternativet med Raspberry Pi vara mer lämpligt. Detta eftersom läsa, skriva och skapa filer på ett SD kort kräver en viss processtid. Att dela upp systemet i två delar, där Arduinon sköter datamätningarna som skickas ut på serieporten och Raspberry Pi sköter all input datalogging, snabbar upp systemet.

Det enklaste och snabbaste sättet att upprätta seriell kommunikation mellan en Arduino och Raspberry Pi är via USB. En utav Raspberry Pi:s fyra USB-portar kopplas till Arduinons programmerings port (porten sketchen laddas). All data från Arduinon som skickas ut på den seriella USB-porten tas emot av Raspberry Pi, som i sin tur skriver över datan till en fil som lagras på Raspberry Pi SD-kortet.

Programmet fungerar på följande sätt:

Arduino skickar ut den nuvarande stringen, med den nuvarande GPS tiden, kontinuerligt på serialUSB tills att Raspberry Pi svarar med en string,

“Recieved”, d.v.s. att GPS datan är mottagen. Här skapas samtidigt en fil namngiven efter första mottagna GPS tid.

När Arduinon tagit emot stringen “Recieved” sker en interrupt som börjar fylla på en 512 byte stor buffert med mätdata från ADC samt sekundersmarkörer från interruptet som skickar en byte string med 1:or , varje gång PPS pulsen slår hög. Varje gång bufferten fyllts på helt, skickas hela 512 byte paket ut till Raspberry Pi. Raspberry Pi programmet läser in 512 bytes åt gången, dvs all data från ett paket och skriver den rakt av i en fil på Raspberry Pi SD-kortet. Datat består av mätdata från ADC samt sekundersmarkörer.



Figur 36: Uppsättningen av seriella kommunikationen mellan Arduino Due och Raspberry Pi via USB-kabel.

Sampling

All inkommande data till ADC:n läggs till i en buffert på Arduinon kontinuerligt. Varje gång PPS signalen slår hög sker ett interuppt som lägger till en sekunders-markör i bufferten. Detta sker en gång i sekunden då PPS signalen endast slår hög i början av varje sekund. När bufferten fyllt med 512 byte skickas det ut på seriell porten ut till Raspberry Pi i form av paket som rakt av skrivs i en fil på SD-kortet.

Bufferten fortsätter fyllas på nytt och fortsätter på det viset tills programmet stängs av eller inte får någon data.

Datan som skriv i filen är inte helt human-readable, men kan plottas. För att garantera att vår data kan återskapa signalen som mätts så behövde samplingshastigheten vara minst 34 400 sampel per sekund. Mätssystemet samplar kring 400 000 sampel per sekund, efter manuell räkning med tidtagare. Storleken på varje mätning är två bytes vilket innebär att det lagras 800 000 bytes med data i sekunden. Bufferten på Arduinon kan hålla upp till 512 bytes innan den måste tömmas. Därav töms bufferten $800\,000/512 = 1562$ gånger i sekunden.

4.7 Impedansmätning

För att jämföra antennens impedans med simuleringarna gjordes en mätning. Genom att mäta ström och spänning när antennen drivs med varierad frekvens från ett slutsteg kan antennens impedans mätas. Uppkopplingen för mätningen visas i Figur 37.

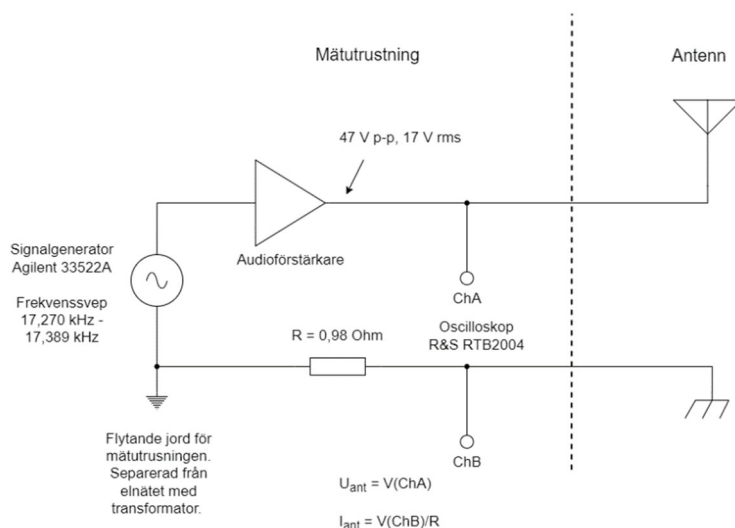
Antennen kopplades ifrån sändaren och en audioförstärkare LM3886 anslöts till antennens terminaler. Audioförstärkaren drevs av ± 30 V dubbel matning

från ett nätaggregat. Förstärkaren fick signal från en Agilent 33522A funktionsgenerator som styrdes via ett script till att variera frekvensen mellan 17,270 kHz och 17,389 kHz i steg om 0,001 kHz.

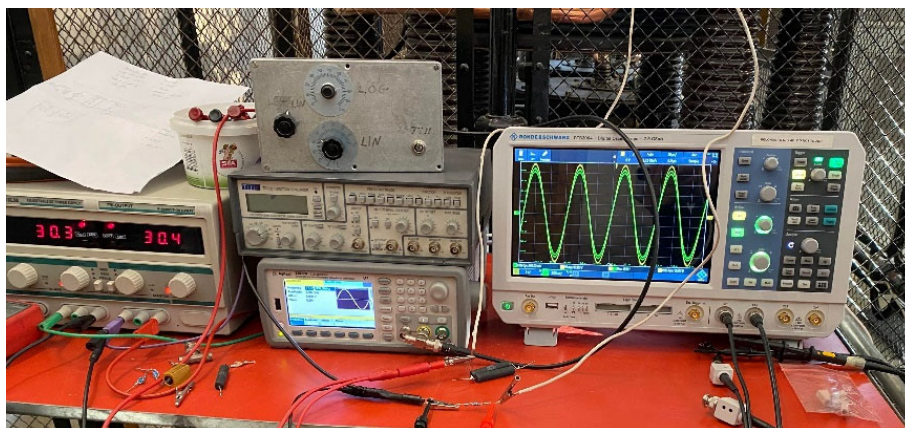
En $0,98\ \Omega$ shuntresistans för strömmätning (fyra parallella $3,9\ \Omega$ resistorer) inkopplades i serie med antennens jordledning. Vid mätningen användes ett oscilloskop Rohde & Schwarz RTB2004. Uppställningen av instrumenten på plats i Grimeton visas i Figur 38.

Oscilloskopets kanal A anslöts till antennens matande ledning. Kanal B anslöts på antennens jordledning, för att mäta spänningsfallet över shuntresistorn. Mätutrustningens jord var isolerad från antennens jord genom att instrumenten försörjdes från elnätet via en transformator.

På samma sätt som att signalgenerator styrdes att producera olika frekvenser av ett script så styrdes oscilloskopet att lagra mätdata för varje frekvens som mättes. För kanal A och kanal B sparades 23 998 sample data med 10 ns samplingsperiod i vars en csv-fil.



Figur 37: Inkoppling av signalgenerator, audioförstärkare och oscilloskop för mätning av antennens impedans.



Figur 38: Instrumenten för impedansmätningen. Dessa instrument matas via en transformator och har jord skild från antennens jord.

4.7.1 Bearbetning av mätdata

Datafilerna från oscilloskopet lästes in i beräkningsprogrammet Matlab i en dator. För varje par av data (kanal A och B), för varje frekvens, användes Matlab-funktionen "fit" för att anpassa en sinuskurva till datan.

I ekvation 4 nedan anpassas då värden på aI , bI och cI . Parameter aI anger amplituden och cI anger fasen. Variabel t anger tiden vilken lagrades från oscilloskopet tillsammans med mätdata i datafilerna.

$$aI \cdot \sin(bI \cdot t + cI) \quad (4)$$

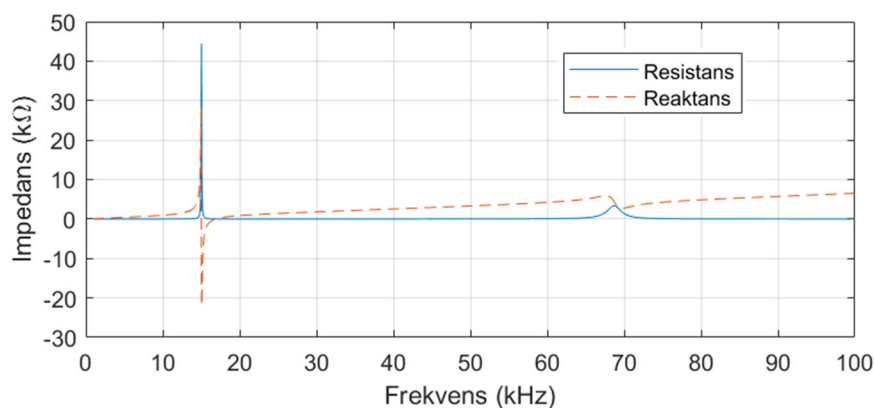
De två sinuskurvorna från kanal A respektive kanal B representerades som visare med komplexa metoden efter att amplituden för kanal B dividerats med resistansen ($0,975 \Omega$). Impedansen beräknades som kvoten mellan det komplexa talet för spänningen och det komplexa talet för strömmen. Från det erhållna komplexa talet för impedansen kunde dess storlek och fas eller dess realdel och imaginärdel plottas mot frekvens. Koden i Matlab för att beräkna impedansen finns i bilaga D.

5 Resultat

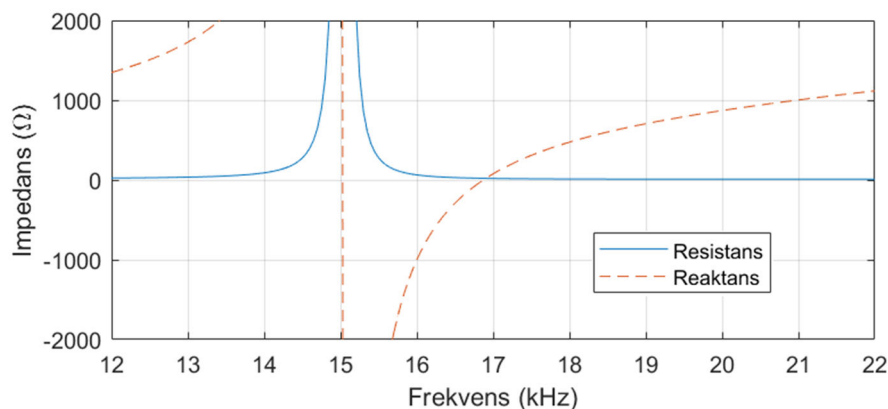
I detta kapitel presenteras resultatet av simuleringsarbetet och mätsystemarbetet.

5.1 Antennens impedans

Antennmodellen i Ansys enligt Figur 22 under rubrik 4.1.1 simulerades med ett frekvenssvep mellan 1 kHz och 100 kHz. Frekvenssvepet ger impedansen för den port i Ansys som matar modellen med effekt. Porten var kopplad mellan jord och första spolen och ger därför impedansen så som sändaren ser antennen. Impedansen mellan 1 kHz och 100 kHz visas i Figur 39. Där syns två resonansfrekvenser, där reaktansen är 0. Parallellresonans vid 15 kHz och serieresonans vid 17 kHz. Impedansen vid dessa frekvenser visas tydligare i Figur 40.



Figur 39: Simulerad impedans för antennen så som sändaren ser den. Impedansen är uppdelad i resistans och reaktans (realdel och imaginärdel).

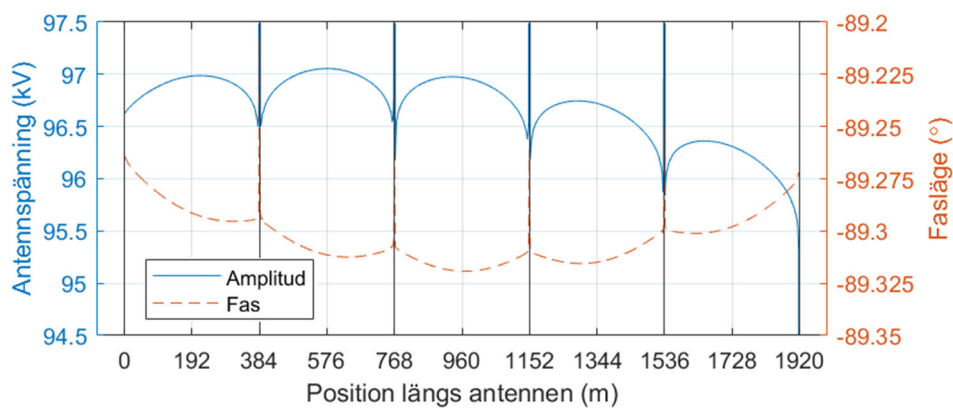


Figur 40: Simulerad impedans i ett mindre frekvensintervall, vid antennens två resonansfrekvenser. Parallellresonans (hög impedans) vid 15 kHz och serieresonans (låg impedans) vid 17 kHz.

5.2 Spänningens variation längs antennen

För att studera om det uppstod någon skillnad i fasläge mellan antennens båda ändar har spänningen i olika positioner längs antennen simulerats fram.

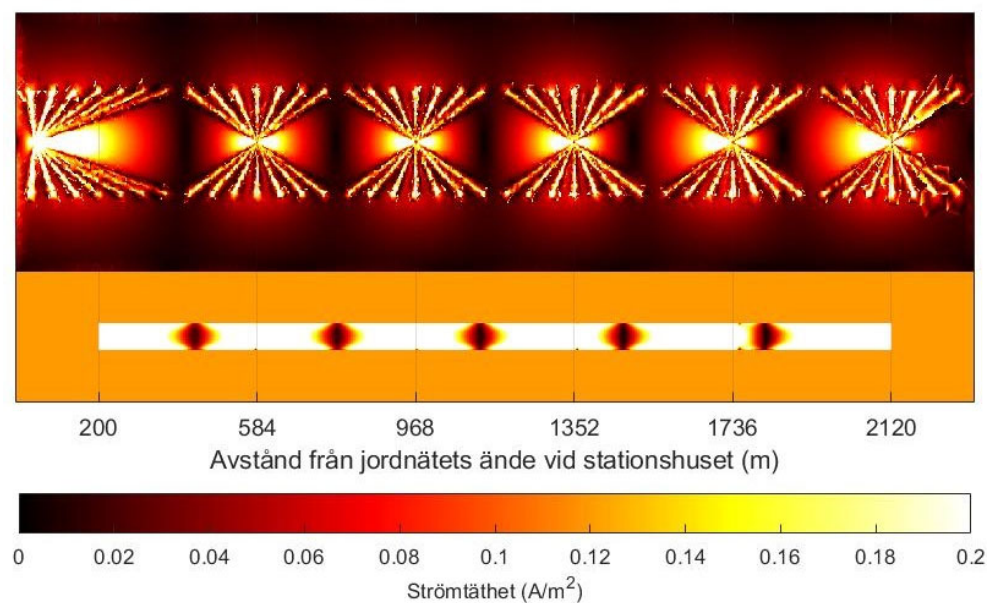
Figur 41 visar data från när det vertikala E-fältet integrerats längs en vertikal linje mellan jordnätet och toppnätet varannan meter längs hela toppnätet. Varje integrering ger ett komplext tal som representerar spänningen mellan toppnätet och jordnätet till storlek och fas vid den aktuella positionen. För det 1 920 meter långa toppnätet erhöles då 960 punkter data som formar kurvorna i Figur 41. Den spänning som visas i figuren är storleken på det komplexa talet vilket är spänningens toppvärde. De svarta vertikala linjerna visar nedledarnas positioner. Vid nedledare 2 - 5 skedde integreringen av E-fältet inuti en ledare vilket kan vara orsaken till de spikar som syns där varje nedledare är belägen.



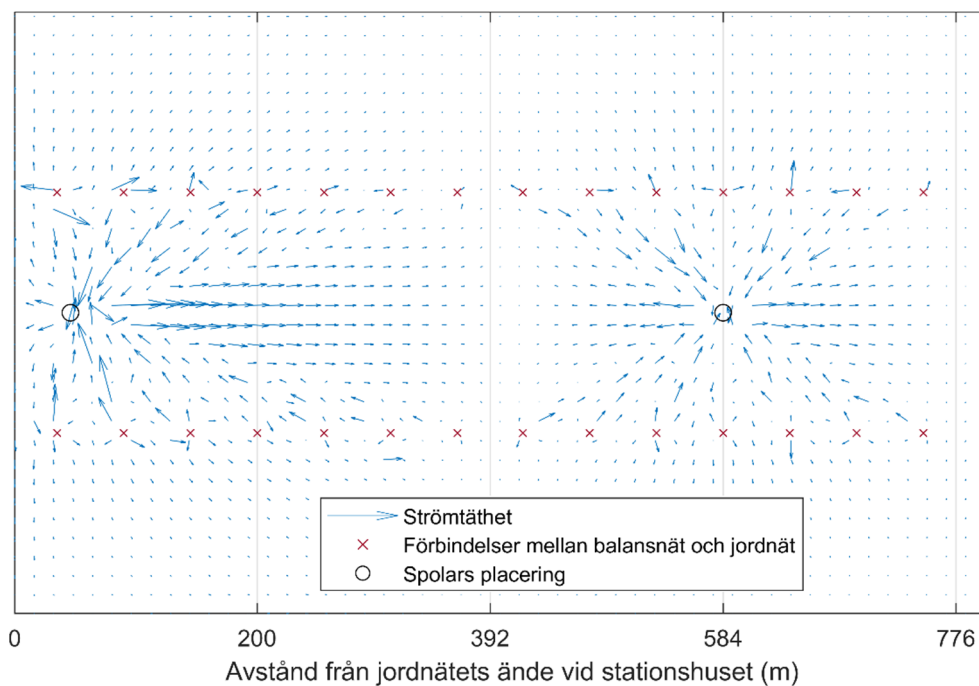
Figur 41: Spänningen längs antennen till storlek och fas. De vertikala linjerna motsvarar nedledarnas positioner.

5.3 Strömtätheten i toppnät och jordnät

Figur 42 visar simuleringsresultatet av strömtätheten i antennens toppnät och jordnät vid resonans. I figuren ses antennen ovanifrån. Toppnätets strömtäthet visas nedanför jordnätet för att visa båda i samma figur med deras inbördes förhållande i längdled bevarat. Förutom att toppnätet flyttats ned är antennenmodellens läge som i Figur 23. I Figur 43 visas strömtätheten i jordnätet i form av vektorer. Endast området kring de första två nedledarna har tagits med för att bättre åskådliggöra vektorerna. Hela strömtätheten i vektorform finns i bilaga E.



Figur 42: Strömtätheten i jordnätet och toppnätet vid resonans och med 100 kW inmatad effekt. Toppnätet visas nedanför jordnätet men i rätt position i horisontallet i förhållande till jordnätet.



Figur 43: Strömtätheten vid resonans i jordnätet vid de första två nedledarna representerad med vektorer.

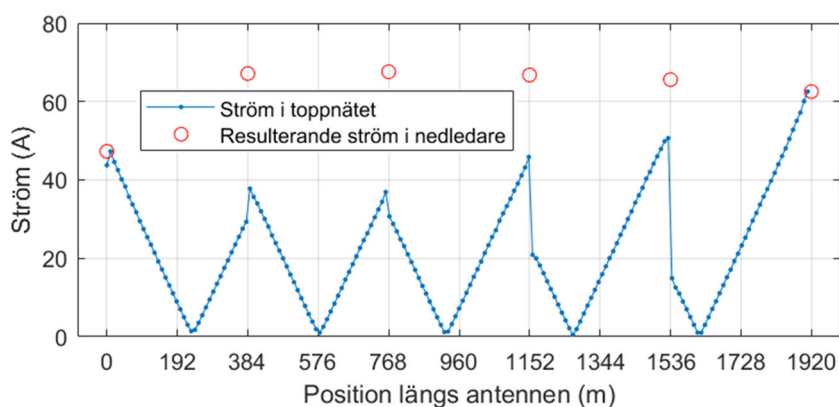
5.4 Strömfördelning i toppnätet och ström i nedledarna

Figur 44 visar en plott av strömmens storlek i toppnätet längs hela antennen. Strömtätheten i antennens längdriktning har integrerats längs toppnätets

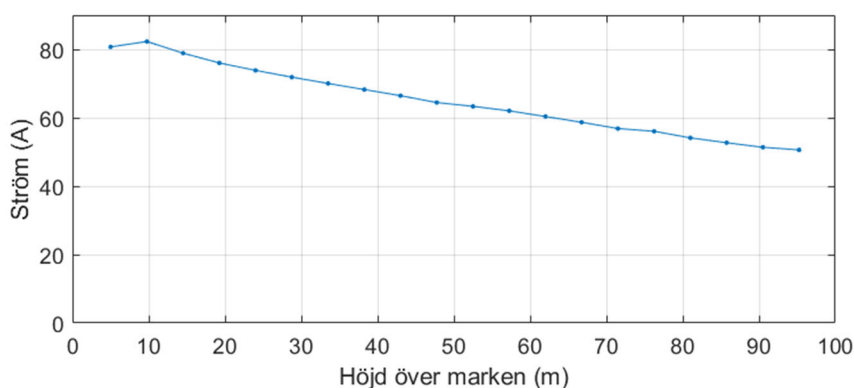
bredd var tionde meter längs antennen. Metoden förklarades under rubrik 4.3.2.

De röda cirkelarna i figurens ovankant visar summan av strömmen i toppnätet på båda sidor om respektive nedledare, vilket bör vara den ström som går ner i nedledaren. Antennen matades med 100 kW effekt och spänningen mellan toppnät och jordnät vid strömmen i figuren visas i Figur 41.

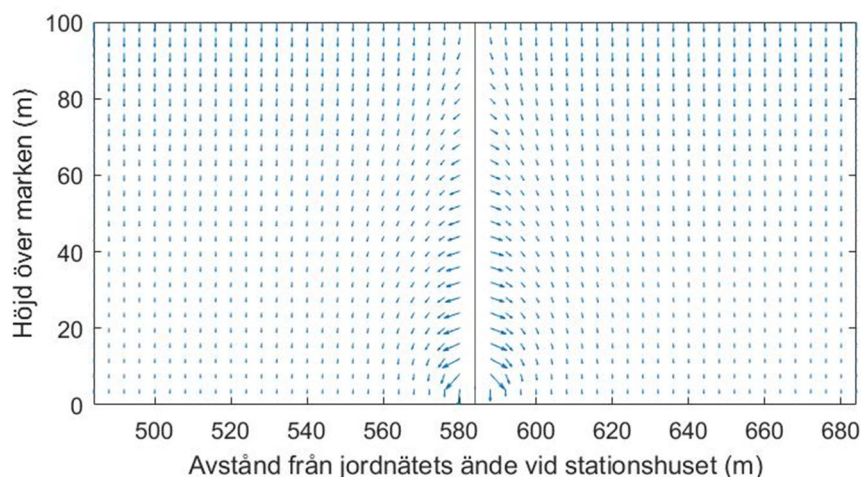
Som komplement till strömfördelningen i toppnätet borde här redogjorts för strömfördelningen längs nedledarna, men på grund av svårigheter att beräkna strömmen i de cylindriska nedledarna visas bara strömmen i nedledare 1 som bestod av ett lutande plan nedan i Figur 45. För att ge en uppfattning om kapacitansens fördelning omkring nedledarna ges i stället en plott av E-fälten omkring en nedledare i Figur 46.



Figur 44: Strömfördelning längs toppnätet



Figur 45: Strömfördelning längs nedledare 1 som bestod av ett lutande plan i simuleringsmodellen.



Figur 46: E-fältet mellan topp- och jordnät sett utmed antennens längdriktning vid nedledare 2. Den vertikala linjen representerar nedledaren.

5.5 Verkningsgraden för de olika modellvarianterna

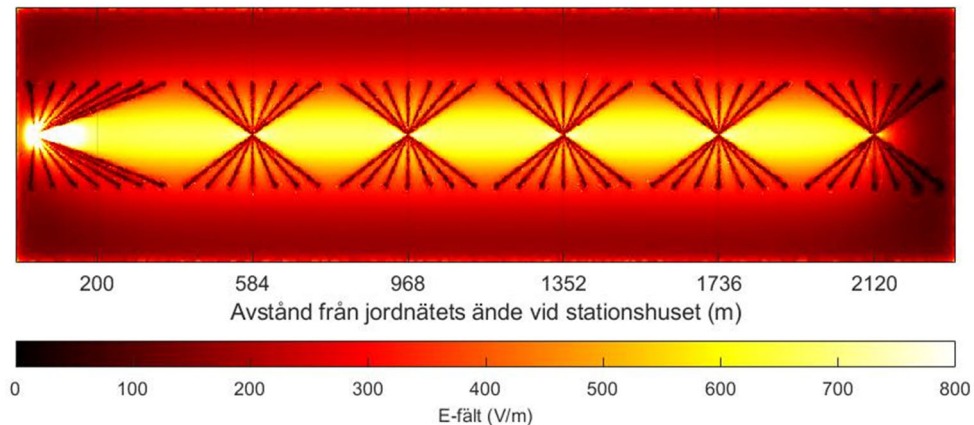
På den framtagna modellen av antennen i Ansys gjordes olika förändringar som skapade olika varianter av modellen enligt avsnitt 4.1. För de olika varianterna har studerats hur deras resonansfrekvens, strålningsverkningsgrad och impedans vid resonansfrekvensen påverkats. Resultatet presenteras i Tabell 3.

Tabell 3: De olika antenmodellernas resonansfrekvens, strålningsverkningsgrad och impedans vid resonansfrekvensen.

Modell	Resonansfrekvens	Strålningsverkningsgrad	Impedans vid resonansfrekvensen
A. Initial modell	16,880 kHz	3,4839 %	18,589 Ω
B. Delat toppnät	16,875 kHz	2,8719 %	22,576 Ω
C. Halverad konduktivitet hos toppnätet	16,885 kHz	2,7613 %	23,512 Ω
D. Halverad konduktivitet hos jordnätet	16,885 kHz	3,3464 %	19,359 Ω
F. Halverad konduktivitet top- och jordnät	16,885 kHz	2,8106 %	23,218 Ω
E. Korrekt resistans	16,885 kHz	2,2544 %	28,889 Ω
G. Bredare jordplan	16,695 kHz	3,8829 %	19,569 Ω
H. Smalare jordplan	17,520 kHz	3,3988 %	18,754 Ω
I. Spolar med olika induktans	16,780 kHz	2,8859 %	33,464 Ω
J. Endast en radiator	15,160 kHz	0,7616 %	3,7922 Ω

5.6 Elektriska fält vid jordplanet

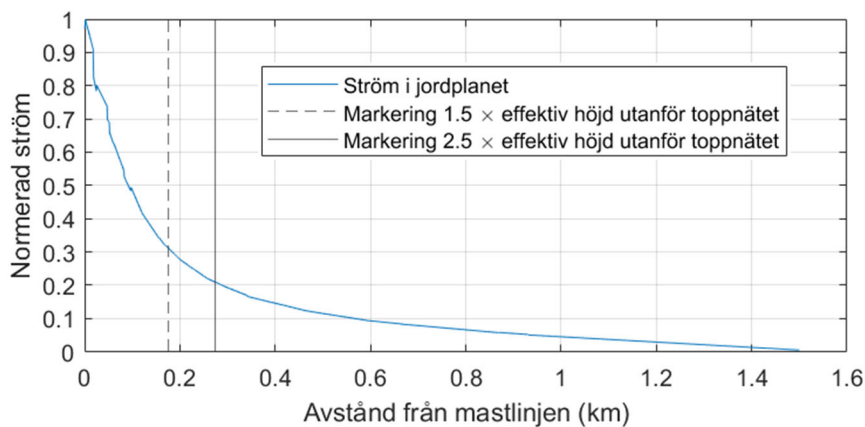
Figur 47 visar elektriska fältstyrkan i ett plan 1 meter ovanför jordplanet. I figuren ses antennen ovanifrån, precis som i Figur 23. Fältstyrkan som figuren visar gäller det vertikalt riktade fältet och fältets toppvärde, dvs. inte vid någon viss fas i förhållande till inmatad energi. Inmatad effekt var 100 kW och spänningen mellan toppnät och jordnät var den spänning som visas i Figur 41, cirka 97 kV.



Figur 47: Elektriska fältstyrkan för fältets vertikala komponent 1 meter över jordplanet.

5.7 Strömfördelning i jordplanet

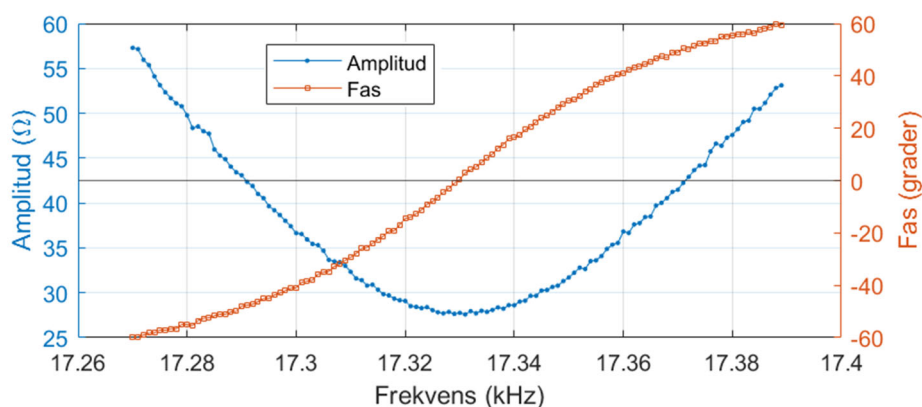
Figur 48 visar en simulering av hur strömmen fördelar sig i jordplanet vinkelrät mot antennens längdriktning som beskrevs under rubrik 4.3.4. Strömvärdena i figuren visar inte absolut ström utan hur stor strömmen är i förhållande till den maximala strömmen i riktningen mot nedledaren. Detta resultat diskuteras i avsnitt 6.3 och jämförs där med teorin av E.F.W. Alexanderson som redogjordes för under rubrik 2.6.3.



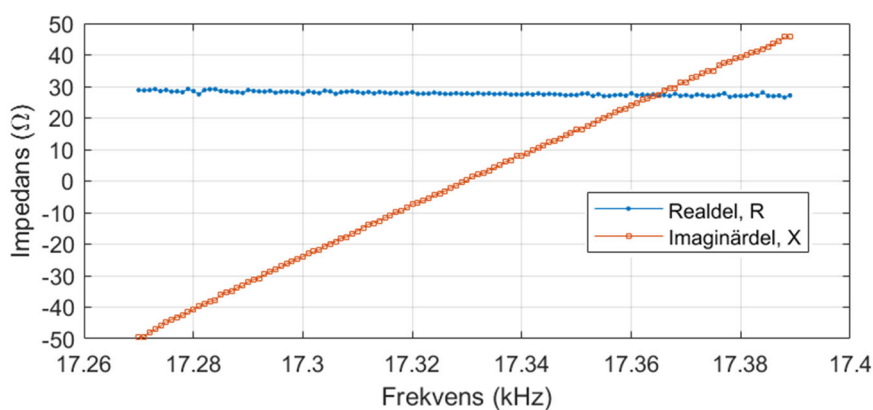
Figur 48: Strömfördelning i jordplanet vinkelrät mot antennen.

5.8 Uppmätt impedans

Figur 49 och Figur 50 visar antennens impedans som mättes mellan 17,270 kHz och 17,389 kHz. Metoden redogjordes för i avsnitt 4.7. Impedansen kunde mätas i form av ett förhållande för storlek och fas mellan ström och spänning vilket visas i Figur 49. Figur 50 visar realdelen och imaginärdelen från när impedansen representerats i form av komplexa tal. Realdelen är antennens resistans och imaginärdelen är en reaktans i serie.



Figur 49: Uppmätt impedans - storlek och fas



Figur 50: Uppmätt impedans - realdel och imaginärdel

5.9 Spolarnas induktans

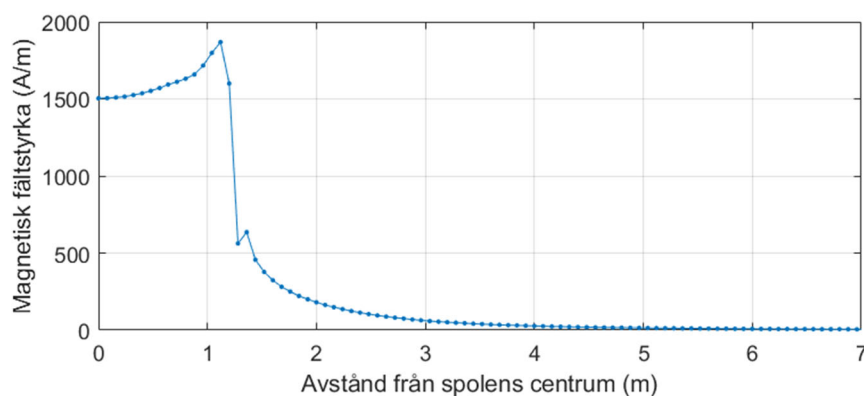
För modellen av spolen under rubrik 4.3.5 simulerades spolens impedans med olika antal varv inkopplade. Spolens induktans beräknades och presenteras i Tabell 4.

Tabell 4: Simulerad induktans hos spolarna för olika varvantal

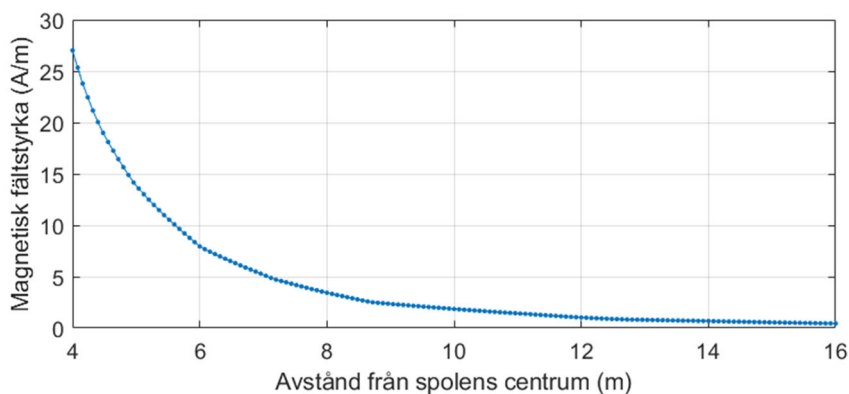
Antal varv	Induktans (mH)
76	10,08
77	10,26
78	10,46
79	10,65
80	10,84

5.10 Magnetiska fält vid spolarna

För att avgöra hur skadliga magnetfälten i antennens omgivning kan vara för människor behövs en uppfattning av fältens styrka. Spolen i avsnitt 5.9 ovan simulerades för att studera magnetfältens storlek. Figur 51 och Figur 52 visar hur magnetfältets styrka varierar från spolens centrum och ut längs mastlinjen när spolen matas med en ström av 100 A vilket motsvarar strömmen då antennen arbetar på maximal effekt, 200 kW. Figur 51 visar fältet inuti och i närheten av spolen. Fältstyrkan faller snabbt vid 1,2 meter vilket är vid spolens yttre kant. Figur 52 visar fälten på ett längre avstånd. Diskussionen om fältens hälsopåverkan tas upp i avsnitt 6.4.



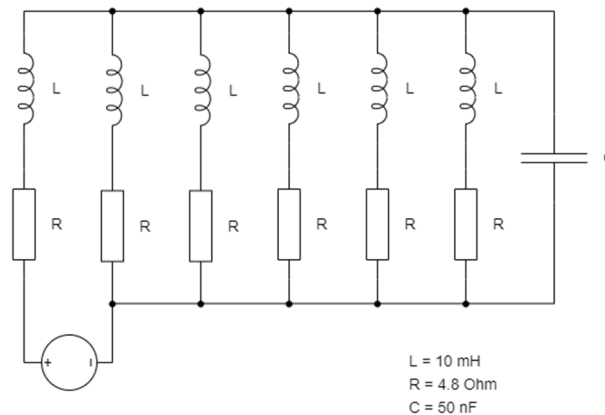
Figur 51: Simulerad magnetisk fältstyrka 0 - 7 meter från spolens centrum. 100 A ström



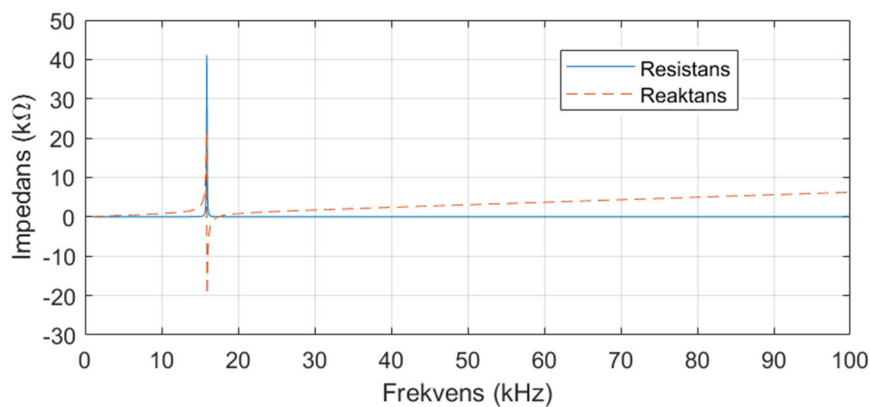
Figur 52: Simulerad magnetisk fältstyrka 4 - 16 meter från spolens centrum. 100 A ström

5.1.1 Modell med kretselement

Ett av projektets mål var att ta fram en modell för hur antennen belastar sändaren. Den resulterande modellen visas i Figur 53. Figur 54 visar impedansen hos modellen från en simulering i LTSpice. De värden på R, L och C som provats ut för att ge en impedans som liknar den uppmätta och som använts vid simuleringen är angivna i Figur 53. Tabell 5 nedan anger modellens resonansfrekvens och impedans vid resonans. Framtagandet av modellen diskuteras i avsnitt 6.1.



Figur 53: Modell med kretselement som simulerats i LTSpice



Figur 54: Impedans för LTSpice-modell av antennen

Tabell 5

Resonansfrekvens	17,434 kHz
Impedans vid resonansfrekvensen	28,75 Ω

5.1.2 Simulering i Ansys HFSS

Följande underavsnitt behandlar hur simuleringsverktyget inverkat på resultatet av simuleringarna.

5.12.1 Resursåtgång för simuleringar

Datorbaserade simuleringar begränsas av hur mycket resurser i form av tid och minne som krävs för att göra alla beräkningar som simuleringen innebär. Tabell 6 anger hur lång tid det tagit för de flera iterationer för generering av det mesh som modellen delas upp i. Tabellen anger också hur lång tid en frekvens tar att lösa när mesh är slutgiltigt förfinat. Det är denna tid som krävs för varje frekvens i ett diskret frekvenssvep. Åtgången på RAM-minne kan begränsa hur stora modeller som kan simuleras på en viss dator och åtgången för de olika modellerna visas också i tabellen. Det antal element som modellen delats upp i anges också.

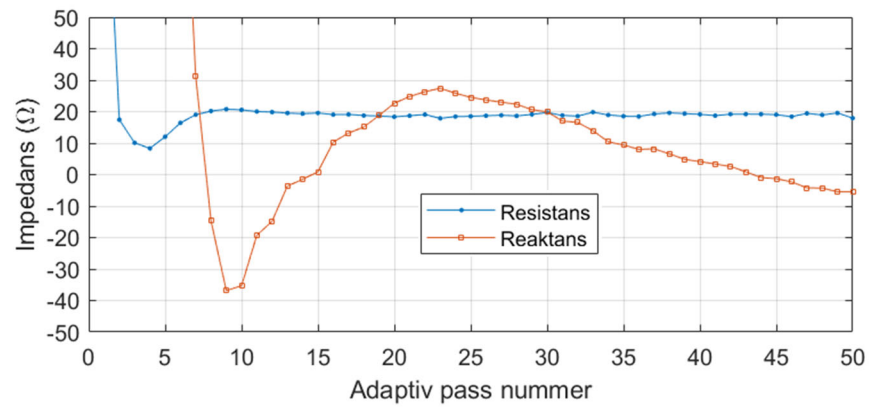
Tabell 6: Tid och RAM-minne som krävts för att simulera de olika modellerna.

Modell	Tid för mesh-generering	Ungefärlig tid att beräkna fält för en frekvens vid slutgiltig mesh	RAM-minne som krävts	Antal element i mesh
A. Initial modell	13 tim, 51 min	1,5 tim	68 GB	3 252 350
B. Delat toppnät	25 tim, 39 min	2,5 tim	109 GB	4 918 460
C. Halverad konduktivitet hos toppnätet	39 tim, 22 min	4,0 tim	161 GB	7 007 090
D. Halverad konduktivitet top- och jordnät	66 tim, 55 min	7,0 tim	281 GB	11 139 819
E. Halverad konduktivitet hos jordnätet	43 tim, 9 min	4,0 tim	165 GB	7 129 890
F. Korrekt resistans	46 tim, 59 min	5,7 tim	234 GB	9 482 680
G. Bredare jordplan	32 tim, 1 min	3,3 tim	151 GB	6 246 510
H. Smalare jordplan	> 43 tim	> 4,7 tim	> 200 GB	> 8 500 000
I. Spolar med olika induktans	27 tim, 13 min	2,5 tim	118 GB	5 244 540
J. Endast en radiator	2 tim, 2 min	20 min	25 GB	1 087 050

5.12.2 Svårigheter med simuleringarna i HFSS

Det finns många parametrar som behöver ställas in i simuleringsverktyget för att simuleringsresultatet ska stämma väl över ens med den tänkta funktionen för modellen som simuleras. En av dessa parametrar är antal iterationer, pass,

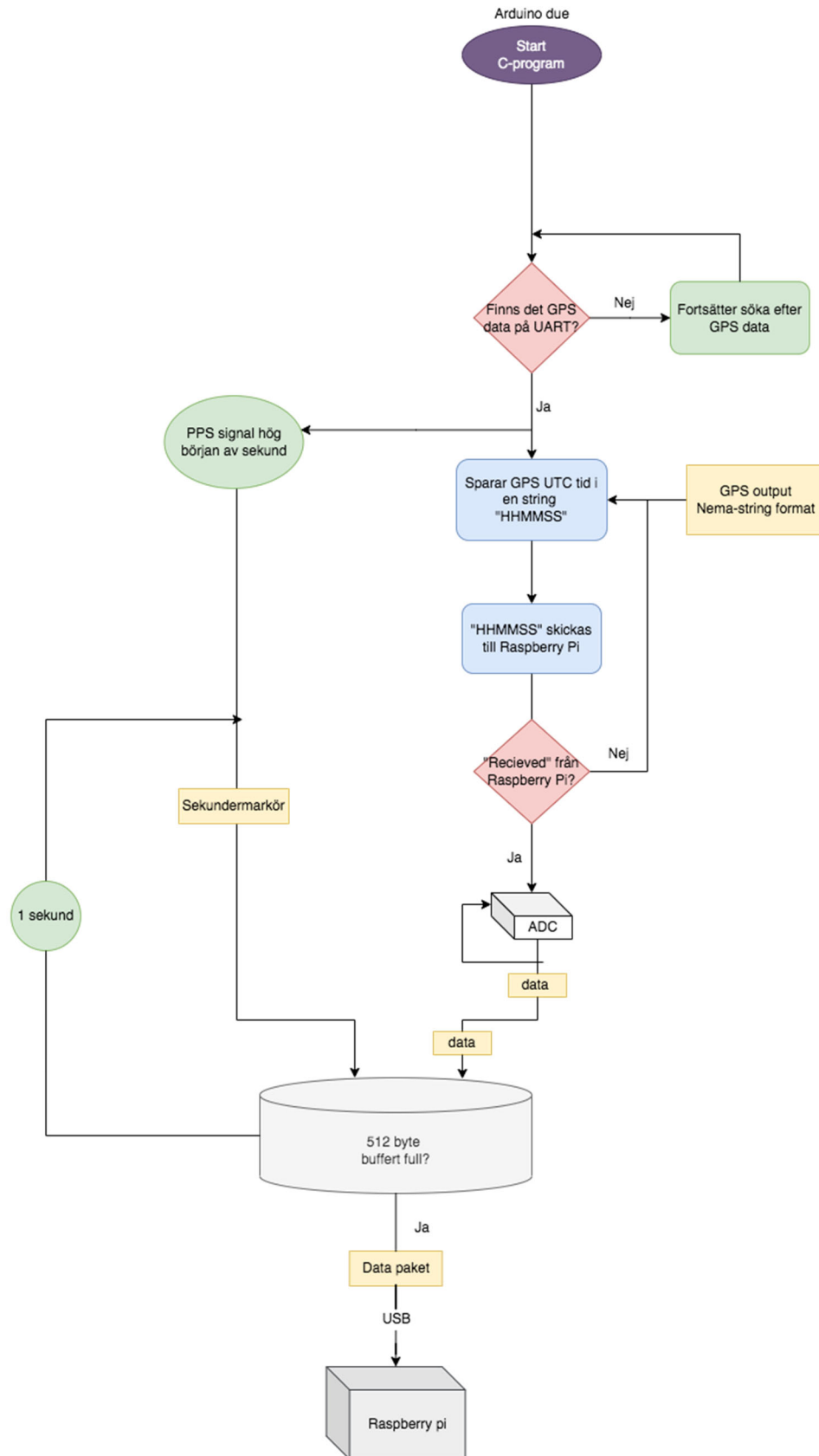
av förfining av mesh. Figur 55 visar hur antennens impedans påverkats ett visst antal pass.



Figur 55: Förändring av modellens impedans med förfining av mesh

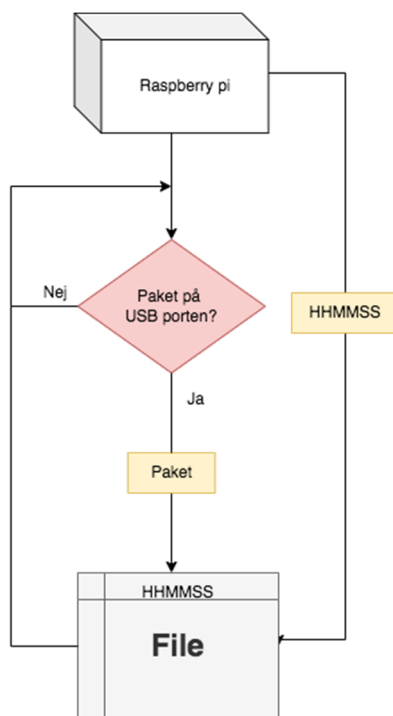
5.13 Resultatet av mätsystemet

5.13.1 Programmet för mätsystemet



Figur 56: Flödesschema över programmet i Arduinon

Figur 56 visar flödesschemat över hur resultatet av programmet i Arduinon fungerar. Programmet söker efter GPS-data konstant tills den upptäcker någon data i UART:en. Om data upptäcks, sparas tiden ner i en string som skickas ut på USB-porten till Raspberry Pi. När Arduinon fått signal tillbaka på att GPS-tiden nått fram till Raspberry Pi, skickas paket av ADC-data konstant ut i USB-porten. GPS har en utgång som genererar en PPS signal vid början av GPS-sekund. Vid varje PPS sker ett interrupt där en sekunders markör läggs till i bufferten. Detta är för att kunna hålla koll på exakta tiden efter att första tiden upptäckts.



Figur 57: Flödesschema över programmet i Raspberry Pi

Figur 57 visar flödesschemat över hur programmet i Raspberry Pi fungerar. Första GPS tiden Raspberry Pi tar emot, används för att namnge en fil på Raspberry Pi SD-kort. Alla paket som rör sig på USB-porten skrivs rakt av till filen.

5.13.2 Presentationen av data

Data utläsas och sparas ned på följande sätt,

[b'

/xFF/xFF/...

/x03/xEB/x03/xF1/x03/xF6/x03/xFA/x03/xFC/x03/xFE/x03/xFF/x03/xFF/x0
3/xFE/x03/xFD/x03/xFA/x03/xF6/x03/xF1/x03/xEC/x03/xE5/x03/xDE/x03/x
D6/x03/xCC/x03/xC2...

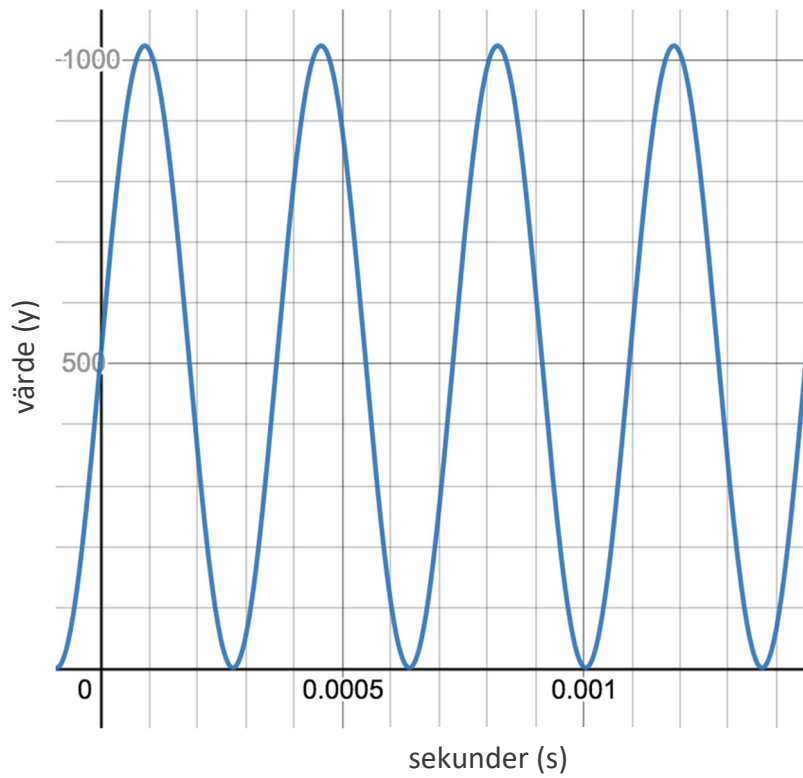
...', b'...', b'...', b'.../xFF/xFF...', ...]

blå markering visar att det är en binär array av data, röd markering visar sekunders markören som är 16 bits med 1:or och svart markering visar datan från ADC som är 10 bits, därav har en 0 i början av varje mätvärde. För att garantera att vår data kan återskapa signalen som mätts så behöver samplingshastigheten vara minst 34 400 sampel per sekund enligt samplingstoeremet. Vi samplar med en hastighet på ungefär 400 000 sampel i sekunden. Den råa datan som representeras här är svårläst för människan men är en verklig bild av det som utges i filen. Värdena här är plottade läsbart i Figur 59.

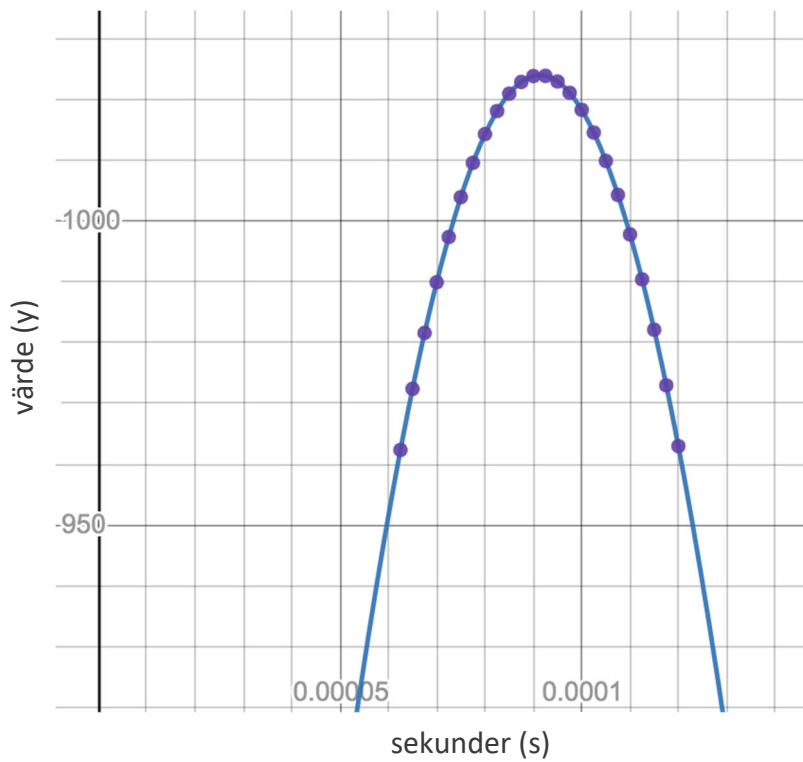
Figur 58 visar en signal vid testmätningen som vi mäter av på 17,2 kHz och 0v-5v. X-axeln är tiden i sekunder och Y-axeln visar en skala av spänningen. Värden på Y-axeln är representerat i 10-bitar enligt upplösningen på Arduinons ADC. Detta ger då värden mellan 0–1024 i stället för 0-5.

Arduino programmets avläsningar och den riktiga signalen visas i samma graf, i Figur 59.

Denna visuella representationen av mätdatan visar att signalen hade kunnat återskapas till den originella signalen med lite bearbetning av ett t.ex. ett annat Python program.



Figur 58: Signalen som vi mäter av på 17.2 kHz och 0v-5v. X-axeln representerar tiden i sekunder och Y-axeln representerar värden mellan 0-1024.



Figur 59: Arduino programmets avläsningar och den riktiga signalen.

6 Diskussion

Från Figur 41 syntes att det endast skiljde några hundradelars grader i spänningens fas mellan olika positioner längs antennen, och inte de 40 grader som skulle uppstå för en våg som rörde sig från ena änden till andra. Med det bekräftat att spänningen är i fas verkar den modell som tidigare använts stämma. Den kan ses som att det är en kapacitans med samma spänning över hela antennen. Denna spänning driver strömmar efter hur stora de olika reaktanserna mot jord är.

Det framgår av Tabell 3 att strålningsverkningsgraden är lägre för variant J med endast en radiator än för de övriga varianterna som är multipelantennerna. Strålningsverkningsgraden från simuleringarna visar lägre värden än vad som anges i litteraturen. Det kan bero på att det finns osäkerhet i huruvida metoden i detta arbete för beräkning av antennens strålningsverkningsgrad i Ansys är korrekt.

6.1 Modellen med kretselement

Den modell av antennen som visas i avsnitt 5.1.1 är egentligen samma modell som den som använts av RCA som presenterades i avsnitt 2.6. Skillnaden är att i den i projektet framtagna modellen har alla de parallella kondensatorerna sammanslagits till en. Detta för att tydliggöra att det är en och samma kondensator och inte flera med transmissionsledare emellan.

Det går däremot att se kapacitansen som att den delas upp i flera olika kapacitanser. Kondensatorn delas då upp i de kapacitanser som var och en av strömmarna i varje nedledare ser. De två sätten att betrakta antennen är då: Antingen att se det som en stor kapacitans som är i resonans med alla de sex spolarna som hamnar parallellt, eller att se det som att varje spole är i resonans med den del av den del av totala kapacitansen som den resonanskretsen utnyttjar. Den delen av kapacitansen är den del som strömmen laddar upp, som kan ses av strömtätheten i toppnät och jordnät, Figur 42, och strömmen i toppnätet, Figur 44. Där syns gränsen mellan två områden där strömmar från två resonanskretsar möts. Där är strömmen noll. Denna senaste modell att se det hela på är den som lättast ger förståelse för hur Alexanderson förklarar att första kretsen är i resonans och fungerar som en oscillationstransformator för att skapa hög spänning över kapacitansen som matar de efterföljande resonanskretsarna [8].

Processen med att ta fram modellen var att först studera den simulerade impedansen i Ansys. Impedansen hade ett maximum som följdes ganska tätt efter i frekvens av ett minimum. En modell bestående av en kondensator i serie med en induktans och en induktans parallellt med seriekretsen togs fram. Denna modell uppvisade samma två resonansfrekvenser som iaktogs vid simuleringen.

Ett resonemang fördes var de olika kapacitanserna och induktanserna uppkom i den riktiga antennen. Det upptäcktes att om den parallella induktansen flyttades till parallellt med kondensatorn så framträdde kretsen som de tidigare modeller som använts för att beskriva antennen (avsnitt 2.6).

Skillnaden var att i denna modell kom alla de parallella spolarna i en gemensam induktans. Induktansen kunde fördelas på sex stycken spolpar parallellt. Förlustresistansen lades också till i serie med varje spole. Då framstod den modell som presenteras i resultatet, Figur 53. Den modell som beskrevs i bakgrunden är därmed verifierad. Där har även kapacitansen fördelats på sex parallella kapacitanser. När modellen simulerades i LTSpice anpassades förlustresistanserna så att modellens impedans vid resonansfrekvensen stämde med det uppmätta värdet, ca. 28 Ω .

6.2 Mätningar och dess koppling till simuleringar

Mätresultat som uppnått i detta projekt och i samband med detta projekt kommer av följande mätningar, som diskuteras under respektive rubrik nedan.

- Mätning av antennens impedans vid frekvenser mellan 17,270 kHz – 17,389 kHz.
- Mätning av ström och spänning till antennen i drift, utförd av Arne Sikö och beskriven i avsnitt 2.2.

6.2.1 Antennens impedans

Resultatet från impedansmätningen presenterades i Figur 49 och Figur 50 i avsnitt 5.1. Impedansen hade ett minimum vid 17,33 kHz. Antennen är då i resonans och är rent resistiv med en resistans 27,8 Ω . Resonansfrekvensen är något högre än arbetsfrekvensen för Grimeton (17,2 kHz). Variometern och alternatorns induktans kommer i serie med övriga antennen och sänker resonansfrekvensen när de är inkopplade.

Antennens impedans vid resonansfrekvensen har använts för att bestämma värden på resistanserna i modellen i LTSpice (avsnitt 5.11). Värdet på R varierades tills att modellens impedansminimum motsvarade det uppmätta värdet 27,8 Ω . Resulterande värde på R blev 4,8 Ω . Resistansen R utgörs av

$$R = R_j + 6 R_r$$

R_j är jordresistansen, dvs. den förlustresistans som uppstår i jordnät, spole, nedledare och toppnät. R_r är strålningsresistansen. Anledningen till faktorn 6 är att strålningsresistansen är gemensam för de sex strömmarna i de parallella nedledarna. Strålningsresistansen beräknas för antennen enligt ekvation 2 till 0,052 Ω . Jordresistansen kan då beräknas till 4,5 Ω .

På samma sätt som för modellen i LTSpice användes impedansen till att anpassa modellen i Ansys så dess impedans vid resonans stämde med uppmätt impedans. Varianten av antennenmodellen i Ansys med denna anpassning anges

som variant F i Tabell 2 under rubrik 4.1.2. För denna variant var toppvärdet på spänningen mellan toppnät och jordnät 85 kV vid 93 kW mottagen effekt av antennen vid resonansfrekvensen 16,885 kHz.

6.2.2 Spänning och ström

När antennen matades med 17,23 kHz var spänningen till antennen 6,65 kV och strömmen 60 A med en fasvinkel -76 grader. Antennen är induktiv vid 17,23 kHz. Det är under resonansfrekvensen som mättes i detta projekt. Det ska noteras att de två mätningarna gjordes vid olika tillfällen så aktuell väderlek eller andra förhållanden kan ha påverkat antennens resonansfrekvens olika. Det är inte heller säkert att lika många varv på spolarna var inkopplade vid de två tillfällena.

6.3 Strömfördelningen i jordplanet – jämförelse mot Alexandersons beräkningar

Figur 48 visade hur stor strömtätheten som är riktad in mot antennen är längs en sträcka vinkelrät mot antennen. Strömtätheten längs denna linje är i fas så att längs linjen ackumuleras strömtätheten, som är en ström av storleken 1 vid avståndet 0 i figuren. Strömmen kommer av att de elektriska fälten mellan toppnätet och jordnätet ändras. Jordplanet var i denna simuleringsmodell 3 km brett och sträckte sig därmed 1,5 km utanför mastlinjen på båda sidor. Modellen matades med en spänning 100 kV, 17,2 kHz mellan toppnät och jordnät. Där E-fältet är störst är tidsderivatan också störst och dit behövs mest laddning för att ändra fälten. Jordplanets stora yta i förhållande till toppnätet gör att fälten är mindre vid jordplanet. Strömtätheten kommer därför vara mindre i dess ändar, långt från ytan direkt under toppnätet. Alexandersons beräkningar i [10] sade att inom ett avstånd 1,5 till 2,5 gånger så långt som antennens effektiva höjd så skulle 75 % till 90 % av strömmen gå där. I Figur 48 är dessa gränser markerade. Utanför 1,5 gånger höjden återstår ca. 30 % av strömmen och utanför 2,5 gånger höjden så återstår ca. 20 % av strömmen. Det innebär att värdena motsvarande de Alexanderson beräknat är enligt dessa simuleringar 70 % – 80 % vilket stämmer bra med Alexandersons beräkningar från 1920-talet.

6.4 Fältstyrka vid antennen i Grimeton och hälsoeffekter

Fältstyrkan för de magnetiska fälten (H-fälten) omkring spolarna visades i Figur 51 och Figur 52. ICNIRP anger riktlinjer om maximalt H-fält vid enstaka exponering vid frekvenser 0,82 – 65 kHz till 24,4 A/m [30]. Det betyder att en människa bör hålla sig på minst ca. 4,2 meter från centrum när spolen matas med 100 A ström. 4,2 meter från centrum är ca. 3 meter från ytterkant.

ICNIRP anger också gränsen för E-fält till 610 V/m. De elektriska fälten 1 meter över marken visades i Figur 47 och är runt 700 V/m rakt under topplinorna, och större nära spolarna. Särskilt stora är fälten kring första

nedledaren, vilken utgörs av att alla åtta linor av toppnätet går nedåt med en lutning så att kapacitansen blir extra koncentrerad under dem. Kapacitansen bör också vara mer koncentrerad nära övriga nedledare. 700 V/m är över ICNIRPs riktlinjer så i första hand är det elektriska fältet värt att beakta ur hälsosynpunkt.

6.5 Jämförelse mot nutida forskning om likartade antenner

I bakgrundens avsnitt 2.7 beskrivs studier av antenner med liknande uppbyggnad som multipelantennen i Grimeton. Likheten ligger i antennernas uppbyggnad av spolrar och kapacitanser. Den moderna forskningen beskriver att spolarna tillsammans med kapacitansen skapar fasskiftsnätverk för att få strömmen att gå i fas i alla element, vilket är ett annat sätt att betrakta antennens funktion än Alexandersons beskrivning att det går att se första kretsen som en oscillationstransformator som matar resterande parallellresonanskretsar. De moderna antennerna benämns inte "multipelantenn" (multiple antenna/multiple tuned antenna) i litteraturen så som den i Grimeton benämns. Ingenstans i denna moderna forskning finns referenser mot tekniken som användes på 1900-talets början, utan det verkar som att denna teknik har utvecklats på nytt. Det syns av Figur 14 som visar antennen av Jihun och Dagefu att implementationen med 180 graders fasskiftare skapar en antenn som är identisk med multipelantennen, under antagande att spolarna betraktas kopplade i serie med antennelementen så att de kan placeras antingen vid antennens top-platta eller nere vid jord.

Vid jämförelse mellan impedansen från arbetet av Yang et al. (Figur 20) och impedansen som simulerats i detta projekt (Figur 40), syns en likhet i att det finns en serieresonans (låg impedans) vid antennens arbetsfrekvens och strax där under i frekvens en parallellresonans (hög impedans). Kretsmodellen som togs fram av Yang et al. (här Figur 19) är precis samma som den modell som togs fram i detta arbete (Figur 53). Båda modellerna har en spole genom vilken energi matas in och resterande spolrar (endast en spole i Figur 19) är kopplade parallellt med antennkapacitansen. Skillnaden är att Yang et al. har placerat förlustresistansen parallellt med spolarna och modellen i Figur 53 har dem i serie, samt att modellen av Yang et al. inkluderade parasitkapacitanser parallellt med spolarna.

6.6 Mätsystem

Det går att utveckla mätsystemet på många sätt, då delarna är lätta att ta isär och byta ut. Vid tidigare liknande studier har dem flesta använt sig av Arduino mega eller Arduino Uno. Det kanske hade varit effektivare att använda sig av enheter som använts för samma ändamål tidigare. Att välja rätt enheter från start kan underlätta vidare utvecklingen av systemet, då det inte är nödvändigt att installera så många program och det hade funnits många färdiga funktioner som hade sparat oss tid. Vi valde att använda oss utav enheter vi redan hade.

Från början försökte vi göra så att Arduinon skulle sköta all programmering. Vi tillkopplade bara ett SD-kort. Detta funkade, men samplingshastigheten var inte tillräcklig. Vi tillkopplade i senare skede en Raspberry Pi till Arduinon för att dela upp programmet i två delar. Där Arduinon spottar ut all data och tidstämplar till en USB-port och Raspberry Pi sköter all lagring av data. Detta ökade samplingshastigheten. Som skrivet i teorin, enligt samplingsteoremet så måste samplingshastigheten vara mer än det dubbla av den ursprungliga signalen för att signalen ska kunna gå att återskapa. Vi uppnådde en samplingshastighet på 400 000 sampel per sekund, vilket är långt över 34 000 sampel per sekund som gränsen låg på.

Resultatet vid punkten 5.13.2 visar hur datan presenteras efter att systemet provkördes. Eftersom det färdiga systemet inte hann bli klart innan mättillfället på Grimeton så kunde inte mätningar göras på själva antennen men testades istället på skolan. Att vi inte hann berodde på att mättillfällen endast var två gånger om året och vilket var kort inpå projektstart.

Både programmet på Raspberry Pi och Arduinon lyckades vi få att fungera som tänkt. Men det går säkert att utveckla och snabba upp programmen samt hela mätsystemet. Antennen på Grimeton har sex nedledare, detta betyder att det krävs ytterligare fem till mätsystem för att kunna mäta fasskillnaden under samma tid. Detta går enkelt att lösa genom att överföra programmen i det färdiga systemet till fler enheter.

Det viktiga med att ha utvecklat mätsystemet är att trovärdigheten/simuleringarna styrks. Detta gör i sin tur det möjligt att uppfylla önskningarna företaget på Grimeton hade.

För att få det systemet synkat användes en PPS signal som fanns på en av GPS:ens utgångar. Två GPS:ers signaler testades och visade sig skilja med några 10-tal nanosekunder. Eftersom detta aldrig testades med två färdiga system kan det finnas buggar som behöver modifieras. Målet med mätsystemet uppnåddes delvis, ett färdigt mätsystem byggdes och fungerar tidssynkroniserad. Det är möjligt att, med flera likadana system, få fram en fasskillnad på exempelvis en antensns olika delar under samma tid.

Det finns andra lösningar för att bygga upp ett tidssynkroniserade system. Exempelvis skulle man kunna bygga upp system med hjälp av andra enheter och enkelt kunna sammankoppla med fiberkablar. Men eftersom företaget på Grimeton önskade ett system för att genomföra mätningar på en kilometer stor antenn så var inte kablar en lämplig lösning p.g.a. störningar som kan förekomma av omgivningen. Dessutom valde vi att utgå från material som används i tidigare/liknande projekt och det som skolan hade att erbjuda.

6.7 Samhällskraven på teknisk utveckling

Samhällskraven på teknisk utveckling handlar om hur det påverkar ekonomin, säkerheten samt miljön. Att studera och införa ny teknik kräver tid samt material, vilket alltid kommer att bidra till kostnader för samhället. Utveckling handlar dock alltid om att förbättra eller underlätta något för samhället och under senare tid har det varit viktigt att dessa förbättringar inte påverkar människans säkerhet samt miljöpåverkan. Detta gynnar oss alla i slutänden, man kan se det som en investering i vår framtid. Vårt arbete är en positiv utveckling som kan bidra med mycket kunskap som kan byggas vidare på, som en grund till något större. För säkerheten är mätsystemet en positiv utveckling, i det fallet då mätningarna just nu görs förhand i exempelvis sändarsalen på Grimeton, där bullret och trycket är högt för människan. Mätsystem bidrar till minimerad risk för fel, besparing av resurser, kostnader och tid.

När simulering används vid produktutveckling kan arbete utföras genom att simulera i stället för att bygga prototyper vilket kan spara material och naturresurser. Med bättre verktyg för produktutvecklingen i form av simuleringsprogram kan även effektivare apparater utvecklas med optimerad funktion. Det kan ge bättre verkningsgrad och mindre energiåtgång. Ekonomiskt kan det också ge kortare utvecklingstid så produkten kan börja säljas tidigare.

Simulering generellt kan ge många goda bidrag för samhället. Att till exempel bygga upp simuleringsmodeller av kroppens celler kan användas inom forskningen för bekämpning av cancer [31]. Därför är det viktigt att utnyttja tekniken och låta den utvecklas för att lösa alltmer avancerade problem.

7 Slutsats

Projektet som detta examensarbete har utgjorts av har haft lite av två ingångsvägar, dels att verifiera och förstå funktionen med multipelantennen och hur verkningsgraden ökar jämfört med en enkel antenn, dels att bättre förstå hur strålningen breder ut sig och hur jordnät och markegenskaper påverkar. Det slutgiltiga projektet har i princip uteslutande utgått från den första - att förstå tekniken för multipelantennen och principen för hur den fungerar. Projektet har sammanfattningsvis bestått av att utforska möjligheterna att bygga en simuleringsbar 3D-modell av antennen i Ansys HFSS och studera vad man kan få ut av den. Vi har sett strömtätheten i plattor som representerar toppnätet och jordnätet och hur strömmen fördelas över toppnät och nedledare. Vidare även kollat på antennens förluster och hur verkningsgraden påverkas av att variera olika saker. Mycket fokus har legat på att verifiera de elektriska modeller av antennen som fanns beskrivna i litteraturen. Att det inte fanns någon fasskillnad längsmed antennen utgjorde en stor del av denna verifiering.

Vid en eventuell fortsättning på detta projekt så kan efterträdaren anta att funktionen för multipelantennen är som den visat sig i detta projekt, det vill säga att antennen består av parallella radiatorer som strålar i fas. Det behövs då inte tänkas på förlusteffekter och vägarna strömmarna tar utan bara på hur strålningen sänds ut och reflekteras från en antenn med ett sådant jordnät som Grimeton Radiostation har. Där kan det vara aktuellt att kolla på hur jordens parametrar inverkar på hur strålningen reflekteras och hur strålningsdiagram ser ut. Jordplanet har i detta projekt bara fungerat som en platta i en kondensator och sett till funktionen att antennen uppnår resonans. För detta ändamål kanske jordnätet hade kunnat vara enklare utfört än de 400 koppartrådar som grävts ned för hand under antennen. Kanske kunde det lika bra varit utformat som toppnätet med några enstaka parallella ledningar på marken längs antennen, men det kan finnas fler parametrar om utformningen som bygger på hur strålningen ska reflekteras som varit avgörande för hur det utformats en gång i tiden och bör forskas vidare i ett nytt projekt. Av Alexandersons patent (avsnitt 2.6) verkar det dock som att jordnäten i början av multipelantennens utveckling var mer enkelt utformat enligt denna princip. Den typ av jordnät som senare kom att användas (som det i Grimeton) verkade bygga på upptäckter om förbättringar som minskade jordresistansen. Kanske var det att minska förlustresistansen som starkast bidrog till att jordnätet är utformat som det är.

Kanske kan den 3D-modell av antennen som tagits fram i detta projekt användas i ett sådant framtida projekt, eller så behöver problemet angripas på ett annat sätt för en sådan studie av hur jordnätet påverkar strålningen, i form av att en modell med andra förenklingar och antaganden än de som gjorts i detta projekt skulle vara aktuella. Kanske att strålande element är mer ideala

med en signalkälla för varje, och som driver en ström med rätt storlek och frekvens i stället för att ha spolar och resonans.

För att uppnå målet med mätsystemet behövde specifikt tre punkter uppfyllas. Att utveckla ett mätsystem som kan hålla sig synkroniserat i tid samt sampla tillräckligt fort för att kunna återskapa ursprungliga signalen, utföra strömmätningar på antennens nedledare för att kolla på fasskillnader och att mäta impedansen så som sändaren ser antennen.

Projektet kunde delvis uppnå målen för mätsystemet. Ett mätsystem utvecklades som är tidssynkronisering med en PPS-signal. Varje gång en PPS-signal slår till läggs en sekundersmarkör i en buffert med datan från ADC:n, som i sin tur läggs i filen. Detta gör att det enkelt går att läsa av var i filen det tagit en sekund. I början av programmet läggs det till en klocktid som filnamn, detta gör att man kan läsa av vad klockan är från att programmet börjat sampla till vilken sekund i filen som helst. Om vi exempelvis tänker oss att klockan är 14:20:10 (HHMMSS) när data börjar läsas och sparas i filen och följer upp 3 sekundersmarkörer bland ADC-datan i filen, kan vi avgöra vilken data som representeras klockan 14:20:13. Detta och utvärderingen av PPS-signalerna från GPS:erna visar att vi kan få en rätt bra säkerhet på vad fasskillnaden kan vara i antennen.

Det andra målet uppfyllades inte, inga strömmätningar gjordes på antennen nedledare, eftersom antennen endast sänder tre gånger om året, kunde inga testmätningar göras på antennen vid den tiden mätsystemet utvecklats klart. Det kan ses som en utvecklingsmöjlighet för detta projekt. En sådan mätning kan ge mer insikt i hur bra simuleringsresultaten stämmer och kanske bidra till mer frågeställningar som kan föra arbetet framåt ytterligare.

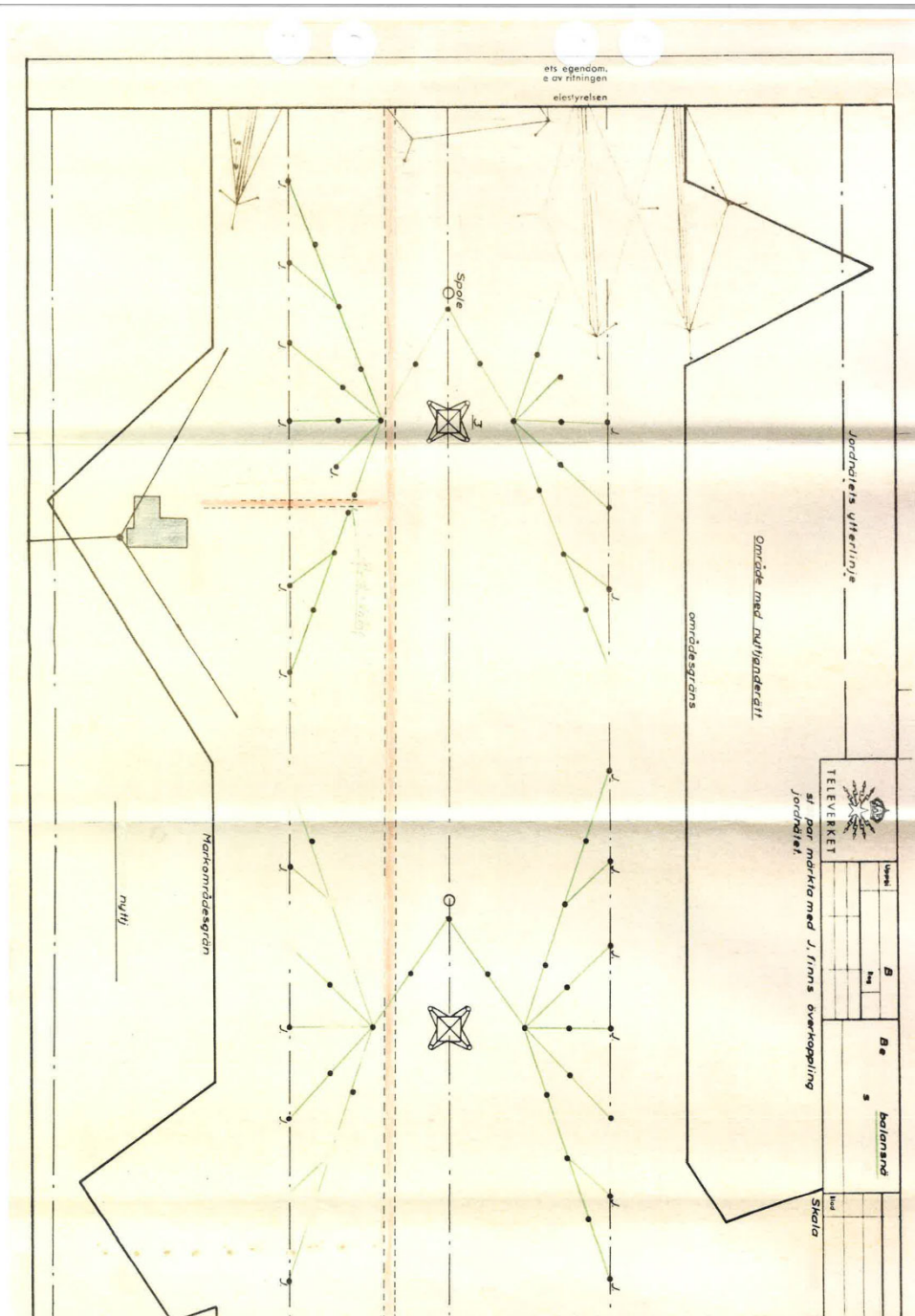
Referenser

- [1] O. Hernvall, *Maskinsändare*, [E-post], 24 mars 2022.
- [2] Harris, *Radio Communications in the Digital Age*, USA: Harris Corporation, RF Communications Division, 1996.
- [3] H. Bergfast, *Grimetons Radiostation - Dokumentation inför byggnadsminnesförklaring*, Halmstad: Länsstyrelsen i Hallands län, 1995.
- [4] L. Högman och B. Dagås, *Grimeton LF/VLF-antenn*, 1985.
- [5] A. J. Fenn, *Electromagnetics and Antenna Technology*, Norwood, USA: Artech House, 2017.
- [6] N. U. Norén, *Grimeton : mångsidigt nummer om glädjen, vikten och värdet av dokumentation : minnesutgåva.*, Göteborg: Telia Mobitel, 1995.
- [7] F. Cutting, "A Simple Method of Calculating Radiation Resistance," *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, vol. 10, p. 129–136, 1922.
- [8] E. F. W. Alexanderson, "Antenna". US Patent 1360167, 23 November 1920.
- [9] E. F. W. Alexanderson, "Antenna". US Patent 1360168, 23 November 1920.
- [10] E. F. W. Alexanderson, "Antenna". US Patent 1677698, 17 Juli 1928.
- [11] W. A. Graham, "The Multiple Tuned Antenna," *Radio Corporation of America, Circular no. 425*, 1924.
- [12] C. Jihun och F. T. Dagefu, "A Low-Profile, Top-Loaded, Multielement, Monopole Antenna for Compact UGV Systems," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 70, pp. 2277-2282, 2022.
- [13] M. Rao och K. Sarabandi, "A Tunable, High-Gain, Very Low-Profile Composite Monopole Antenna for Low-Frequency Applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, pp. 3286-3294, 2018.

- [14] J. Yang, Z. Hu, S. Wang, S. Qi och W. Wu, "Equivalent circuit model for top-loaded folded monopole of extremely low profile," *Int J RF Microw Comput Aided Eng*, vol. 28, 2018.
- [15] S. R. Best, "The performance properties of electrically small resonant multiple-arm folded wire antennas," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 47, pp. 13-27, 2005.
- [16] EZNEC, "Antenna Software by W7EL," [Online]. Available: <https://www.eznec.com/>. [Använd 24 Januari 2023].
- [17] M. Polivka och D. Vrba, "Input Resistance of Electrically Short Not-Too-Closely Spaced Multielement Monopoles With Uniform Current Distribution," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 11, pp. 1576-1579, 2012.
- [18] S. Hwang, "A Case Study: Application of Network Clock Model to Heterogeneous Sensor Networks," *Journal of Communications*, vol. 14, nr 7, pp. 587-592, 2019.
- [19] O. N. Pardo-Zamora, R. d. J. Romero-Troncoso, J. R. Millan-Almaraz, D. Morinigo-Sotelo och R. A. Osornio-Rios, "Methodology for Power Quality Measurement Synchronization Based on GPS Pulse-Per-Second Algorithm," *IEEE Transactions on Instrumentation and measurement*, vol. 70, pp. 1-9, 2021.
- [20] K. Y. Koo, D. Hester och K. Sehoon, "Time Synchronisation for Wireless Sensors using Low-cost GPS module and Arduino," *Frontiers in Built Environment*, vol. 4, 23 January 2019.
- [21] R. B. a. G. Viot, Introduction to microcontrollers, Anaheim, CA: IEEE, 1998, pp. 564-574.
- [22] M. R. S. Wallace, "Getting Started with Raspberry Pi," Maker Media, United States of America , 2022.
- [23] M. Soliz, *SPI, Intel 8080, and Motorola 6800 communication protocol between MCU and OLED driver*, 2016.
- [24] Y. F. a. X. Chen, Design and Simulation of UART Serial Communication Module Based on VHDL, 3rd International Workshop on Intelligent Systems and Applications, 2011.
- [25] *Pulse Per Second (PPS) Time Synchronization Protocol - NI-Sync 18.0 for Windows Help - National Instruments*, 2022.
- [26] X.-Q. Sheng och W. Song, Essentials of Computational Electromagnetics, John Wiley & Sons, Incorporated, 2012.

- [27] Ansys, "Application Brief: Ansys HFSS for Antenna Simulation," ANSYS, Inc. , USA, 2020.
- [28] Ansoft, "user's guide – High Frequency Structure Simulator: electronic design automation software," Ansoft Corporation, USA, 2005.
- [29] "Arduino Due - Technical Specs," Arduino.cc, [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/pmwiki.php?n=Main/arduinoBoardDue>. [Använd 24 Mars 2022].
- [30] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz)," *Health Physics*, vol. 74, pp. 494-522, 1998.
- [31] J. Metzcar, Y. Wang, R. Heiland och P. Macklin, "A Review of Cell-Based Computational Modeling in Cancer Biology," *JCO Clinical Cancer Informatics*, vol. 3, pp. 1-13, 2019.

Kungl. Telestyrelsen



C: Beskrivning av jordnät och balansnät, Telegrafverket



TELEGRAFVERKET.

7. UPPSÄTTNINGSSYSTEM.

Uppställningssystemet utgöres af ett nät af 6 m/m kopparsnit utsläppt på trilstolpar, med utsläpp från tvärlinjeavstegen på bäda sidor om mastlinjen.

Stolparna äro placerade så, att de på bäda sidor om mastlinjen bilda parallella rader. Den längsta utsläppta stolpsladden har ett avstånd af 100 m. från mastlinjen.

På alla stolpar i de yttre raderna är balansnätet förbundet med jordnätet genom utsefter stolparna fastsatta tvänne 6 m/m koppartrådar.

Överföringen mellan balansnät / genom kondensatorerna / ~~och~~ avstämningsspoler sker genom en förskjutbar överföringsarm av koppar, placerad i stolpen närast spolen.

För balansnätets isolering från trilstolparna användes, dels isolatorer / nr 2/ med krok både av telegrafverkets standard, samt äggisolatorer / af öfrre typ/.

Överföringsarmen mellan balansnät - avstämningsspoler är fastsatt vid, och isolerad från stolpen genom tvänne kamisolatorer / 110 m/m höga / enligt ritning F 60.

8. Jordnät. (Lederledet)

Nätet samset består af 3 m/m släddad koppartråd nedgrävd till ett djup af 3 dm. under markytan inom det af telegrafverket inköpta området, och 6 ^{Ans} på det område, där telegrafverket förvärvat nyttjanderätt.

Den tråd som ligger vinkelrätt mot mastlinjen och på ett inbördes avstånd af 6 mtr. kontinuerligt för hela anordningens längd. Det af telegrafverket inköpta markområdet sträcker sig 150 m. från mastlinjen, med mindre undantag på en del ställen, och området med nyttjanderätt 100 mtr.



TELEGRAFVERKET.

Marifrån. De tvärgående trädernas totala längd utgör således 500 m.

Parallellt med mastlinjen och på ett avstånd av 100 m. å båda sidor äro tvänno 6,5 m/m längsgående trådar nedlagda. Under varje mast och i mastlinjen är en 6,5 m/m tråd placerad, vilken är förbunden med 30 st. av de tvärgående träderna.

Vid varje mastfundament finnas tvänno jordplåtar, n:r I, förbundna med masten. I två av dessa jordplåtar, diagonalt motståtta, äro förbundna med det nedgrävda nätet 6,5 m/m tråd under varje mast.

Runt omkring stationshuset invid grunden är en 6,5 m/m kopparspår samt 6 st. jordplåtar, n:r I, nedlagda.

Under avstämningsspolarerna finnas extra trådar nedlagda, på ett avstånd mellan varje tvärgående tråd nedlagda på 1,5 mtr. avstånd 3 st. 3m/m kopparspår. Längden av dessa trådar utgör 25 mtr. på vardera sidan av mastlinjen, de äro förbundna sinsemellan och till de andra tvärgående träderna genom 6,5 m/m kopparspår. Området för dessa extra trådar äro utlagda utgör vid lians avstämningsspolar 78/avst. efter mastlinjen/ $\times /25 + 25$ avst. från mastlinjen/ m. vid II, III, IV, V:ans avstämningsspolar 48 $\times /25 + 25/$ m. och vid VI:ans spole 34 $\times /25 + 25/$ m.

Den totala arealen av jordnätet utgör 1.132.500 m² eller c:a 225 tunnland.

Totala längden 3 m/m tråd utgör c:a 198.000 m.

" " 6,5 m/m tråd utgör c:a 6.000 m.

tillsammans utgörande 204.000 m. med en total vikt av 14.000 kg.

D: Matlab-kod för impedansberäkning

```
filenameStart = "WAVEFORM_wide_20211223_Grim\";
freqs = 17270:17389;

size = numel(freqs);
Impedance = zeros(size,1);

for i = 1:size
    VoltageFile = filenameStart + "CHA" + freqs(i);
    CurrentFile = filenameStart + "CHB" + freqs(i);

    % Read files
    VFile = readmatrix(VoltageFile);
    IFile = readmatrix(CurrentFile);

    % Fit
    ft = fittype( 'sin1' );
    opts = fitoptions( 'Method', 'NonlinearLeastSquares' );
    opts.Display = 'Off';
    opts.Lower = [-Inf 0 -Inf];

    % Fit voltage
    [xData, yData] = prepareCurveData(VFile(:,1), VFile(:,2));
    fitresult = fit(xData, yData, ft, opts);
    vamp1 = fitresult.a1;
    vphase = fitresult.c1;

    % Fit Current
    resistance = 0.975; % Current sense resistor
    [xData, yData] = prepareCurveData(IFile(:,1), IFile(:,2));
    fitresult = fit(xData, yData, ft, opts);
    Iamp1 = fitresult.a1/resistance;
    Iphase = fitresult.c1;

    % Calculate complex impedance
    current = Iamp1 * exp(1j * Iphase);
    voltage = vamp1 * exp(1j * vphase);
    Impedance(i) = voltage/current;
```

```
end
```

```
%% Plot impedance, mag, phase
```

```
figure(1)
```

```
yyaxis left
```

```
plot(freqs/1000, abs(Impedance), '.-')
```

```
yyaxis right
```

```
plot(freqs/1000, (angle(Impedance) * 180 / pi), 's-',  
'markerSize', 3)
```

```
ylime(0)
```

```
grid on
```

```
leg = legend("Amplitud", "Fas", 'Location', 'southOutside');
```

```
xlabel("Frekvens (kHz)")
```

```
yyaxis left
```

```
ylabel("Amplitud ( $\Omega$ )")
```

```
ylim([25 60])
```

```
yticks(25:5:60)
```

```
yyaxis right
```

```
ylabel("Fas (grader)")
```

```
title("Uppmätt impedans - storlek och fas")
```

```
fig = gcf;
```

```
fig.PaperUnits = 'inches';
```

```
fig.PaperPosition = [0 0 6 3.5];
```

```
print('ImpedanceMagPhase2', '-dpng', '-r0')
```

```
%% Plot impedance, real, imaginary
```

```
hold off
```

```
figure(2)
```

```
plot(freqs/1000, real(Impedance), '.-')
```

```
hold on
```

```
plot(freqs/1000, imag(Impedance), 's-', 'markerSize', 3)
```

```
grid on
```

```
hold off
```

```
leg = legend("Realdel, R", "Imaginärdel, X", 'Location',  
'southOutside');
```

```
xlabel("Frekvens (kHz)")
```

```
ylim([-50 50])
```

```
yticks(-50:10:50)
```

```
ylabel("Impedans ( $\Omega$ )")
```

```
title("Uppmätt impedans - realdel och imaginärdel")
```

```
fig = gcf;
```



```

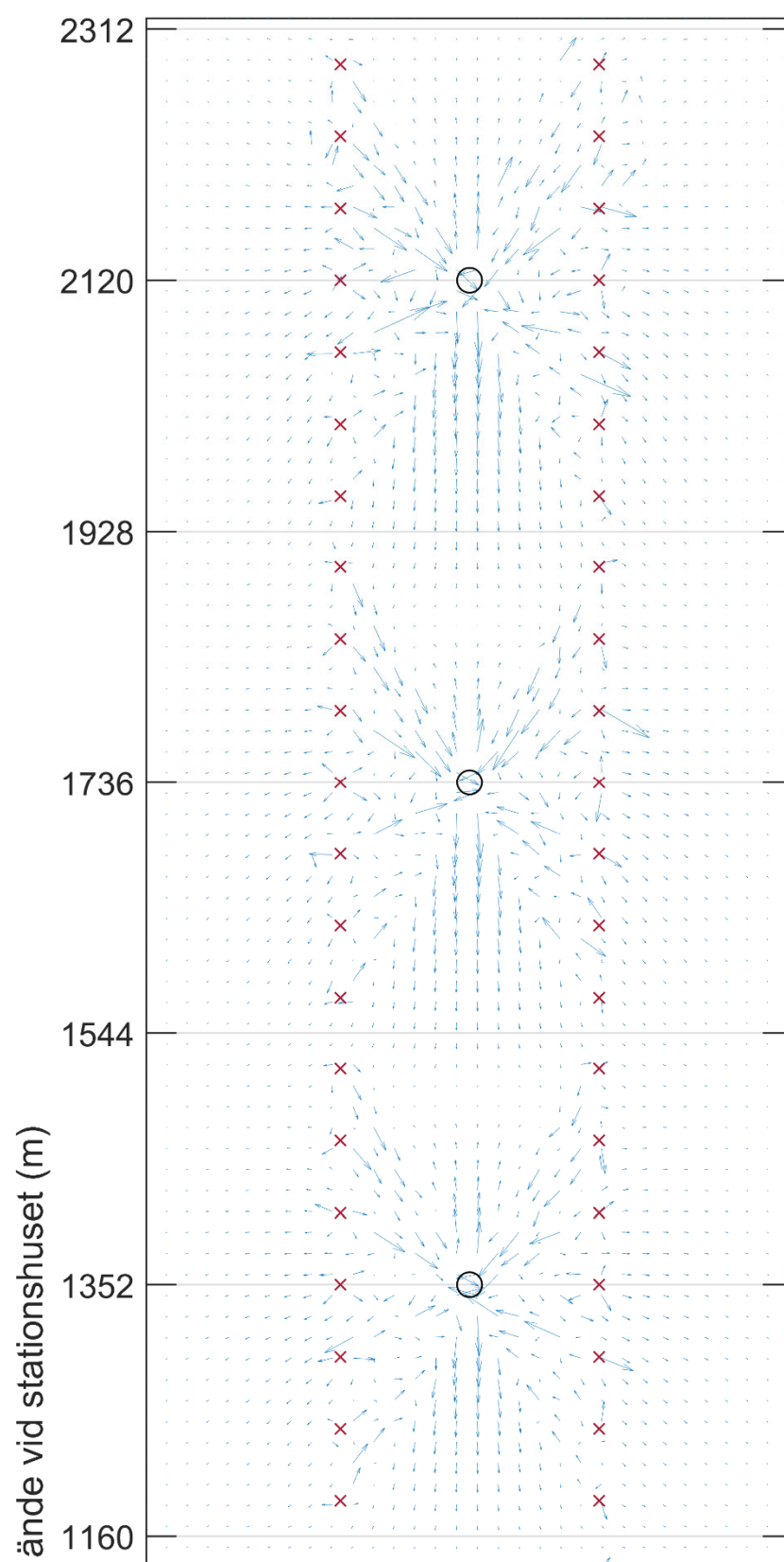
fig.PaperUnits = 'inches';
fig.PaperPosition = [0 0 6 3.5];
print('ImpedanceRealImag2','-dpng','-r0')

%% Find resonance frequency
[minPhase, idx] = min(angle(Impedance));
disp("Resonance frequency: " + freqs(idx))
disp("Impedance at resonance: " + abs(Impedance(idx)))

%% Find resistance (real part)
R = mean(real(Impedance));

```

E: Simulerad strömtäthet i jordnätet



Avstånd från jordnätets

