

FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.

Dynamisk simulering med hjälp av RPS-beräkningar för radiovågors utbredning i urban miljö

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut Ledningssystem Box 1165 SE-581 11 LINKÖPING	Rapportnummer, ISRN FOI-R--2226--SE	Klassificering Metodrapport
	Forskningsområde 7. Ledning med MSI	
	Månad, år Augusti 2007	Projektnummer E7107
	Delområde 71. Ledning	
	Delområde 2	
Författare KARINA FORS	Projektledare Kia Wiklundh	
	Godkänd av Sören Eriksson	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning FM - Försvarmakten	
	Teknisk och/eller vetenskapligt ansvarig	
Rapportens titel Dynamisk simulering med hjälp av RPS-beräkningar för radiovågors utbredning i urban miljö		
Sammanfattning <p>Militära insatser i urban miljö kommer troligen att öka alltmer. Detta kräver soldater till fots eftersom dessa lättare kan förflytta sig via och mellan byggnader. Varje deltagande soldat kommer att behöva egen radioutrustning. Då stadsmiljö är ett relativt utforskat område vad gäller militär radiokommunikation är det viktigt att öka förståelsen för radiovågors utbredning i stadsmiljö. Hårtill har institutionen för Informationsöverföring på FOI köpt in programmet Radiowave Propagation Simulator (RPS). RPS används i det här examensarbetet för att genomföra en beräkning för ett statiskt scenario, och till beräkningen infoga påverkan från sändares och mottagares mobilitet. Detta utförs genom att rumsligt extrapolera kanalens impulssvar till att gälla i andra positioner än de ursprungligen var beräknade för. Kanalens impulssvar blir då modifierat så att impulssvarets utbredningsvägar får nya fördröjningstider och dess komplexa signal får ny fas.</p> <p>Metoden, som har tagits fram i det här arbetet, för den rumsliga extrapoleringen har implementerats och utvärderats för ett litet scenario. Det extrapolerade resultatet har sedan jämförts med beräknade resultat från RPS. Analysen visade att metoden ger ett tillförlitligt resultat.</p> <p>Ett annat syfte med examensarbetet har varit att visa hur forskningsresultat (från radiokanalen) kan användas effektivare för att ge högre kvalitet på forskningsresultat, både på länk- och på nätnivå.</p>		
Nyckelord Dynamisk simulering, radiokanalen, tidsvariant, vågutbredning, stadsmiljö		
Övriga bibliografiska uppgifter Även utgiven vid Linköpings Universitet, LiTH-ISY-EX-ET--06/0308--SE	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 72 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization Swedish Defence Research Agency Command and Control Systems P.O. Box 1165 SE-581 11 LINKÖPING SWEDEN	Report number, ISRN FOI-R--2226--SE	Report type Methodology Report
	Research area code 7. C4I and Human Factors	
	Month year Augusti 2007	Project No. E7107
	Sub area code 71. Command, Control, Communications, Computers, Intelligence (C4I)	
	Sub area code 2	
Author/s KARINA FORS	Project manager Kia Wiklundh	
	Approved by Sören Eriksson	
	Sponsoring agency Swedish Armed Forces	
	Scientifically and technically responsible	
Report title Dynamic simulation based on RPS-calculations for radio wave propagation in urban environment		
Abstract <p>Military operations in urban terrain will probably increase in the future. This demands soldiers by foot, since it is easier to move through and among buildings by foot. Soldiers will also have to carry their own radio equipments. Because the urban terrain is relatively unexplored, at least for military radio applications, it is important that the urban terrain is subject for further research. For this purpose, the Department of Communication System at FOI has acquired the Radiowave Propagation Simulator (RPS) software. RPS is used in this thesis work to generate a static scenario simulation, and then to incorporate the influence from the mobility of the transmitters and receivers to the result from the static scenario. This is done through spatial extrapolation of the channel impulse response to other positions. The channel impulse response is thereby modified, so that some of the paths in the complex impulse response will get new delays and new phases.</p> <p>The method, developed in this thesis work, for the spatial extrapolation has been implemented and evaluated in a small scenario. The results from the extrapolation method have also been compared with results calculated with RPS. The evaluation showed that the method gives consistent results.</p> <p>Another purpose with the thesis work have been to point out how results from radio channel research can be used more effectively to get research results with higher quality, both on link and net level.</p>		
Keywords Dynamic simulation, radio channel, impulse response, radio wave propagation		
Further bibliographic information Also published at Linköpings Universitet, LiTH-ISY-EX-ET--06/0308--SE	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 72 p.	
Price acc. to pricelist		

Innehåll

1	Inledning	9
1.1	Bakgrund	9
1.2	Syfte och målsättning	11
1.3	Avgränsningar	11
1.4	Läsanvisningar, rapportens uppläggning	11
2	Simuleringsverktyg som används idag	13
2.1	Verktyg	13
2.2	Dataflöde mellan verktyg	14
2.3	Effektivare användning av befintlig kanalinformation	15
3	Bakgrund om kanalen	17
3.1	Kanalen	17
3.2	Färdning och signalens frekvensinnehåll	20
3.3	Kanalmodeller	21
4	Radiowave Propagation Simulator	25
4.1	Inledning	25
4.2	Programvaran RPS	26
4.3	Ray tracing-teknik	26
4.4	Mottagare i RPS	29
4.5	Dynamisk beräkning i RPS	29
5	Dynamisk simulering från RPS-beräkningar	31
5.1	Inledning	31
5.2	Antaganden för den dynamiska simuleringen	32

5.3	Rumslig extrapolering	34
5.4	Inkoherent interpolation	36
5.5	Koherent interpolation	36
6	Arbetets genomförande	41
6.1	Inledande analys	41
6.1.1	Resultat för använd faskonvention i RPS	42
6.1.2	Bärvågsfrekvens kontra inkoherent effekt	42
6.1.3	Ray splitting i RPS	44
6.2	Litet testscenario med 4 noder	45
6.2.1	Ett mått på kanalens påverkan	48
6.2.2	Inkoherent och koherent effekt	51
6.3	Extrapoleringen som metod	52
6.3.1	Fasinformation för utbredningsvägar i impulssvaret	52
6.3.2	Jämförelse mellan extrapolering och RPS-beräkning	54
6.4	Beskrivning av huvudscenariot	56
7	Sammanfattning och resultat	61
7.1	Inledande analyser	61
7.2	Analys av resultat från testscenario	62
7.3	Extrapoleringen som metod	63
7.4	Huvudscenariot	63
8	Fortsatt arbete	65
A	Inkoherent och koherent effekt	69
B	Beräknat och extrapolerat impulssvar	71

Kapitel 1

Inledning

I framtiden förväntas militära insatser i form av strid i bebyggelse (urban miljö) att öka, [1]. Därför är det intressant att ta reda på hur urban miljö i sig fungerar som kommunikationskanal, framför allt för radiotillämpningar. Det tillsammans med kravet på att försvaret alltmer övergår till civil teknik leder till ett ökat behov av att ha kunskap om radiovågors utbredning i stadsmiljö. Eftersom civil radioteknik inte är framtagen för militära tillämpningar är det extra viktigt att veta hur bra den fungerar för sådana tillämpningar. Därför måste analyser göras för att få kunskap om radioteknikens prestanda i urban miljö. I det här examensarbetet används programvaran Radiowave Propagator Simulator (RPS) för att beräkna radiovågors utbredning i urban miljö, se kapitel 4. Ursprungligen utvecklades RPS för cellplanering för mobiltelefonisystem och för att beräkna yttäckning. I det här arbetet används programmet för punkt till punkt beräkningar. Först genomförs en statisk simulering och från den genereras en dynamisk simulering, se kapitel 5. Det betyder att från kanalens impulssvar, vilka har genererats för fast positionerade terminaler, ta fram impulssvar som även gäller när terminalerna förflyttar sig mellan positionerna. I det här arbetet undersöks en metod för detta.

1.1 Bakgrund

Svenska förband förväntas att alltmer delta vid internationella och nationella operationer. Vid strid i bebyggelse krävs ofta soldater till fots eftersom dessa

lättare kan förflytta sig via och mellan byggnader. För att soldaterna skall kunna utföra sina arbetsuppgifter på ett effektivt sätt kommer varje soldat att behöva egen kommunikationsutrustning. Vid militära aktioner sker ofta plötsliga situationsförändringar. En lyckad aktion kräver snabbt agerande och att alla har tillgång till en korrekt lägesuppfattning om närområdet. Därför är det mycket viktigt att alla soldater har tillgång till nödvändig information i tid. Detta ökar kraven på det använda kommunikationssystemet. Främst ökar kravet på dess förmåga att kunna förmedla information till alla deltagande enheter.

Ett kommunikationssystem för militära tillämpningar förväntas kunna leverera ett antal olika tjänster, och beroende på vilken måste denna uppfylla olika krav. Tjänstekrav brukar kallas för quality of service (QoS). Vilka tjänster som ett kommunikationssystem kan erbjuda beror bl.a. på om det är civilt eller militärt. Den största skillnaden mellan ett civilt och ett militärt kommunikationssystem är hur robust det är. Det civila systemet designas ofta till att endast uppfylla tjänstekraven under tillräckligt stor andel av tiden. Det militära kommunikationssystemet måste däremot alltid uppfylla givna krav. Detta har hittills betytt att militära system har designats för s.k. värsta fall där stora delar av systemets kapacitet har använts för att göra det robust. Om kommunikationssystemet i stället designas för att vara adaptivt kan den momentana tillgängliga kapaciteten användas till det som krävs för tillfället. Systemet kan då välja mellan olika tekniklösningar för att öka dess momentana prestanda, t.ex. genom att öka datahastigheten eller genom att öka utsänd effekt.

Stadsmiljö är en komplicerad vågutbredningsmiljö, och ett relativt outforskat område vad gäller militär radiokommunikation. Det är en anledning till att det är viktigt att öka förståelsen för radiovågors utbredning i stadsmiljö, men även för hur dessa kan modelleras. Speciellt viktigt är det att undersöka hur mobilitet påverkar. Kanalens påverkan på ett kommunikationssystem är ofta gräns-sättande för dess funktionalitet. Stadsmiljön gör att radiovågen vid vissa tillfällen bara kan nå mottagaren genom att brytas (diffrakteras) över hustak och runt hörn eftersom det inte är fri sikt mellan sändare och mottagare.

För att få en ökad förståelse för vågutbredningen i urban miljö har FOI införskaffat programvaran Radiowave Propagation Simulator (RPS). Programmet används i det här examensarbetet för att generera en statisk simulering. I den statiska simuleringen har både sändare och mottagare fasta positioner. Med den statiska simuleringen som utgångspunkt genereras sedan en dynamisk simulering där sändarens och mottagarens mobilitet fångas upp. Resultatet innehåller

då information om den småskaliga fädningen, se kapitel 4 och 5. Det är även intressant att undersöka kanalens reciprocitet. Då är kanalens impulssvar oberoende av vilken nod som agerar sändare i ett nodpar. Om kanalen kan anses vara reciprok kan antalet RPS-beräkningar minskas och i bästa fall halveras.

1.2 Syfte och målsättning

Ett av målen med examensarbetet är att ge en bild av vilka verktyg som idag används på institutionen för Informationsöverföring för att beräkna och använda tidigare framtagen kanalinformation. Motivet till detta är att forskningsresultat ska kunna användas effektivare än tidigare, men också att förbättra nya resultats kvalitet.

Examensarbetet ska även beskriva nödvändig teori som behövs för att kunna genomföra en dynamisk simulering. Teorin ska vara beskriven med utgångspunkten att programmet Radiowave Propagation Simulator (RPS), för stadsmiljö ska användas. Från RPS-beräkningar, genererade för fasta positioner, ska modifierade impulssvar för kanalen tas fram. Metoden som används leder till att de beräknade impulssvaren genomgår rumslig extrapolering för att gälla för andra punkter än dem som RPS-beräkningar gäller för.

Metoden för rumslig extrapolering ska implementeras samt valideras i ett enkelt scenario. Slutligen föreslås ytterligare arbeten.

1.3 Avgränsningar

Examensarbetet är avgränsat till att fokusera på teoridelen och därför undersöks metoden för rumslig extrapolering bara för ett litet scenario. Metoden kommer inte heller att implementeras i RPS.

1.4 Läsanvisningar, rapportens uppläggning

Kapitel 2 ger en översiktlig bild över några simuleringsverktyg som idag används på institutionen för Informationsöverföring på FOI, samt hur dessa kan använda framtagen kanalinformation effektivare.

Kapitel 3 innehåller en bakgrund om kanalen. Några olika kanalmodeller beskrivs och vad som karakteriserar dem.

Kapitel 4 beskriver verktyget Radiowave Propagation Simulator (RPS) som används i examensarbetet.

Kapitel 5 beskriver teorin och metoden som används i den rumsliga extrapoleringen.

Kapitel 6 ger en beskrivning av examensarbetets genomförande.

Kapitel 7 sammanfattar samt redogör för slutsatser från arbetet.

Kapitel 8 ger några förslag på fortsatt arbete.

Kapitel 2

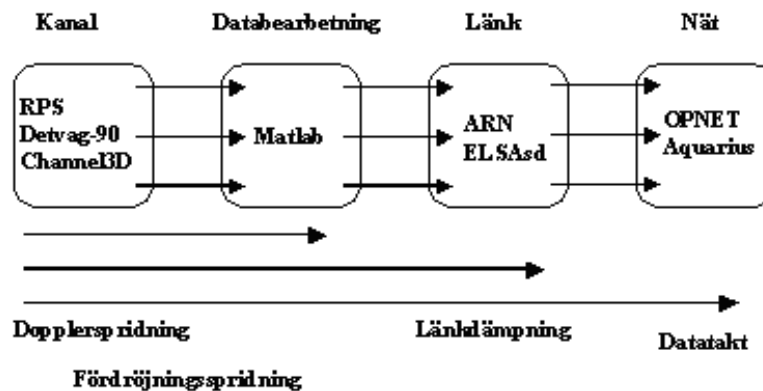
Simuleringsverktyg som används idag

Syftet med kapitlet är att ge en översiktlig bild över några av de simuleringsverktyg som idag används på institutionen för Informationsöverföring. Motivet till detta har varit att få en överblick dels över vilka verktyg som finns på institutionen men också över vilka program som använder den framtagna kanalinformationen. Olika nivåer där informationen kan användas beskrivs schematiskt i figur 2.1.

2.1 Verktyg

Nedan följer en kort beskrivning av simuleringsverktyg som används idag på institutionen. Verktygen grupperas beroende på dess användningsområde och inte beroende på dess komplexitet.

- **Beräkning av radiovågens utbredning;** RPS, Detvag-90, Channel3D.
- **Databearbetning;** Matlab.
- **Simulering;** *på nätnivå:* OPNET och Aquarius, *på länknivå:* ARN- -demonstratorn och ELSAsd.



Figur 2.1: Beskriver en idé för dataflödet (kanalinformation) mellan aktuella simuleringsverktyg.

2.2 Dataflöde mellan verktyg

RPS, Detvag-90 och Channel3D genererar simuleringsresultat som kan exporteras till matlab för vidare bearbetning, innan det i lämpligt format kan användas av resterande program, se figur 2.1. OPNET och Aquarius genomför simuleringar på nätnivå och ARN-demonstratorn samt ELSAsd genomför simuleringar som omfattar länken. Länken omfattar sändaren och mottagaren inklusive mellanliggande kanal.

Vilken typ av information som är intressant att överföra mellan nivåerna kanal, länk och nät, beror på vilken av dem som undersöks. I dagsläget används t.ex. enbart enkla beskrivningar av kanalen i form av transmissionsförlust vid OPNET- och Aquarius-simuleringar. Transmissionsförlusten är ett mått på hur mycket den utsända signalen har dämpats mellan två specifika punkter. I ARN-demonstratorn används bl.a. tidsvarianta impulssvar (se kapitel 3) som har beräknats av verktyget Channel3D. ELSAsd använder bl.a. kanalinformation framtaget med Detvag-90.

På vilket sätt kan verktygen samarbeta för att kanalinformationen används

effektivare? Avgörande för på vilket sätt detta kan ske är skillnaderna mellan verktygen. Den största skillnaden är hur avancerade kanalmodeller som verktygen använder. Men naturligtvis också vilken miljö modellen är anpassad för. Exempelvis gör RPS vågutbredningsberäkningar för stadsmiljö med ray launching-teknik, men det går även att använda empiriska modeller. Channel3D och Detvag-90 är t.ex. inte framtagna för att beräkna kanalinformation för stadsmiljö.

Utöver hur verktygen redan idag använder befintlig kanalinformation finns ytterligare exempel på användning. Exempelvis kan RPS generera tidsvarianta impulssvar som direkt kan användas av ARN-demonstratorn och förmodligen även av ELSAsd.

2.3 Effektivare användning av befintlig kanalinformation

Avancerade simuleringar tar ofta lång tid att genomföra. På institutionen används i dagsläget flera verktyg för detta. Om resultaten från verktygen används i högre omfattning än de gör i dag, skulle framför allt kvalitén på resultat öka men också minska antalet beräkningar. Tidigare framtagna forskningsresultat som gäller för en viss tekniklösning analyseras sedan för ett visst scenario. I scenariot används kanalinformation från t.ex. RPS, Detvag-90 eller Channel3D. Figur 2.1 beskriver en idé på dataflödet mellan aktuella verktyg. Till vänster i figuren visas verktyg som i dagsläget används för att beräkna kanalinformationen dvs. RPS, Detvag-90 och Channel3D. Till höger i figuren visas de som använder kanalinformationen. I figurens mitt finns programvaran matlab som används i syfte att vidarebearbeta data. Matlab går också att användas som s.k. mellanstation för att anpassa informationen till lämpligt format som kan användas av övriga verktyg. OPNET används för att genomföra simuleringar på nätnivå men det finns ytterligare användningsområden för programmet. Simuleringar där delar av forskningsresultat från tre nivåer; kanal, länk och nät, sammanfogats till en specifik parameteruppsättning går att genomföra. Oftast är det svårt att utvärdera resultat från simuleringar med många variabla parametrar, eftersom det är svårt att kontrollera vilken av dem som har mest inverkan på resultatet. Det är inte heller säkert att resultat som har visat sig ha gränssättande effekt på en nivå inverkar speciellt mycket på de andra nivåerna. Förenklade modeller måste

arbetas fram för varje enskild nivå. Modeller som måste valideras för en nivå i taget.

Ett sätt att använda resultaten på är i en demonstrator. En demonstrator är en plattform, bestående av hårdvara eller mjukvara, med begränsad funktionalitet. Demonstratorn kan även användas för att utvärdera olika tekniklösningar för kommunikationssystem. Med demonstratorns hjälp visualiseras forskningsresultat på ett intuitivt sätt som är lätt att ta till sig, vilket är bra då forskningsresultat ska visas för kunder. Forskningsresultat som idag används av institutionens demonstratorer kommer främst från två områden, kanalen samt länken. Kanalinformation används för att t.ex. utvärdera ett visst kommunikationssystemens prestanda för ett specifikt scenario. Kanalens påverkan på ett kommunikationssystem är ofta gränssättande för dess funktion. Exempel på institutionens demonstratorer är ARN-demonstratorn (Adaptiv RadioNod) och ELSAsd (ELEktrisk Styrbar Antenn), [2], [3], [4]. ARN-demonstratorn är bl.a. framtagen för att kunna visa på några prestandavinster som kan fås på länknivå om adaptiva radionoder används. Tanken är att den adaptiva radionoden kontinuerligt ska kunna adaptera (ställa in sig) efter omgivningens krav. Därutöver undersöks även olika tekniklösningars realiserbarhet. ELSAsd, används bl.a. för att visa hur icke avsiktlig störning s.k. telekonflikter kan påverka en gruppantenns prestanda. I både ARN- och ELSAsd-demonstratorn används forskningsresultat från kanalen och länken.

Kapitel 3

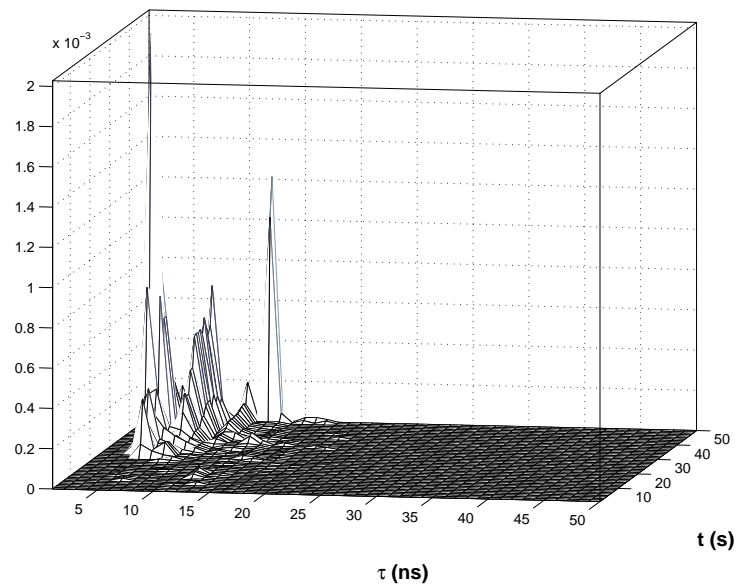
Bakgrund om kanalen

Kapitlet inleds med en kort beskrivning av vågutbredningen i urban miljö. Därefter beskrivs fädning och på vilket sätt som fädningen påverkar den utsända signalen. Slutligen beskrivs vilka delar av systemet som brukar ingå i kanalen samt några olika kanalmodeller.

3.1 Kanalen

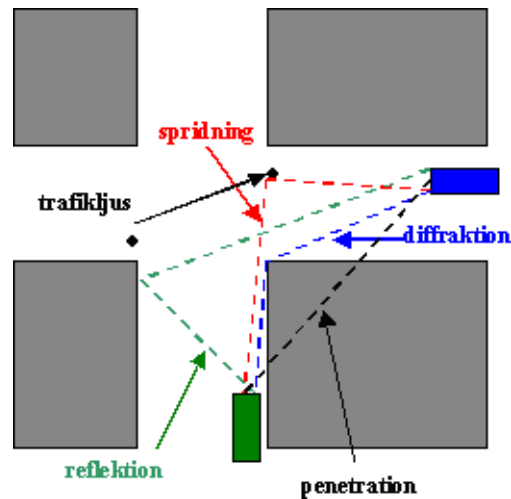
Radiokanalen eller överföringskanalen kallas området mellan sändaren och mottagaren där den elektromagnetiska vågen utbreder sig. I det här examensarbetet syftar kanalen enbart på den trådlösa kanalen där all överföring sker via luften. Mobiltelefonisystem är exempel på system som använder den trådlösa kanalen. Vilka delar av ett kommunikationssystem som brukar inkluderas i begreppet kanal beror mest på om systemet är ett analogt eller ett digitalt system. I radiokanalen för det analoga systemet brukar, förutom kanalen, även sändarens och mottagarens antenner inkluderas. Om systemet är digitalt innefattas även kommunikationssystemets modulations- och demodulationsblock. Om terminalerna i det trådlösa systemet även är mobila definieras kanalen både som trådlös och mobil. Kanalen förändras då med avseende på tiden beroende på att terminalernas omgivning växlar. I figur 3.1 visas ett exempel på en sådan kanal. På figurens z-axel visas impulssvarens amplituder. X-axeln visar fördröjningen, $\tau(ns)$, för varje enskild detekterbar signalkomponent (detsamma som utbredningsväg).

Kanalens påverkan på den utsända signalen kan resultera i att mottagaren



Figur 3.1: Visar ett exempel på hur utseendet på kanalens impulssvar kan variera med tiden. X-axeln, $\tau(s)$, visar hur mycket varje utbredningsväg i ett impulssvar fördröjs och på y-axeln anges tiden, $t(s)$, vid vilken ett impulssvar uppdateras. På z-axeln visas impulssvarets amplitud.

3.1. Kanalen



Figur 3.2: En schematisk beskrivning av de vanligaste vågutbredningsmekanismerna då direktvägen mellan sändare och mottagare är skyddad. Dessa är spridning (röd stråle), reflektion (grön stråle), diffraction (blå stråle) och penetration (svart stråle).

kommer att ta emot flera fördröjda kopior av den utsända signalen. Varje kopia har olika amplitud, fas och azimut- samt elevationsvinkel. Antalet kopior som kanalen orsakar anger hur många olika vägar signalen har transporterats mellan sändaren och mottagaren. Fenomenet kallas för flervägsutbredning. Ett sätt att avgöra hur mycket flervägsutbredning kanalen orsakat är att beräkna tidsspridningen. Ett sätt att beräkna måttet på är genom att beräkna tidsskillnaden mellan först och sist anländ komponent i impulsvaret. Ett kommunikationssystem som använder en kanal som ger stor tidsspridning kan kraftigt påverkas. Speciellt är digitala radiosystem känsliga för stor tidsspridning, eftersom komponenter med längre fördröjning än nyttsignalens symboltid kommer att påverka nästföljande symbol. Då uppstår det som brukar kallas för intersymbolinterferens (ISI). Kommunikationssystemet måste då kompensera för detta, vilket kan göras genom att t.ex. infoga ett antal redundanta bitar till meddelandet. Via kanalkodaren tillförs meddelandet de extra bitarna innan meddelandet sänds över kanalen. Dessa används sedan för att kunna rätta fel på det mottagna meddelandet som uppstått vid överföringen.

När radiosignalen överförs mellan sändaren till mottagaren påverkas den olika beroende på när i tiden signalen sänds. Den trådlösa mobila radiokanalen är ofta tidsvariant, och därför är det viktigt att få bättre kunskap om några olika fenomen som radiovågen utsätts för i kanalen. I stadsmiljö är det framför allt tre mekanismer som påverkar vågutbredningen. Dessa är reflektion, diffraktion och diffus spridning. En reflektion uppstår när vågen träffar en jämn yta som är mycket större än radiosignalens våglängd. Diffraktion uppstår när den elektromagnetiska vågen böjs av runt föremål. I fall när det inte är fri sikt mellan en sändare och en mottagare gör diffraktionen att radiovågen ändå kan nå mottagaren. Diffus spridning uppstår när den elektromagnetiska vågen infaller antingen mot en stor och ojämn yta eller små objekt, i storleksordning en våglängd eller mindre. Spridningen orsakar att delar av vågens energi sprids i flera riktningar. Stadsmiljö är ett typiskt exempel på en miljö där det finns många spridare t.ex. gatuskyltar och lyktstolpar. Vilka objekt som fungerar som spridare är frekvensberoende. I Radiowave Propagation Simulator (RPS) tas ingen hänsyn till den diffusa spridningen i beräkningarna (se kapitel 4 som handlar om RPS). I figur 3.2 visas exempel på typiska vågutbredningsfenomen. Figuren visar en grön bil som står vid en vägkorsning under tiden den antas kommunicera med den blå bilen. Strålarna är färgkodade efter vågutbredningsfenomenen. Den röda visar spridning, den gröna visar reflektion och den blå diffraktion. Slutligen visar den svarta strålen penetration genom t.ex. golv eller väggar. Andelen av radiovågen som kan tränga igenom objekt minskar med ökad frekvens, se [5].

3.2 Fädning och signalens frekvensinnehåll

Att signalen har utsatts för fädning karakteriseras av att nivån på den mottagna signalen fluktuerar. Generellt sett kan fädningen klassificeras efter hur den påverkar signalens frekvensinnehåll. Flat fädning innebär att signalens hela frekvensinnehåll påverkas på samma sätt, vilket betyder att signalens spektrala egenskaper inte förändras. Däremot påverkas signalens amplitud. Flat fädning uppstår när kanalens koherensbandbredd är större än signalens bandbredd. Begreppet koherensbandbredd kan beskrivas med hjälp av två sinussignaler med olika frekvenser, och hur de påverkas när de sänds över kanalen. Om sinuskomponenternas frekvenser ligger inom koherensbandbredden påverkas sinuskomponenterna lika. Om de däremot ligger mer separerade än kanalens kohe-

rensbandbredd påverkas de olika. När kanalens koherensbandbredd är mindre än signalens bandbredd uppstår frekvensselektiv fädning. Den frekvensselektiva fädningen gör att signalens spektrala innehåll ändras.

En storskalig typ av fädning är den s.k. skuggeffekten. Den uppstår då sikt-förhållandena mellan sändare och mottagare ändras på grund av dess rörelser. Fädningen är långsam vilket gör att påverkan på signalens amplitudnivå långsamt ändras med avseende på tiden. Flervägsutbredningen leder till interferens mellan signalkomponenter, vilket ger en snabb fädning vid nodernas rörelser.

3.3 Kanalmodeller

Antalet trådlösa kommunikationssystem och andra trådlösa teknislösningar ökar allmer på marknaden, t.ex. mobiltelefoninätet och teknislösningar för vård i hemmet. Gemensamt för de nya teknikerna är att hög kapacitet eftersträvas. Detta kan uppfyllas med bland annat smart antennteknik eller med andra MIMO-tekniker (Multiple Input Multiple Output). MIMO innebär att systemet har flera antenner på sändarsidan och på mottagarsidan. Några av teknikerna utnyttjar och drar fördel av flervägsutbredningen.

En förutsättning för att de nya teknislösningarna ska kunna analyseras är att det finns realistiska kanalmodeller tillgängliga. Det krävs kanalmodeller som ger vinkelinformation för varje utbredningskomponent. Det behövs information om i vilken vinkel radiovågen sänds ut från sändaren, Direction of Departure (DoD), och i vilken vinkel vågen träffar mottagaren, Direction of Arrival (DoA). Vedertagna kanalmodeller, som används idag, ger oftast ingen vinkelinformation. Därför har det varit speciellt viktigt att ta fram sådana modeller. Framför allt gäller det för stadsmiljö eftersom den orsakar mycket flervägsutbredning. M. Steinbauer, [6], och A. F. Molisch, [7], har arbetat med att ta fram sådana kanalmodeller och delar av deras arbete har legat till grund för det här examensarbetet, särskilt deras analys av vilken information som behövs för att kanalmodellen ska kunna anses vara dubbelriktad.

I ett bredbandigt radiosystem med rundstrålande antenner, s.k. isotropa antenner, räcker det för det mesta att använda impulssvar i form av komplex amplitud samt fördröjning för varje utbredningsväg. Det går även att använda kanalmodeller som bygger på en s.k. enkelstuds. Det betyder att radiovågen endast studsar en gång mellan sändaren och mottagaren. Dessa kanalmodeller innehåll-

ler inte tillräckligt med information för att kunna beskriva miljöer där många av komponenterna utsätts för multipla studsar. En stor andel av den mottagna effekten träffar då mottagaren senare än vad gångvägstiden för en enkelstuds är. Det vanligaste sättet att karakterisera radiokanalen har hittills varit att inkludera vinkelinformationen vid antingen sändaren eller mottagaren. På den andra sidan antas det då finnas en isotrop antenn eller en sektorantenn. I det fallet kommer det att finnas kunskap om hur kanalen ser ut i en riktning dvs. kanalmodellen blir enkelriktad. Med ray tracing-tekniker fås information om DoD och DoA automatiskt eftersom varje utbredningsväg, i form av en utsänd stråle, följs hela vägen mellan sändaren och mottagaren, se [6] och [7]. Impulssvaren som används i det här examensarbetet är framtagna med ray tracing-teknik och därför finns DoD och DoA tillgängliga. Kanalmodellen kan då anses som dubbelriktad.

Under små förflyttningar av mottagaren varierar den mottagna komponentens amplitud, DoA och DoD obetydligt, däremot varierar signalens fas betydligt mer vilket är våglängdsberoende [6], [7].

Det finns många olika kanalmodeller. Vanligtvis gäller en modell för en viss miljö eller en celltyp men också för olika frekvensintervall. Ett möjligt sätt att klassificera kanalmodeller på finns bl.a. beskrivet i [8] och följer här nedan.

- **Empiriska modeller:** är framtagna genom att utifrån ett stort antal mätningar ta fram enkla algoritmer som ska användas för att beräkna transmissionsförlusten. Modellerna består av enkla algoritmer som gäller för klasser av utbredningsmiljöer.
- **Semiempiriska eller halvdeterministiska modeller:** är förenklade deterministiska modeller som innehåller vågutbredningsteori men består av enkla algoritmer. Den största skillnaden mot föregående är att dessa modeller kräver mer platsspecifik information.
- **Deterministiska modeller:** använder platsspecifik information från byggnads- och terrängdatabaser. Flertalet av de deterministiska modellerna bygger på vågutbredningsteori implementerad i någon form av ray tracing-teknik. Deterministiska modeller är generellt inte lämpliga att användas för design av radiosystem eller algoritmutvärdering eftersom de är alltför platsspecifika (om inte platsen anses ha typiska egenskaper).

Utöver de ovan nämnda kanalmodellerna finns även stokastiska modeller, [9]. En rent stokastisk kanalmodell använder flera statistiska mått som tagits

fram från ett stort antal uppmätta impulssvar från en viss typ av kanal. De framtagna måtten används sedan till att ge kanalmodellen samma karaktäristiska egenskaper som den verkliga kanalen antas ha. Det finns även stokastiska modeller där bara vissa delar av modellen är stokastiska, som t.ex. spridares placering i omgivningen, vilket kan väljas enligt någon viss fördelning.

Förutom klassificeringen ovan, som huvudsakligen grundades på kanalmodellens uppbyggnad, kan indelningen även göras beroende på vilken yttäckning, cellstorlek, modellen gäller för, eftersom de dominanta delarna i vågutbredningen skiljer beroende på cellens storlek. Den minsta celltypen, picocellen, täcker ett område på 10-100 m. I picoceller brukar sändarens masthöjd inte vara högre än omgivande hus takhöjd. Nästa celltyp, microcellen, täcker områden på 100-1000 m. Sändaren i microcellen finns oftast positionerad på samma höjd eller lägre än omgivande byggnader. Slutligen finns den största av celltyperna, den s.k. macrocellen, vilken täcker större områden på 1-30 km. I många militära scenarier kan dock modeller baserade på celltyp vara olämpliga att använda eftersom antennerna finns i gatunivå och kommunikationssystemet inte använder basstationskonceptet.

Kapitel 4

Radiowave Propagation Simulator

Det här kapitlet inleds med en kort beskrivning av beräkningsverktyget RPS. Därefter följer en översiktlig beskrivning av hur ray launching-tekniken som RPS använder fungerar. Slutligen skildras hur reflektion och diffraktion hanteras i RPS beroende på hur vågen träffar ytor på objekt.

4.1 Inledning

I arbetet som ligger till grund för den här rapporten har programpaketet Radiowave Propagation Simulator (RPS) använts. RPS är ett programpaket som används för att beräkna radiovågors utbredning i stadsmiljö. I RPS finns ray launching-tekniken implementerad, och den ger vinkelinformation (DoA och DoD) för radiovågen. Eftersom vinkelinformationen finns tillgänglig går det att anta att kanalen är dubbelriktad. Det gör att kanalen är oberoende av om den studeras sett från sändarens sida eller från mottagarens sida. På en sådan kanal går det att pröva olika MIMO-lösningar (Multiple Input Multiple Output). Tekniken använder multipla antennelement både på sändar- och mottagarsidan. Detta tillsammans med smart signalbehandling kan avsevärt öka systemets kapacitet.

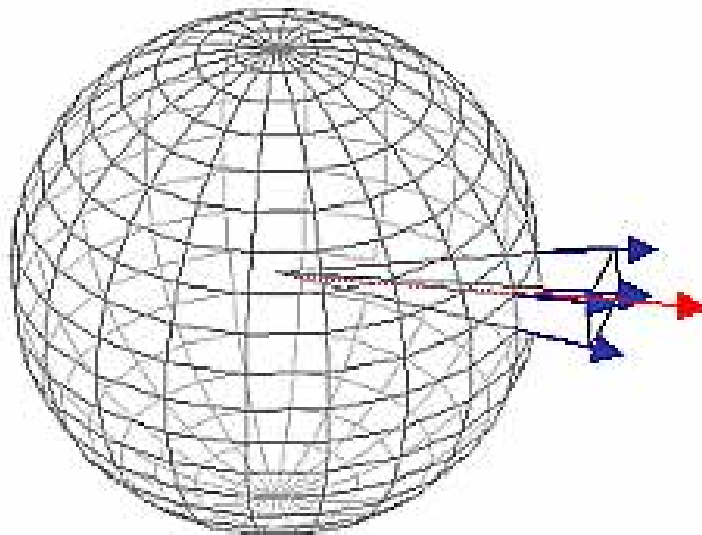
4.2 Programvaran RPS

Radiowave Propagation Simulator (RPS) är en programvara framtagen av Radioplan GmbH (från Dresden i Tyskland) och som har köpts in till institutonen för Informationsöverföring på FOI. Verktuget togs ursprungligen fram för att beräkna radiosystems prestanda och räckvidd. Programvaran innehåller en bredbandig deterministisk kanalmodell för stadsmiljö vilken baseras på geometrisk optik och diffraktionsteori och är implementerad med ray launching-teknik, se [8] och [10]. Kanalmodellerna som används i RPS är giltiga i frekvensområdet 300 MHz - 300 GHz. Även empiriska modeller finns implementerade i RPS. Metodiken för ray tracing finns kort beskriven i nästa avsnitt. I det här examensarbetet används RPS för att beräkna kanalens impulssvar för önskade länkar mellan ett antal noder i olika positioner. Noderna ska om möjligt upprätta länkar till varandra för att bilda ett nät. De beräknade impulssvaren, tillsammans med ett visst radiosystems begränsningar, avgör ifall en länk mellan två noder är möjlig eller inte. Eftersom nätet för det här examensarbete är ett ad hoc-nät medför detta att det är viktigt att noderna i nätet har kontakt med varandra. Detta eftersom nätets topologi bygger på att information kontinuerligt kan slussas mellan nätets noder.

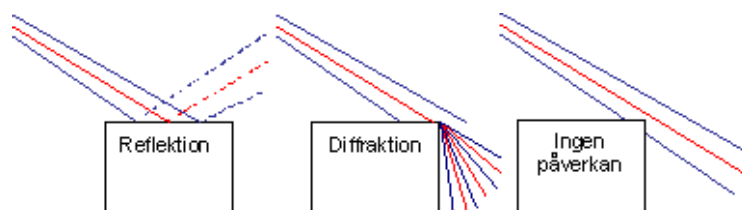
4.3 Ray tracing-teknik

Ray tracing-teknik är ett samlingsnamn för olika metoder som bygger på att en stråles gångväg följs från en sändare till en mottagare. Strålen representerar en utbredningsväg i det uppmätta impulssvaret från kanalen. Ray launching är en form av tracing-teknik och innebär att ett antal strålar skickas ut i alla riktningar från sändaren, se [11]. De utskickade strålarna följs sedan (tracing) tills dess att de träffar en mottagare. I figur 4.1 visas en beskrivning av hur ett utskickat strålnippe ser ut. Strålnippet modelleras i RPS som en kon bestående av en centrumstråle samt en stråle i varje hörn. Innan den avfyrate strålen träffar mottagaren kan strålen genomgå ett antal reflektioner och diffraktioner. Strålen kan även på vägen penetrera objekt som exempelvis byggnader. I RPS följs inte strålen under en oändligt lång tid utan det finns flera kriterier som avgör hur länge den ska följas. Det effektivaste kriteriet för detta är strålens effektinnehåll. Under strålens gångväg dämpas dess effektinnehåll med avståndet från sändaren, speciellt efter några reflektioner, diffraktioner eller passage av objekt. När

4.3. Ray tracing-teknik



Figur 4.1: Från en sändare skickas (launching) ett antal strålnippen ut i olika riktningar. I RPS modelleras strålnippet i form av en pyramid, vilken byggs upp av fyra hörnstrålar och en mittstråle i dess centrum, [11].



Figur 4.2: Visar exempel på några effekter som uppstår i RPS beroende på hur ray tracing-algoritmerna tar hänsyn till hur strålar träffar objekt, [11]. Till vänster i figuren visas reflektion, i mitten visas diffraktion och längst till höger visas när ingen träff detekteras.

dess effektinnehåll sjunker under ett valt tröskelvärde avslutas beräkningarna för strålen. Tröskelvärdet väljs oftast beroende på vilket radiosystem som ska undersökas, och då används mottagarens känslighet som tröskelvärde. Vid mycket låga tröskelvärden detekteras fler utbredningsvägar. Den största nackdelen med ett lågt tröskelvärde är att beräkningarna med RPS blir mycket tidskrävande. Ray launching-tekniken som används i RPS innebär att basytan på strålen växer med avståndet, vilket borde öka chansen för en träff på en byggnadsyta. Detta stämmer inte eftersom det endast är strålpyramidens centrumstråle som avgör ifall ytan träffas eller inte. I figur 4.2 visas vad som händer vid en reflektion eller en diffraktion, samt när en stråle passerar ett objekt utan att påverkas. Vid en reflektion måste strålens centrumstråle och alla fyra hörnstrålarna träffa samma yta (visas till vänster i figuren). När endast två av hörnstrålarna plus centrumstrålen träffar objektet uppstår en diffraktion (visas i mitten av figuren). När strålen diffrakteras kommer den att ge upphov till nya svagare strålar fördelade på en s.k. strålpyramid. Bilden på diffraktion (figurens mittsektion) visar hur strålen bryts in i skuggzonen. I RPS går det att välja om delar av strålpyramiden som bryts av i andra vinklar än skuggzonen ska tas med i beräkningarna eller inte. Om dessa inte tas med kommer antalet beräkningar att bli färre eftersom mängden nya strålar blir färre. När centrumstrålen i strålknippet missar objektet kommer inte träffen att registreras utan händelsen tolkas som att strålen har missat objektet (se bilden till höger i figuren) [11].

4.4 Mottagare i RPS

En stråle bidrar till den mottagna signalen i en mottagare endast om mottagarens koordinater ligger inom strålpiramidens tvärsnittsyta.

4.5 Dynamisk beräkning i RPS

I det dynamiska fallet representeras en mottagare i RPS i form av ett kvadratisk plan med tillhörande fältbeskrivning. Fältbeskrivningen i mottagaren är dock endast definierad i planets mittpunkt, vilket leder till att vid förflyttningar ut från planets mittpunkt antas samma fältbeskrivning gälla för samtliga av planets punkter. Detta är inte tillräckligt för våra applikationer, vilket har nödvändiggjort den vidareutveckling som beskrivs i det följande.

Kapitel 5

Dynamisk simulering från RPS-beräkningar

5.1 Inledning

Kapitlet beskriver hur en dynamisk simulering kan genomföras med utgångspunkt från en statisk simulering med RPS. Resultatet från RPS ska användas för ett scenario med mobila terminaler. RPS innehåller en modell för mobilitet hos mottagaren, men den är klart otillräcklig för våra behov, se avsnitt 4.5. Därför måste impulssvaren från beräkningarna modifieras för att de även ska gälla när terminalerna har förflyttat sig. Modifieringen innebär att vågutbredningens gångvägar påverkas. En gångvägsskillnad uppstår, vilket leder till en ändring av fas och fördröjning hos den komplexa signalen. Fasändringarna och de nya fördröjningstiderna, för alla signalbidragen från de olika utbredningsvägarna i impulssvaret, används sedan för att ta fram ett modifierat impulssvar för kanalen. Tidigare har liknande arbete utförts men i dessa fall har bara en av terminalerna varit mobil, se [12] och [13]. I dessa arbeten har t.ex. beräkningar från en kanal som bygger på enkelstuds använts. I det här arbetet däremot används beräkningar från ray tracing, vilket bygger på att strålar kan studsas flera gånger mellan sändaren och mottagaren, se kapitel 4. En av förutsättningarna för att den dynamiska simuleringen ska vara genomförbar är att kanalen kan ses som dubbelriktad, se [6] och [7]. Det betyder att kanalen är oberoende av från vilken av noderna i ett terminalpar som kanalen studeras. Detta blir möj-

ligt eftersom nödvändig vinkelinformation, Direction of Departure (DoD) och Direction of Arrival (DoA), finns tillgänglig i RPS-beräkningarna.

5.2 Antaganden för den dynamiska simuleringen

Metoden för den dynamiska simuleringen bygger på teorin som gäller för elektriska och magnetiska fält, som bla. beskrivs av vågekvationen.

Innan den dynamiska simuleringen kan genomföras måste några antaganden göras, vilka följer i texten nedan. Både antagande 1 och 2 krävs för att metoden för den rumsliga extrapoleringen ska vara genomförbar. Antagande 4 påverkar inte den rumsliga extrapoleringen utan syftar till att kunna reducera antalet RPS-beräkningar, och antagande 3 används för att minska extrapoleringens beräkningskomplexitet.

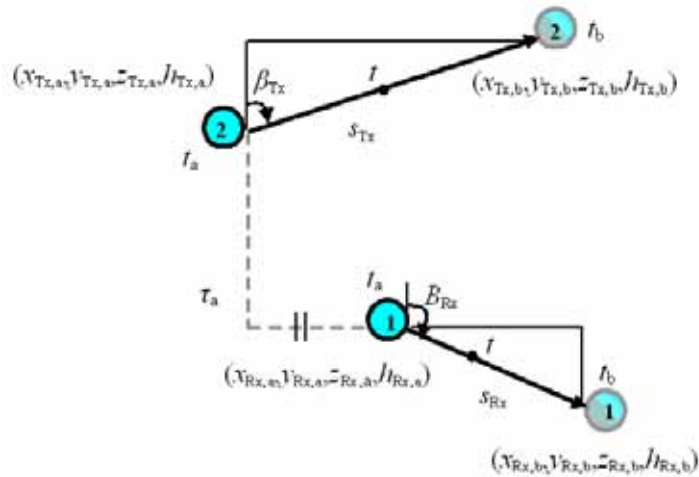
Antagande 1: den verkliga strålbanan för en stråle behöver inte vara känd.

Antagande 2: en utbredningsvägs absoluta amplitud, Direction of Departure (DoD) och Direction of Arrival (DoA) ändras obetydligt under korta förflyttningar, [7].

Antagande 3: höjdskillnaden vid förflyttning mellan två utvalda positioner är försumbar.

Antagande 4: kanalen mellan sändare och mottagare är reciprok.

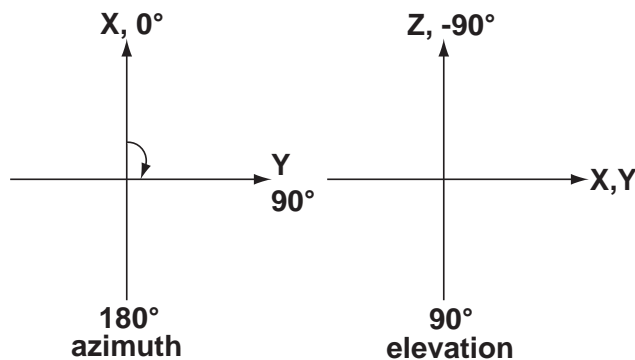
Antagande 1 är avgörande för den dynamiska simuleringen, vilken finns beskriven nedan i avsnittet koherent interpolation 5.5. Nödvändig teori som ligger till grund för den dynamiska beräkningen är bl.a. hämtad från [12] och [13]. Antagandet gör det möjligt att beräkna nya tidsfördröjningar samt faser för varje utbredningsväg i kanalens impulssvar. Det innebär att den mottagna signalens komplexa amplitud kan påverkas. **Antagande 2** gör det möjligt att använda DoD- och DoA-vinklar, framtagna med en statisk simulering, i den dynamiska simuleringen. Hur mycket vinklarna ändras under en förflyttning är beroende av avståndet till närmaste brytpunkt för respektive stråle. **Antagande 3** betyder att under korta förflyttningar förutsätts inte höjdskillnaden i terrängen bli speciellt stor. Att bortse från höjdskillnaden i beräkningarna kommer därför inte att påverka resultatet nämnvärt. Detta är givetvis beroende av vilket scenario som har valts och för scenariot i det här arbetet har alla sändare och mottagare samma antennhöjd. I de fall där noderna rör sig i mer kuperad terräng måste hänsyn tas



Figur 5.1: Schematisk beskrivning av den rumsliga extrapoleringen. Scenariot består av två noder och i det här fallet agerar nod två som sändare och nod ett som mottagare. Den streckade linjen symboliserar strålens gångväg.

till nivåskillnaderna. **Antagande 4** påverkar inte själva RPS-beräkningen utan bara det totala antalet beräkningar. Om kanalen kan antas vara reciprok betyder det att kanalinformationen bara behöver beräknas i en riktning mellan två noder. I det här arbetet visade det sig inte ha någon större betydelse.

Radiovågens utbredning, vilken beräknats med RPS, är utförd med ray launching-teknik. Tekniken är mer avancerad än kanalmodeller som bygger på enkelstuds eftersom varje stråle kan studsas flera gånger innan den träffar en specifik mottagarpunkt. Figur 5.1 visar ett exempel på en stråle som har skickats ut från en sändare. Strålens bana symboliseras i figuren av en streckad linje mellan noderna, där streckningen betyder att strålens gångväg är okänd, se **Antagande 1**. Vid extra- och interpoleringen används RPS notation för vinklar enligt figur 5.2.



Figur 5.2: RPS notation för azimuth- och elevationsvinklar.

5.3 Rumslig extrapolering

Figur 5.1 visar ett nodpar, vilka kan vara en del av ett nät, som befinner sig i fixa positioner vid tidpunkterna t_a och t_b . Under nodernas rörelse mellan dessa positioner ska RPS-beräkningarna för dessa punkter extrapoleras till att gälla för tidpunkten t där $t_a \leq t \leq t_b$. Noderna i ett nodpar kan agera som sändare eller mottagare. Sändarpositionerna för respektive nod är $(x_{Tx,a}, y_{Tx,a}, z_{Tx,a})$ och $(x_{Tx,b}, y_{Tx,b}, z_{Tx,b})$. Fältet finns beskrivet i respektive mottagarposition $(x_{Rx,a}, y_{Rx,a}, z_{Rx,a})$ och $(x_{Rx,b}, y_{Rx,b}, z_{Rx,b})$. Där index Tx och Rx är förkortningarna för sändare respektive mottagare, och detta gäller i alla ekvationer som följer.

Fältet som beskrivs av en RPS-beräkning, i respektive mottagarpunkt t_a och t_b , består av följande parameteruppsättningar.

$$\varepsilon_{a,m_a} : \{ \tau_{a,m_a}, A_{a,m_a}, \varphi_{Tx,a,m_a}, \vartheta_{Tx,a,m_a}, \varphi_{Rx,a,m_a}, \vartheta_{Rx,a,m_a} \}, \quad m_a = 1, \dots, M_a \quad (5.1)$$

$$\varepsilon_{b,m_b} : \{ \tau_{b,m_b}, A_{b,m_b}, \varphi_{Tx,b,m_b}, \vartheta_{Tx,b,m_b}, \varphi_{Rx,b,m_b}, \vartheta_{Rx,b,m_b} \}, \quad m_b = 1, \dots, M_b \quad (5.2)$$

5.3. Rumslig extrapolering

M_a och M_b är antalet utbredningsvägar för respektive mottagarposition i tidpunkterna t_a och t_b . Varje enskild fältbeskrivning t.ex. $\{\varepsilon_{a,1}, \varepsilon_{a,2}, \dots, \varepsilon_{a,M_a}\}$ har egenskaper som fördröjning τ_{a,m_a} , komplex amplitud A_{a,m_a} samt terminalernas azimut- ($\varphi_{Tx,a,m_a}, \varphi_{Rx,a,m_a}$) och elevationsvinklar ($\vartheta_{Tx,a,m_a}, \vartheta_{Rx,a,m_a}$), [10].

Terminalernas förflyttningar, s_{Tx} och s_{Rx} i figur 5.1, är hela sträckorna som sändaren respektive mottagaren förflyttar sig mellan två tidsuppdateringar och dessa beräknas såsom följer.

$$s_{Tx} = \sqrt{(x_{Tx,b} - x_{Tx,a})^2 + (y_{Tx,b} - y_{Tx,a})^2 + (z_{Tx,b} - z_{Tx,a})^2} \quad (5.3)$$

$$s_{Rx} = \sqrt{(x_{Rx,b} - x_{Rx,a})^2 + (y_{Rx,b} - y_{Rx,a})^2 + (z_{Rx,b} - z_{Rx,a})^2} \quad (5.4)$$

Vinklarna β_{Tx} respektive β_{Rx} definieras enligt figur 5.1 och beräknas enligt följande.

$$\cos(\beta_{Tx}) = \frac{(y_{Tx,b} - y_{Tx,a})}{s_{Tx}} \quad (5.5)$$

$$\cos(\beta_{Rx}) = \frac{(y_{Rx,b} - y_{Rx,a})}{s_{Rx}} \quad (5.6)$$

I RPS definieras mottagaren i form av ett kvadratisk plan och den tillhörande fältbeskrivningen är beräknad för planets mittpunkt. Vid förflyttningar, i RPS, ut från planets mittpunkt antas samma fältbeskrivning gälla för planets alla punkter. Ofta kan denna beskrivning vara tillräckligt bra, men bättre resultat kan fås genom att genomföra en interpolering. Om impulssvar, som gäller för andra punkter än mottagarens mittpunkt, ska tas fram utförs koherent interpolering. I den koherenta interpoleringen kommer mobilitetens inverkan på utbredningsvägarnas faser och fördröjningar att inkluderas i metoden. Teorin, som extra- och interpoleringen bygger på, finns beskriven i [12], [13] och sammanlagring av lösningar i [12] och [14]. En enklare form av interpolation är den inkoherenta.

5.4 Inkoherent interpolation

Vid den inkoherenta interpolationen summeras effekter. Ingen hänsyn tas till ändringen i fas eller fördröjning som uppstår under nodernas förflyttningar. Interpoleringens utgångspunkt är de fullständiga fältberäkningarna med tillhörande impulssvar som finns vid tidpunkterna t_a och t_b för scenariots noder, se figur 5.1. När noderna rör sig mellan positionerna för tidpunkterna t_a och t_b , kommer extra- och interpoleringen resultera i att den inkoherenta effekten gradvis övergår från första positionens till andra positionens. Den sammanlagrade lösningen, som gäller vid tidpunkten t , fås genom att först vikta lösningen för tidpunkten t_a med vikten C_b och lösningen vid tidpunkten t_b med C_a . Vikterna beräknas såsom följer.

$$C_a = \frac{t - t_a}{t_b - t_a} \quad (5.7)$$

$$C_b = \frac{t_b - t}{t_b - t_a} \quad (5.8)$$

Om vikterna C_a och C_b uppfyller villkoret $C_a + C_b = 1$ säkerställs att effektnivån stämmer. Vid den nya positionen för tidpunkten t summeras sedan de viktade komponenternas effekter och den inkoherenta effekten P^{inc} beräknas enligt följande.

$$P^{inc} = C_b \sum_{m_a=1}^{M_a} P_{a,m_a} + C_a \sum_{m_b=1}^{M_b} P_{b,m_b} \quad (5.9)$$

Där P_{a,m_a} respektive P_{b,m_b} är komponenternas effekter i respektive impulssvar.

5.5 Koherent interpolation

Till skillnad mot den inkoherenta interpolationen summerar koherent interpolering amplituder och tar hänsyn till ändringarna i fas och fördröjning som uppstår p.g.a. nodernas förflyttningar. Detta resulterar i att lösningarna adderas fasriktigt. Det betyder inte bara att den komplexa signalens amplitud, utan även

5.5. Koherent interpolation

utbredningsvägarnas azimut- och elevationsvinklar beaktas. För den koherenta metoden innebär extra- och interpoleringen att det sammansatta impulssvaret gradvis övergår från den första positionens impulssvar till den andra positionens impulssvar.

Varje utbredningsväg bidrar till kanalens impulssvar med en komplex signal, som har en viss amplitud, fördröjning och fas. Den koherenta interpoleringen leder till att ändringarna i gångväg modifierar impulssvaret från kanalen. Gångvägsskillnaden gör att signalens fas ändras, men också att fördröjningen för utbredningsvägarna ändras. När amplituderna summeras fasriktigt (koherent) möjliggörs interferens, vilket förmodligen innebär att den resulterande effekten kan bli såväl större som mindre än summan av komponenternas effekter. Interpoleringen delas upp i 3 steg.

Interpoleringen delas in i 3 steg

1. Lösningen ε_a extrapoleras framåt till att gälla från tidpunkten t_a till tidpunkten t .
2. Lösningen ε_b extrapoleras bakåt till att gälla från tidpunkten t_b till tidpunkten t .
3. De extrapolerade lösningarna ε_a och ε_b interpoleras (sammanlagras), vilket ger en lösning som gäller för tidpunkten t .

Steg 1. visar extrapoleringen framåt.

RPS ger vid tidpunkten t_a det beräknade impulssvaret.

$$h_a(\tau, t_a) = \sum_{m_a=1}^{M_a} A_{a,m_a} \delta(\tau - \tau_{a,m_a}) \quad (5.10)$$

Fördröjningarna i detta extrapoleras enligt geometrin som visas i figur 5.1.

$$\begin{aligned} \tilde{\tau}_{a,m_a} = \tau_{a,m_a} - C_a [& s_{Tx} \cos(\varphi_{Tx,a,m_a} - \beta_{Tx}) \cos \vartheta_{Tx,a,m_a} \\ & + s_{Rx} \cos(\varphi_{Rx,a,m_a} - \beta_{Rx}) \cos \vartheta_{Rx,a,m_a}] / c \end{aligned} \quad (5.11)$$

Analogt fås även en fasändring.

$$\alpha_{a,m_a} = -2\pi f_0 C_a [s_{Tx} \cos(\varphi_{Tx,a,m_a} - \beta_{Tx}) \cos \vartheta_{Tx,a,m_a} + s_{Rx} \cos(\varphi_{Rx,a,m_a} - \beta_{Rx}) \cos \vartheta_{Rx,a,m_a}] / c \quad (5.12)$$

Det innebär att impulssvaret i steg 1 övergår till.

$$h_a(\tau, t_a) \rightarrow h_a(\tau, t) = \sum_{m_a=1}^{M_a} A_{a,m_a} \exp(j\alpha_{a,m_a}) \delta(\tau - \tilde{\tau}_{a,m_a}) \quad (5.13)$$

Resultatet blir att när noderna i ett nodpar rör sig kommer komponenternas fördröjningar och faser att ändras. De nya fördröjningarna $\tilde{\tau}_{a,m_a}$ och fasändringen α_{a,m_a} beräknas enligt (5.11) och (5.12). Terminalernas mobilitet leder till att gångvägsskillnader uppstår. Positiv skillnad ger ökad fördröjning och negativ skillnad ger mindre fördröjning. Hur snabbt den komplexa signalens fas (för varje utbredningsväg) ändras beror på dopplerskiftet i frekvens. Förflyttning i riktning mot radiovågen ger positiv fasändring och negativ vid rörelse från radiovågen. Ljusets hastighet respektive bärvågsfrekvensen är c och f i ekvationerna. Den nya fördröjningen tillsammans med fasändringen ger ett nytt impulssvar enligt (5.13).

Steg 2. genomförs på samma sätt som steg 1, men extrapoleringen genomförs bakåt.

$$h_b(\tau, t_b) = \sum_{m_b=1}^{M_b} A_{b,m_b} \delta(\tau - \tau_{b,m_b}) \quad (5.14)$$

$$\tilde{\tau}_{b,m_b} = \tau_{b,m_b} + C_b [s_{Tx} \cos(\varphi_{Tx,b,m_b} - \beta_{Tx}) \cos \vartheta_{Tx,b,m_b} + s_{Rx} \cos(\varphi_{Rx,b,m_b} - \beta_{Rx}) \cos \vartheta_{Rx,b,m_b}] / c \quad (5.15)$$

$$\alpha_{b,m_b} = +2\pi f_0 C_b [s_{Tx} \cos(\varphi_{Tx,b,m_b} - \beta_{Tx}) \cos \vartheta_{Tx,b,m_b} + s_{Rx} \cos(\varphi_{Rx,b,m_b} - \beta_{Rx}) \cos \vartheta_{Rx,b,m_b}] / c \quad (5.16)$$

5.5. Koherent interpolation

Det innebär att impulssvaret i steg 2 övergår till.

$$h_b(\tau, t_b) \rightarrow h_b(\tau, t) = \sum_{m_b=1}^{M_b} A_{b,m_b} \exp(j\alpha_{b,m_b}) \delta(\tau - \tilde{\tau}_{b,m_b}) \quad (5.17)$$

Steg 3.

Slutligen ska de två lösningarna $h_a(\tau, t)$ och $h_b(\tau, t)$ sammanlagras och ett sätt är enligt följande.

$$h(\tau, t) = C_b h_a(\tau, t) + C_a h_b(\tau, t) \quad (5.18)$$

Resultatet blir ett sammansatt impulssvar som gradvis kommer att övergå från första positionens impulssvar till andra positionens impulssvar.

Kapitel 6

Arbetets genomförande

Kapitlet innehåller tre olika delar. Den första delen tar upp några inledande analyser som var nödvändiga att genomföra innan simuleringarna med RPS startades. Resultaten från RPS-simuleringarna användes sedan för den dynamiska extrapoleringen. Den andra delen beskriver två i examensarbetet använda scenarier. Det första scenariot var ett testscenario bestående av 4 noder vars syfte var att användas för att validera den rumsliga extrapoleringen som metod. Scenario nummer två är huvudscenariot på vilket metoden för rumslig extrapolering tillämpades. Slutligen redovisas resultat och slutsatser från undersökningarna.

6.1 Inledande analys

Innan simuleringarna med RPS startades utfördes några inledande analyser. Framst gällde analysen resultaten från RPS-beräkningar då några olika parameterinställningar användes. I inledningsskedet var det viktigt att få förståelse för hur olika parameterinställningar i RPS påverkade resultaten. Följande punkter är några av de delar som ingick i analysen, bl.a. utvärderades:

- på vilket sätt som den komplexa signalens fas definieras i RPS. Definitionen används sedan vid den rumsliga extrapoleringen.
- hur den inkoherenta effekten påverkas beroende på bärvågsfrekvensen. Följande frekvenserna ingick i analysen; 51, 250, 393, 915 och 1794 MHz.

- hur ray splitting påverkar mottagen effekt.

6.1.1 Resultat för använd faskonvention i RPS

Denna undersökning gällde vilken faskonvention som RPS använder när den elektromagnetiska vågutbredningen beräknas, dvs. fasändringen för en utbredningsvägs komplexa signal i kanalens impulssvar. Det var en grundförutsättning att känna till detta för den rumsliga extrapoleringen som metod. Undersökningen genomfördes genom att i ett antal mottagarpunkter beräkna fasen för en utbredningsväg. Resultatet visade att RPS använder notationen $\exp(+j\alpha)$, men detta gäller endast för tidigare RPS-versioner. I version 5.2.1 och senare använder RPS notationen $\exp(-j\alpha)$.

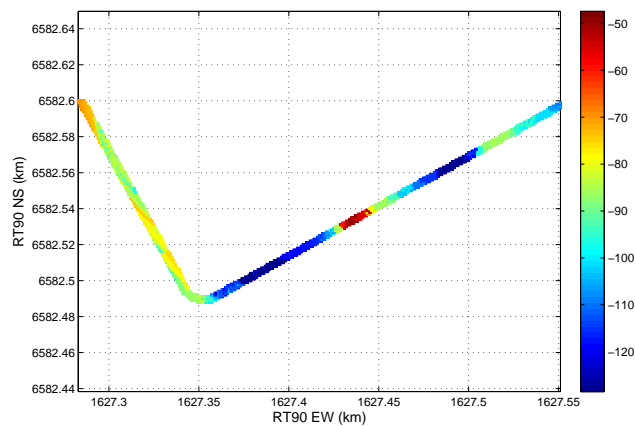
6.1.2 Bärstågfrekvens kontra inkoherent effekt

I det här momentet har resultat från ett tidigare projekt använts för att analysera hur den inkoherenta effekten påverkas när bärstågfrekvensen ändras. RPS-beräkningar från en del av en gata där ett gatuhörn passeras har valts ut för att användas i det här arbetet eftersom intressanta vågutbredningsfenomen förmodligen uppstår när gatuhörnet passeras, se figur 6.1. I scenariot finns en fast positionerad sändare lokaliserad snett till vänster ovanför gatuhörnet, och det som finns utritat i figuren är mottagarpunkter. Scenariot startar från vänster sida för att sedan passera runt ett hörn och avslutas längst till höger.

Samma parameteruppsättning har använts vid samtliga beräkningar, förutom bärstågfrekvens med tillhörande miljöparametrar. Dessa är frekvensberoende och används i RPS vid beräkningarna av radiovågors utbredning. Miljöparametrarna anges som komplexa permittiviteter, och beskriver hur mycket av radiovågen som leds samt absorberas av olika material vid en viss frekvens. Följande frekvenser har använts; 51, 250, 394, 915 och 1794 MHz. De tre första ligger i militära frekvensband och de två sista ligger nära frekvenser som används för mobiltelefoni. Huvudanledningen till att just dessa frekvenser valdes var att det redan fanns framtagna RPS-beräkningar för dessa frekvenser.

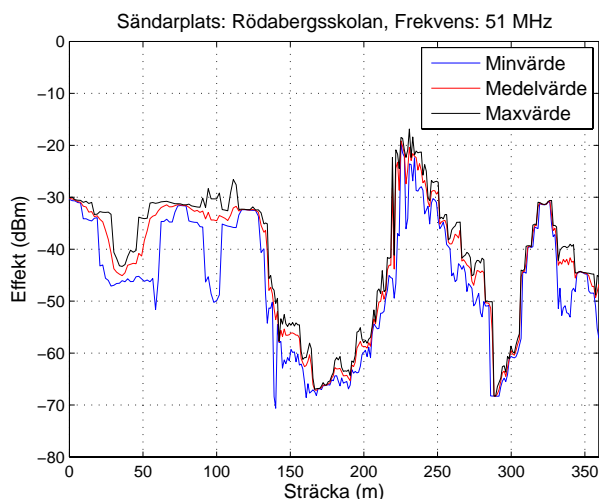
I figurerna 6.2 till 6.6 visas resultatet. I figurerna visas den inkoherenta effekten dels medelvärdesbildad över vertikala snitt, samt lägsta och högsta nivån för respektive snitt. Metoden för den inkoherenta interpoleringen finns beskriven i avsnitt 5.4.

6.1. Inledande analys



Figur 6.1: Figuren visar en del av scenariot. Mottagarpunkterna (gäller för RPS-beräkningarna, under mätningarna var mottagaren mobil) är lokaliserade runt ett gatuhörn. Resultatet gäller för frekvensen 1794 MHz. Varje punkt är färgkodad med avseende på vilken effektnivå som detekterats.

När gatuhörnet passerats uppstår intressanta vågutbredningseffekter och detta syns tydligt i figur 6.2 - 6.6. En kraftig minskning av effektnivån ses när gatuhörnet passerats. Det beror på att det blir svårare för radiovågen att nå mottagarna då byggnader skymmer direktvågen. Beteendet gäller för samtliga undersökta frekvenser. RPS använder miljöparametrar som har stor inverkan på radiovågen vid bl.a. reflektioner på objekt, och eftersom dessa är anpassade för vald bärvågsfrekvens kommer vågutbredningen i RPS även att vara anpassad till vald frekvens. Detta kan tydligt ses i figurerna 6.2 - 6.6 eftersom de i stort sett har samma utseende. Skillnaderna ses huvudsakligen i effektivåren för frekvenserna, beroende på att högre frekvenser dämpas mer. För några positioner saknas värden helt, det gäller speciellt för frekvenserna över 394 MHz, och det beror på att mottagarna inte har kunnat ta emot någon signal. Antingen har ingen signalkomponent träffat mottagaren eller har komponentens effekttinhåll varit för låg för att kunna detekteras. Detektionsnivån anges i RPS som mottagarens känslighet, vilket är tröskelvärdet för när en beräkning på en utskickad stråle i



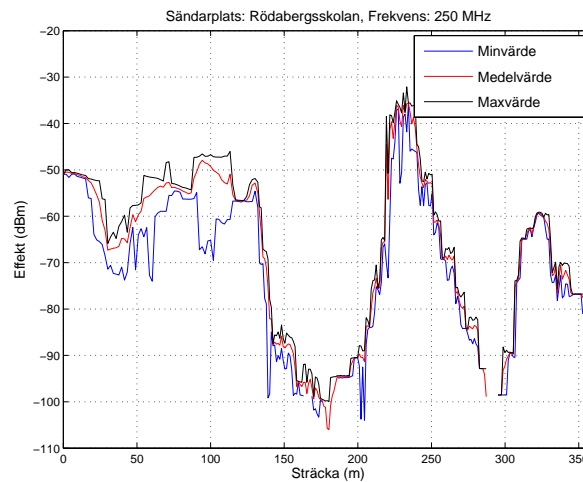
Figur 6.2: I figuren visas inkoherent effekt dels medelvärdesbildad över vertikala snitt, men även lägsta och högsta nivån för respektive snitt visas. Beräkningen gäller för 51 MHz. Mottagarna är utplacerade utefter en ca 350 meter lång sträcka.

RPS ska avslutas, se kapitel 4.

6.1.3 Ray splitting i RPS

Ray splitting är en parameter som används av ray tracing-algoritmen i RPS. Den avgör ifall det är tillåtet eller inte för det utskickade strålknippen att dela upp sig när den träffar objekt. I RPS går det även att ange hur stor basytan på en strålen maximalt får bli vid beräkningarna, innan strålen delas upp i flera strålar. Om ray splitting tillåts vid RPS-beräkningar kommer beräkningstiden och antalet strålar som måste följas att öka markant. Ray splitting innebär även att sannolikheten ökar för att kanalen ska bli reciprok, eftersom chansen ökar för att strålar kan få samma gångväg oberoende av om startpunkten är sändaren eller mottagaren.

Om ray splitting inte används blir det svårare för strålknippenets mittenstråle och hörnstrålar att samtidigt träffa objekt. Det gör att strålar inte kan reflekteras och diffrakteras lika ofta som när ray splitting används. I kapitel 3 beskrivs på vilket sätt ett strålknippe måste träffa ett objekt för att träffen ska kunna



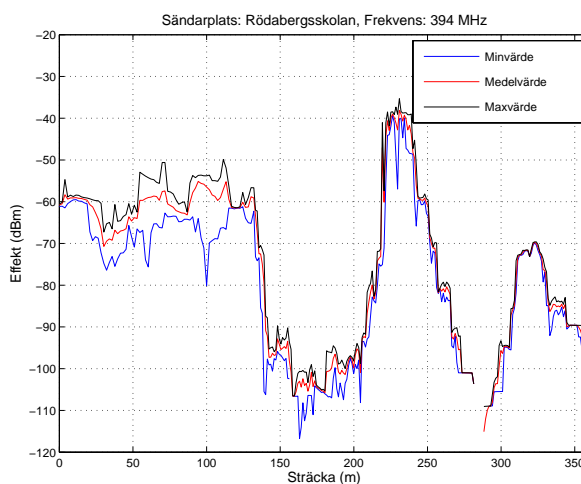
Figur 6.3: I figuren visas inkoherent effekt dels medelvärdesbildad över vertikala snitt, men även lägsta och högsta nivån för respektive snitt visas. Beräkningen gäller för 250 MHz. Mottagarna är utplacerade utefter en ca 350 meter lång sträcka.

detekteras.

Under en stråles gångväg blir dess basyta större, vilket ofta leder till att fler mottagare än annars träffas av samma stråle. Det leder till att den mottagna effekten i en mottagarpunkt blir för hög. Skillnaden då ray splitting används respektive inte används har i undersökningen visat sig bli ca 0.5 - 2 dB.

6.2 Litet testscenario med 4 noder

Innan den rumsliga extrapoleringen testades på ett litet scenario utvärderades några olika parametrar för samma scenario. Scenariot bestod av 4 noder med totalt 6 länkar, scenariot visas i figur 6.7. Nodernas rörelsemönster valdes för att undersöka effekterna på vågutbredningen vid några intressanta förflyttningar. Efter en RPS-beräkning flyttades noderna till nästa position i deras rörelsemönster och en ny beräkning genomfördes. Sammanlagt genomfördes 102 stycken beräkningar. I varje position erhöles kanalens impulssvar för scenariots samtliga

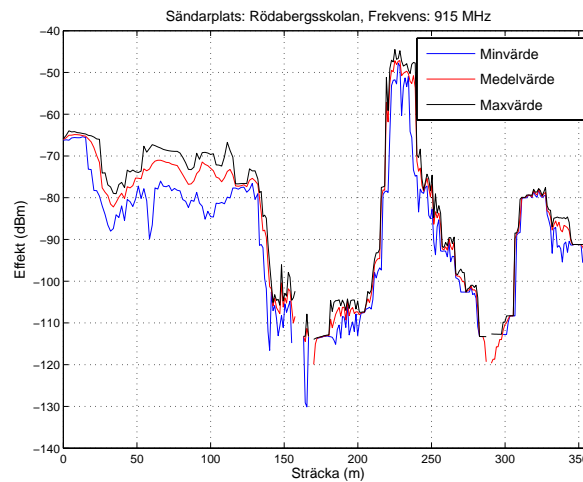


Figur 6.4: I figuren visas inkoherent effekt dels medelvärdesbildad över vertikala snitt, men även lägsta och högsta nivån för respektive snitt visas. Beräkningen gäller för 394 MHz. Mottagarna är utplacerade utefter en ca 350 meter lång sträcka.

länkar. Några parametervärden som användes i beräkningarna finns redovisade i tabell 6.1. Alla noder i scenariot antas röra sig med konstant hastighet under förflyttningen mellan två positioner. Däremot har de inte samma hastighet vid alla förflyttningar.

I scenariot befinner sig noderna 1 och 2 maximalt ca 40 meter från varandra och i figur 6.7 ses att de har fri sikt i förhållande till varandra. Mottagna effektnivåer för nodparet d.v.s. inkoherent och koherent effekt visas i figur 6.8. I figuren ses en effekttökning efter att ca 60 s har passerat av scenariot. Detta sker då nod 2 når gathörnet. Ett annat exempel är effektnivåerna för nodpar 3 - 4, som under scenariot befinner sig ca 160 - 250 m från varandra. Dessa noder har inte fri sikt till varandra och i figur 6.9 ses detta genom att den mottagna effekten kraftigt varierar under scenariots gång. Samtliga avståndsintervall mellan nätets noder under scenariot finns beskriven i tabell 6.2.

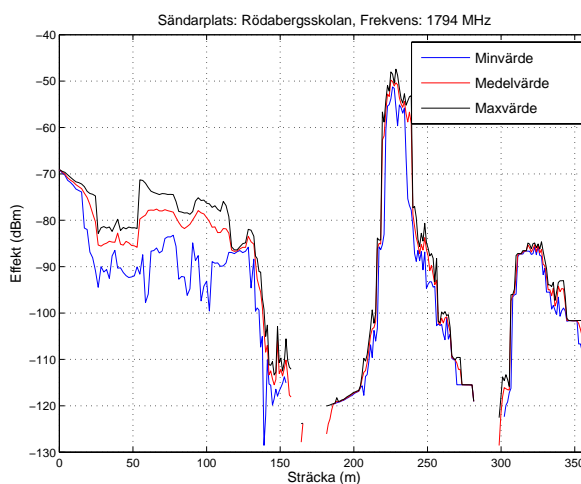
Utifrån RPS-beräkningarna i respektive mottagarpunkt beräknades den koherenta och den inkoherent mottagna effekten. Den inkoherenta effekten inne-



Figur 6.5: I figuren visas inkoherent effekt dels medelvärdesbildad över vertikala snitt, men även lägsta och högsta nivån för respektive snitt visas. Beräkningen gäller för 915 MHz. Mottagarna är utplacerade utefter en ca 350 meter lång sträcka.

håller inte fasinformation vilket den koherenta effekten gör. I figur 6.8 till 6.10 visas exempel på resultat. Resterande resultat från beräkningarna av inkoherent och koherent effekt finns i appendix, A.1 - A.3. Den inkoherenta effekten, representeras i figurerna med en tjock linje, har ett jämnare utseende. Detta är som det ska eftersom den inkoherenta interpoleringen inte tar hänsyn till fasändringens inverkan. Däremot fluktuerar nivån för den koherenta effekten, representeras av en tunn linje i figurerna. Fluktueringen beror på den snabba fädningen. I det koherenta fallet skiljer det 3 dB i effektnivå vilket beror på fasändringens inverkan.

Det är även intressant att undersöka ifall resultatet från RPS ger en kanal som är reciprok. Reciprocitet innebär att resultatet ska bli lika i respektive mottagarpunkt oberoende av vilken av noderna i ett nodpar som för tillfället är sändare. Exempelvis har nodparet 1 - 2 fri sikt till varandra under scenariots gång, och de befinner sig ca 10 - 40 meter från varandra. Eftersom de har fri sikt till varandra uppfylls reciprociteten väl. Detta kan tydligt ses i figur 6.8. Om



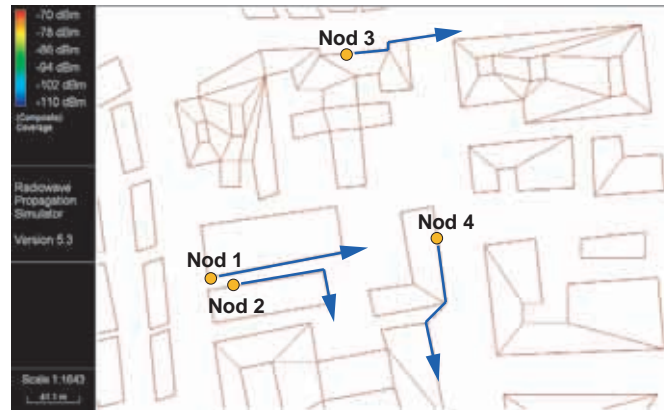
Figur 6.6: I figuren visas inkoherent effekt dels medelvärdesbildad över vertikala snitt, men även lägsta och högsta nivån för respektive snitt visas. Beräkningen gäller för 1794 MHz. Mottagarna är utplacerade utefter en ca 350 meter lång sträcka.

ett nodpar inte har fri sikt till varandra och dessutom befinner sig längre bort från varandra minskar kanalens reciprocitet. Kanalen för nodparet 2 - 3 är ett sådant exempel då kanalen inte blir reciprok, se figur 6.10. Nodparet befinner sig 185 - 220 meter från varandra och det finns hus mellan dem som hindrar direktvågen. I intervallet mellan 25 - 60 sekunder efter scenariots start är det stor skillnad beroende på vilken nod som är sändare, det gäller både inkoherent och koherent effekt och som mest skiljer det 30 dB. Det är inte uppenbart att reciprocitetsvillkoret uppfylls med ray-launching. Det skulle krävas att precis samma strålar hittades oberoende av vilken av terminalerna som sänder ut dem. Resultatet beror också på hur parametrarna har valts dvs. om ray splitting tillåts, hur geometrin ser ut etc.

6.2.1 Ett mått på kanalens påverkan

I litteraturen finns många olika mått beskrivna som används för att kvantifiera hur kanalen påverkar ett radiosystem. Ett av dem är fördröjningsspridning-

6.2. Litet testscenario med 4 noder



Figur 6.7: Figuren visar testscenarioet i RPS som användes för att utvärdera metoden för den rumsliga extrapoleringen. Scenarioet bestod av 4 noder vilka förflyttar sig längsmed huskropparna i pilarnas riktningar.

Tabell 6.1: Parametrar för testscenarioet.

Parametrar för scenarioet	
Uteffekt	33 dBm
Bärvågsfrekvens (f_c)	300 MHz
Antennvinst	0 dB
Bandbredd (B)	10 MHz
Impulssvarets längd	$5\mu s$

en, vilket brukar benämnas som rms delay spread eller rms tidsspridning (där rms står för root-mean-square). Fördröjningsspridningsmättet anger hur mycket kanalen sprider den utsända signalen i frekvens och i tid. Ju högre värde på fördröjningsspridningen desto mer frekvensselektivt fädande är kanalen.

Fördröjningsspridningen beräknas såsom följer.

$$[h]\sigma_\tau = \sqrt{\overline{\tau^2} - (\overline{\tau})^2} \quad (6.1)$$

Medelfördröjningen $\overline{\tau}$ respektive medelvärdet av fördröjningen i kvadrat $\overline{\tau^2}$ beräknas enligt följande.

Tabell 6.2: Avstånd mellan testscenariots nodpar.

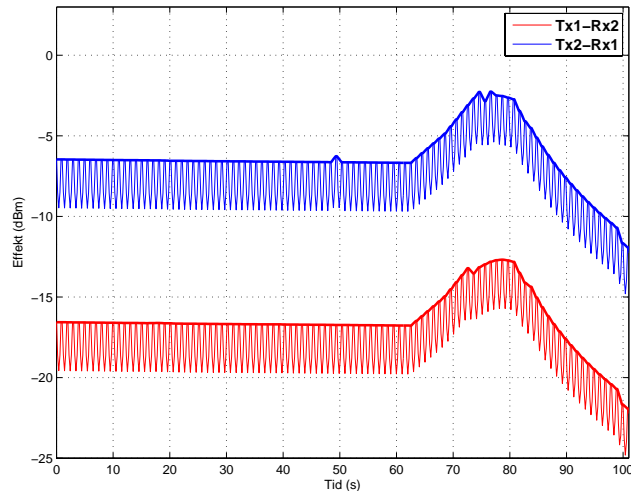
Nodpar	Avstånd (m)
1 - 2	10 - 40
1 - 3	180 - 200
1 - 4	100 - 170
2 - 3	185 - 220
2 - 4	90 - 155
3 - 4	160 - 250

$$[h]_{\bar{\tau}} = \frac{\sum_m |A_m|^2 \tau_m}{\sum_m |A_m|^2} \quad (6.2)$$

$$[h]_{\bar{\tau}^2} = \frac{\sum_m |A_m|^2 \tau_m^2}{\sum_m |A_m|^2} \quad (6.3)$$

A_m är den komplexa amplituden och τ_m är fördröjningen för komponent m i impulssvaret. Fördröjningsspridningen kan användas för att avgöra hur hög dataakt ett kommunikationssystem kan använda på en viss kanal. Oftast innebär en större spridning att systemets dataakt måste sänkas, eftersom en frekvensselektivt fädande kanal orsakar intersymbolinterferens, ISI. Som en tumregel för hur mycket fördröjningsspridning ett system kan tolerera används ofta $0.1/\sigma_\tau$, [15]. Fördröjningsspridningen får då maximalt vara en tiondel av symboltiden. Tumregeln kan också användas för att bestämma om ett radiosystem behöver använda en kanaltjämnare eller inte. Utjämnaren används för att motverka fördröjningsspridningens påverkan på signalen.

I tabell 6.2 på sidan 50 visas avståndsintervallen mellan testscenariots noder och i tabell 6.3 ovan finns fördröjningsspridningen för respektive nodpar. Exempelvis har nodparet 1 - 2 lägst nivå på fördröjningsspridningen. Det beror på att de har fri sikt till varandra under scenariots gång och att avståndet mellan dem är kort. Ett exempel som visar det motsatta förhållandet är för nodparet 3 - 4. Kanalen för detta nodpar orsakar mest flervägsutbredning, vilket nivån på

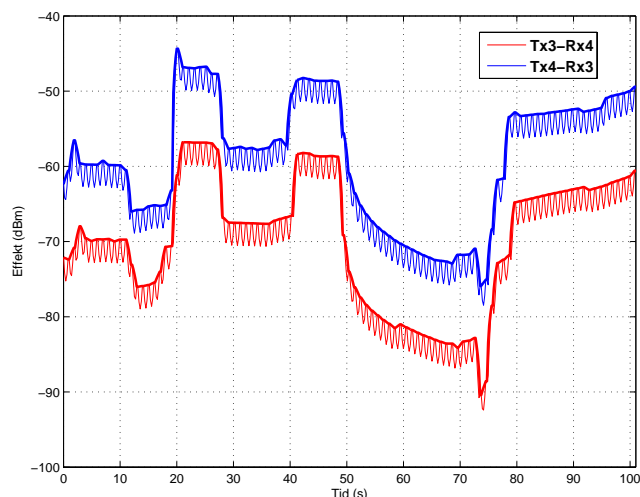


Figur 6.8: Visar beräknad koherent (tunn linje) och inkoherent effekt (tjock linje) för nodpar 1 - 2. Effekten är beräknad för båda fallen då nod 1 eller nod 2 är sändare, och för att kunna skilja på kurvorna har 10 dB adderats till effektnivån då nod 2 är sändare.

fördröjningsspridningen visar. Intervallet för nodparets fördröjningsspridningen är större än för restreterande nodpar. Det beror på att vid vissa tidpunkter finns en dominerande väg mellan noderna, men i andra delar av scenariot orsakar kanalen kraftig flervägsutbredning. Speciellt när nod 4 passerar runt hörnet på ett hus hindras radiovägen att ta sig mellan noderna, se figur 6.7. Eftersom det inte finns några typiska värden på fördröjningsspridningen för 300 MHz i urban miljö är det svårt att värdera resultaten på fördröjningsspridningen.

6.2.2 Inkoherent och koherent effekt

I kapitel 5 definieras inkoherent och koherent interpolering. Den huvudsakliga skillnaden mellan metoderna är att den koherenta interpoleringen tar hänsyn till ändringen i fas och fördröjning som uppstår på grund av nodernas förflyttningar. Det gör inte den inkoherenta interpolationen.



Figur 6.9: Visar beräknad koherent (tunn linje) och inkoherent effekt (tjock linje) för nodpar 3 - 4. Effekten är beräknad för båda fallen då nod 3 eller nod 4 är sändare, och för att kunna skilja på kurvorna har 10 dB adderats till effektnivån då nod 4 är sändare.

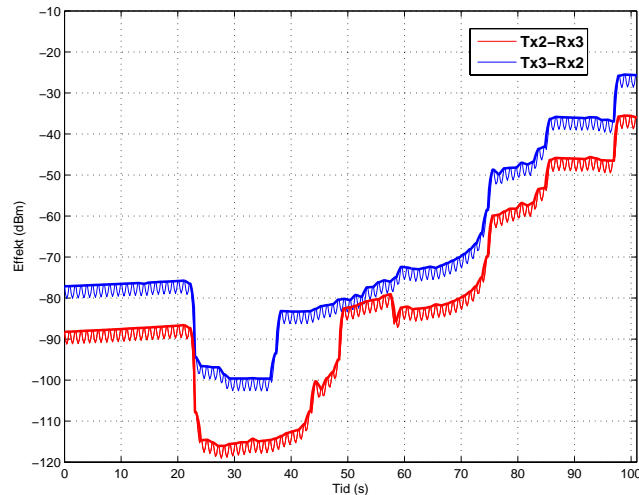
I figur 6.8 på sidan 51 och 6.9 på sidan 52 visas inkoherent och koherent effekt för nodparen 1 - 2 och 3 - 4. Resultaten för nodparen är utvalda eftersom kanalen för nodpar 1 - 2 hade lägst nivå på fördröjningsspridningen respektive högst nivå för nodparet 3 - 4. Graferna med tjocka linjer visar den inkoherenta effekten och de med tunna linjer visar den koherenta effekten. Resultaten för båda sändningsriktningarna plottas i samma figur för att analysera RPS-beräkningarnas recipitet.

6.3 Extrapoleringen som metod

6.3.1 Fasinformation för utbredningsvägar i impulssvaret

I kapitel 5 beskrivs den rumsliga extrapoleringen som metod. I metoden används två impulssvar, där respektive tillhör en viss position. I testscenariot rör

6.3. Extrapoleringen som metod



Figur 6.10: Visar beräknad koherent (tunn linje) och inkoherent effekt (tjock linje) för nodpar 2 - 3. Effekten är beräknad för båda fallen då nod 2 eller nod 3 är sändare, och för att kunna skilja på kurvorna har 10 dB adderats till effektnivån då nod 3 är sändare.

sig de fyra noderna efter givna rörelsemönster, se figur 6.7. RPS-beräkningar är framtagna för positioner, vilka följer det givna rörelsemönstret. Extrapoleringen innebär att två RPS-lösningar extrapoleras till en utvald mellanliggande punkt. Därefter sammanlagras de extrapolerade lösningarna för att få en viktad lösning som gäller för den utvalda punkten. Den viktade lösningen $h(\tau, t)$ kan därmed få fler utbredningskomponenter än $h_a(\tau, t)$ och $h_b(\tau, t)$ ursprungligen innehåller. Det beror på att interpoleringen genomförs utan att utbredningsvägarnas fördröjningar beaktas. I verkligheten när en radiomottagare tar emot flera komponenter under en period T , där T beror på mottagarens bandbredd, adderas dessa komplext till en signalkomponent. De ursprungliga komplexa signalkomponenternas fasinformation går därmed förlorad. I RPS går det att spara informationen i ett impulssvar på två sätt, utan att radiomottagarens bandbredd ska påverka resultatet. Informationen om alla signalkomponenter som har detekterats kan lagras. Om radiomottagarens bandbredd ska beaktas i RPS, innebär det

Tabell 6.3: Visar intervallen för fördröjningsspridningen för testscenariots nodpar.

Nodpar (m)	Fördröjningsspridning (ns)
1 - 2	20 - 85
1 - 3	25 - 385
1 - 4	20 - 630
2 - 3	30 - 420
2 - 4	65 - 410
3 - 4	5 - 850

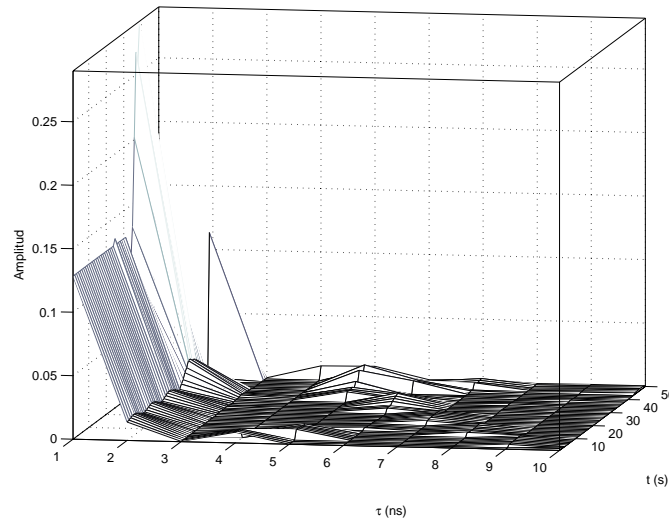
att alla signalkomponenter som detekteras under tiden T adderas komplext och den resulterande signalkomponenten tilldelas samma vinkelinformation, DoD och DoA, som signalkomponenten med starkast amplitud har.

Vid extrapoleringen tas hänsyn till terminalernas förflyttning med avseende på förflyttad sträcka alternativt hur lång tid en förflyttning tar. Extrapoleringen genomförs ett antal gånger per våglängd under en förflyttning, beroende på om det slutliga resultatet ska innehålla den finskaliga fädningen eller inte. Cirka 6 gånger per våglängd har visat sig vara fullt tillräckligt. Den rumsliga extrapoleringen för testscenariots noder utförs med avseende på hur ofta kanalen behöver uppdateras.

6.3.2 Jämförelse mellan extrapolering och RPS-beräkning

Kvalitén på den rumsliga extrapoleringen analyseras bl.a. genom att jämföra två impulssvar för samma kanal. Det första impulssvaret är beräknat med RPS och det andra är ett impulssvar framtaget med rumslig extrapolering med utgångspunkt från två RPS-beräkningar. Detta har utförts på följande sätt: tre efterföljande positioners RPS-beräkningar har valts ut. Kalla mittenpositionen för B. RPS-beräkningen som gäller för position B jämförs mot det extrapolerade resultatet som gäller för samma position. Vid extrapoleringen används RPS-beräkningarna för positionerna innan respektive efter positionen B. Slutligen har de två impulssvaren jämförts.

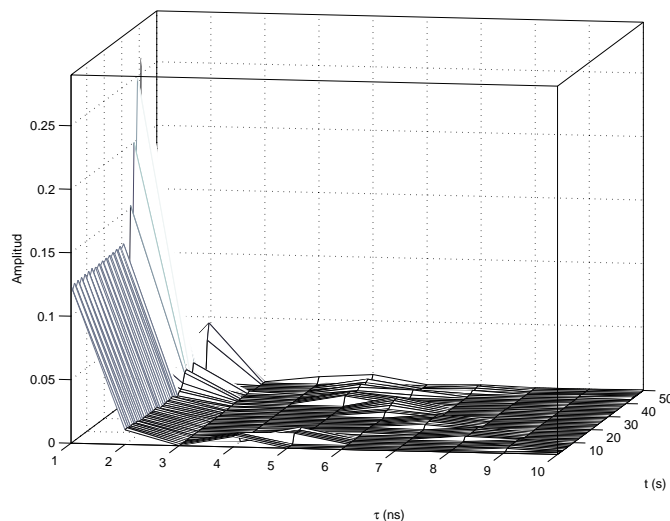
Figur 6.11 visar ett RPS-beräknat impulssvar och figur 6.12 visar det extrapolerade impulssvaret. Båda visar resultaten för nodpar 1 - 2 och för exakt samma positioner. Noderna befinner sig på en öppen gata, vilket leder till liten



Figur 6.11: RPS-beräknade impulssvar i mottagare etts positioner från sändare tvås positioner under scenariot. X-axeln visar fördröjningen $\tau(ns)$ för utbredningskomponenter. Y-axeln visar tiden $t(s)$ för när kanalen uppdateras. Z-axeln visar impulssvarets amplitud.

flervägsutbredning, och impulssvaret innehåller få signalkomponenter.

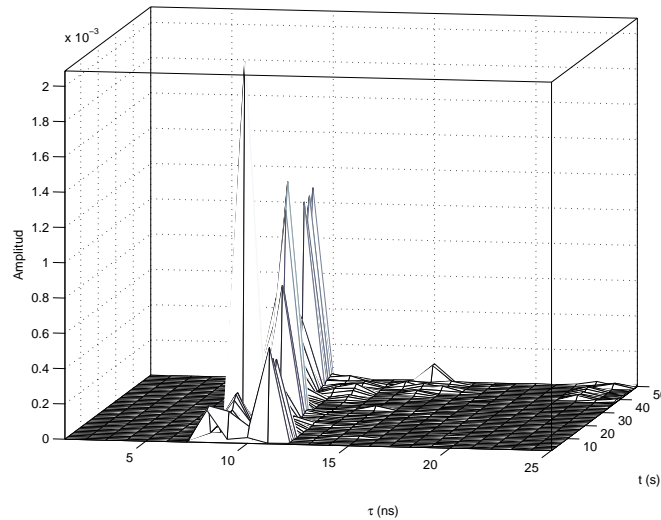
Resultaten från extrapoleringen samt RPS-beräkningen stämmer väl överens förutom att amplituden i det extrapolerade impulssvaret är lägre än impulssvaret från RPS. Amplitudskillnaden beror bl.a. på viktningens inverkan på interpoleringen, men också på att det extrapolerade resultatet i jämförelsepositionen B är en mellanliggande punkt. Ett annat exempel på resultat från den rumsliga extrapoleringen är impulssvaret för nodparet 3 - 4, se figur 6.13 och 6.14. Resultatet visar också i detta fall att den största skillnaden mellan det extrapolerade resultatet och det RPS-beräknade resultatet är amplitudnivån. Resultaten för resterande noder finns samlade i appendix B på sidan 71.



Figur 6.12: Figuren visar extrapolerade impulssvar för nodpar 1 - 2. Dessa gäller i exakt samma positioner som de RPS-beräknade vilka visas i figur 6.11.

6.4 Beskrivning av huvudscenariot

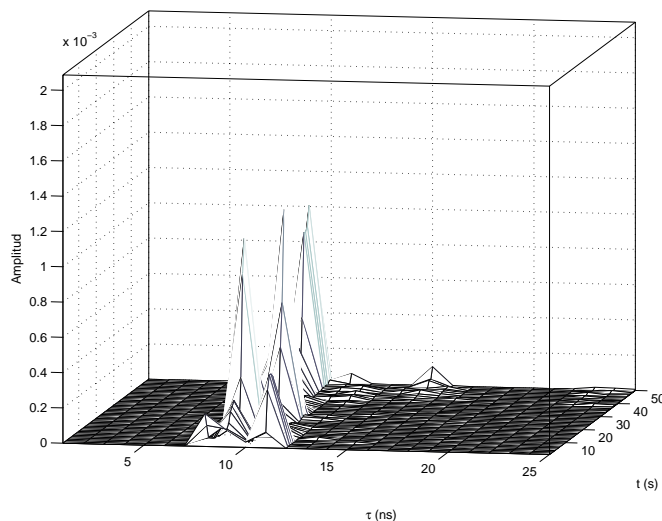
Ett tydligt krav som finns på det militära kommunikationssystemet är att kunna leverera rätt information i rätt tid. Eftersom kraven på systemet ökar när det används i komplexa miljöer är det betydelsefullt att undersöka radiovågans utbredning i sådana miljöer. Speciellt viktigt är det för system som använder ad hoc-nät, se [16]. Ad hoc-nät är tillfälliga nät som är oberoende av fast infrastruktur i form av basstationer, och därför krävs ingen förplanering av nätet. Ad hoc-nät behöver kunna anpassa sig dynamiskt efter varierande användarbehov, terräng och kommunikationsflöde. Nätet är också självorganiserande, vilket betyder att länkar upprättas mellan nätets noder när det är möjligt. Genom att nätet styrs genom distribuerad styrning, har alla noder samma förmåga till att styra trafiken i nätet. Det gör att nätet inte blir lika känsligt för att delar av nätet slås ut. Om en nod slås ut, kommer informationen att förmedlas via andra noder genom s.k. flerhoppskommunikation. Det cellbaserade nätet är mer sårbart än ett ad hoc-nät eftersom all information måste passera en central styrenod innan den



Figur 6.13: RPS-beräknade impulssvar i mottagare fyra positioner från sändare tres positioner under scenariot. X-axeln visar fördröjningen τ (ns) för utbredningskomponenter. Y-axeln visar tiden t (s) för när kanalen uppdateras. Z-axeln visar impulssvarets amplitud.

når mottagaren. Exempel på ad hoc-nät är framtida s.k. bilnätverk, och exempel på cellbaserade nät är de fasta mobiltelefoninäten.

Nedan följer en kort beskrivning av huvudscenariot, i vilket metoden för inkoherent mottagen effekt har implementerats, se [17]. I huvudscenariot är noderna sammanlänkade enligt ad hoc-nät princip. Scenariot beskriver en realistiskt händelse i urban miljö, dvs. en situation där oroligheter har pågått under en längre tid. Mitt i staden byggs en kompanicamp upp, och från den sänds grupper ut för att söka samt patrullera igenom staden. Under tiden som grupperna rör sig genom staden krävs det att grupperna kan upprätthålla kontakten med kompanicampen. Metodiken för hur grupperna söker igenom staden på kallas för urban swarm, vilket innebär att grupperna ska röra sig fritt och oregelbundet mot en bestämd punkt. Gruppernas rörelsemönster ska göra det svårare för omgivningen att förutse vilken väg grupperna kommer att ta. I det här examensarbetet används gruppernas, bestående av fotsoldater, positionern från deras rörelse-



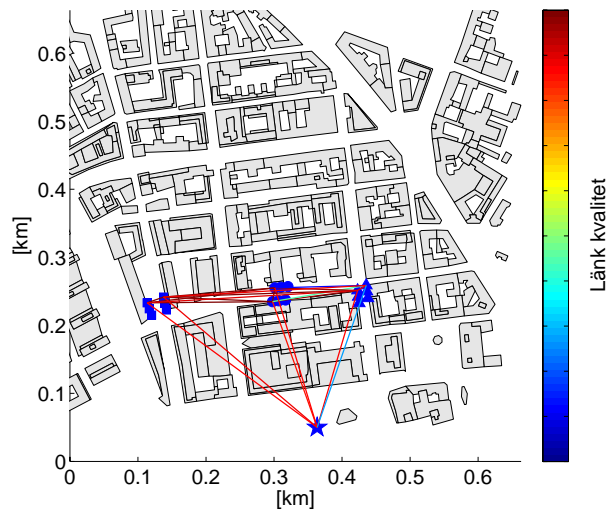
Figur 6.14: Figuren visar extrapolerade impulssvar för nodpar 3 - 4. Dessa gäller i exakt samma positioner som de RPS-beräknade vilka visas i figur 6.13.

mönster för att beräkna kanalens impulssvar. Resultatet från RPS-beräkningarna används sedan för att beräkna transmissionsförlusten för länkarna i nätet. Transmissionsförlusten beräknas med resultat från den inkoherenta interpoleringen. Resultaten uppdateras i tidpunkterna $t_n = t_0 + nt_s$, där t_s avser tidsåtgången mellan uppdateringarna. I huvudscenariot ska uppdateringen ske 1 ggr/s. Transmissionsförlusten kan beskrivas i matrisform med L .

$$L_{kl}[n] = \begin{pmatrix} - & L_{1,2} & - & L_{1,K} \\ - & - & L_{2,3} & L_{2,K} \\ - & - & - & L_{K-1,K} \\ - & - & - & - \end{pmatrix} \quad (6.4)$$

Index k och l anger vilket nodpar transmissionsförlusten gäller och n anger tidpunkten. Transmissionsförlustmatrisen kan användas vid simuleringar både med Aquarius och OPNET, se kapitel 2. I huvudscenariot används transmissionsförlusten som kriterie för att avgöra om en länk existerar mellan ett visst nodpar, och om så är fallet bestäms vilken datatakt som är möjlig. I figur 6.15

visas ett exempel på nätets kvalité, möjlig datatakt, länkarna i nätet kan ha. I figuren ses 4 grupper, där stjärnsymbolen visar var kompanicampen finns. De tre andra grupperna, vilka patrullerar och genomsöker staden, finns också utmarkerade. Figuren visar en tidpunkt i scenariot då två av tre grupper har mycket god länkvalite (röd linje visar god kvalité) till kompanicampen och en fotsoldat i den tredje gruppen längst till höger i figuren har sämre förbindelse (visas med blå linje) än övriga.



Figur 6.15: Figuren visar ett exempel på (700 s efter scenariots början) vilken kvalite, i form av datatakt, länkarna har mellan nätet noder. Färgkodningen visar möjlig datatakt på länkarna (blått är lägst datatakt och mörkrött högst datatakt).

Kapitel 7

Sammanfattning och resultat

Ett mål med examensarbetet har varit att beskriva nödvändig teori för att genomföra en dynamisk simulering från en statisk simulering med RPS. Kanalens impulssvar som är beräknade med RPS gäller bara för stationära terminaler, därför måste dessa modifieras för att de ska gälla när terminalerna rör sig. Tidigare har liknande arbete utförts, men i dessa fall har endast en av terminalerna varit mobila. Ofta används kanalmodeller som bygger på enkelstuds i dessa arbeten, till skillnad mot det här arbetet där beräkningar med ray tracing har använts. Slutligen har metoden för den dynamiska simuleringen implementerats för ett relativt enkelt scenario.

Resultaten från huvudscenariot presenteras i form av länkkvalite mellan nätets noder, och i avsnitt 6.4 visas ett resultatexempel.

7.1 Inledande analyser

Innan simuleringarna med RPS startades var det nödvändigt att genomföra några inledande analyser.

Med resultat från RPS-beräkningar undersöktes hur RPS beräknar den komplexa signalens fas för en utbredningsväg i kanalens impulssvar. Det var en grundförutsättning inför den rumsliga extrapoleringen att känna till detta. Resultatet gav att $\exp(+j\alpha)$ används i RPS, och därför används samma definition i fortsättningen när kanalens impulssvar modifieras i den rumsliga extrapoleringen. Detta gäller endast för tidigare versioner av RPS. För version 5.2.1 och

senare använder RPS notationen $\exp(-j\alpha)$.

Bärvågsfrekvens kontra mottagen effekt undersöktes också. Effekten beräknades med inkoherent interpolering. I analysen användes RPS-beräkningar för bärvågsfrekvenserna 51, 250, 394, 915 och 1794 MHz. I och med att miljöparametrarna gör så att vågutbredningen blir anpassad till frekvensen, blir resultaten liknande för de undersökta frekvenserna. Det som skiljer dem åt är effektnivåerna, vilket är naturligt eftersom högre frekvenser dämpas mer av kanalen.

Slutligen undersöktes vilken inverkan ray splitting hade på den mottagna effekten. Ray splitting tillåter att strålknippen kan dela sig när de träffar objekt. Om splitting används visar resultaten att kanalen är mer reciprok än om ray splitting inte används. När strålar tillåts delas är det mer sannolikt att strålen kan ta samma gångväg oberoende av strålens startpunkt. Kanalen blir oberoende av vilken i ett nodpar som är sändare. När splitting inte används kommer basen på en stråle att träffa fler mottagare än annars vilket gör att mottagen effektnivå blir högre. Skillnaden i mottagen effekt, med och utan ray splitt, har i analysen blivit ca 0.5 - 2 dB.

7.2 Analys av resultat från testscenariot

Efter utvärdering av den inledande analysen implementerades ett litet scenario bestående av 4 noder. Scenariot syftade till att användas för validering av den rumsliga extrapoleringen som metod. Några av resultaten användes för att jämföra beräknad koherent och inkoherent mottagen effekt. Även dessa resultat uppvisade reciprocitet. För terminaler som befinner sig nära varandra, och har fri sikt, är kanalen mer reciprok än i de fallen då de befinner sig långt ifrån varandra. Speciellt när det finns många hus, eller andra objekt, mellan dem. För ett nodpar skilde resultaten betydligt beroende på vilken av noderna som var sändare. En anledning till detta var att ray splitting inte tilläts och för detta nodpars kanal hade det stor påverkan på kanalens reciprocitet.

Fördröjningsspridningen används ofta för att kvantifiera hur kanalen påverkar ett kommunikationssystem. Fördröjningsspridningen beräknades för testscenariots noder och resultaten finns sammanställda i tabell 6.3. Typiska värden för fördröjningsspridningen i stadsmiljö finns rapporterade i tidigare arbeten, men inte för 300 MHz. Resultaten på fördröjningsspridningen i det här arbetet kan ändå ge vilka nivåer som kan förväntas för liknande scenarion.

Inkoherent och koherent effekt har undersökts för två olika nodpar i scenariot, nodparet 1 - 2 och nodparet 3 - 4. Dessa par valdes för att de hade minst respektive störst värde på fördröjningsspridningen. Det går att se tydliga skillnader, mellan metoderna för att beräkna inkoherent och koherent effekt. Den inkoherenta effektnivån visar en mjuk kurva och dessutom blir resultaten mycket lika oberoende av vilken av terminalerna i nodparet som är sändare. När beräkningen även tar hänsyn till fasändringarna fluktuerar effektnivån betydligt mer, vilket är som det ska. Vid simuleringar är det vanligt att anta att nivån på den mottagna effekten är konstant tills nästa uppdatering. I verkligheten är så inte fallet, speciellt inte för mobila terminaler. Mellan två uppdateringar kan det bli så att mottagaren inte detekterar någon signal.

7.3 Extrapoleringen som metod

Extrapoleringen har genomförts för positioner beroende på hur terminalerna rör sig. Lösningarna som finns i tidpunkterna t_a och t_b ska extrapoleras till att gälla för tidpunkten t . Dessa lösningar sammanlagras sedan. I en verklig mottagare kommer alla komponenter i impulssvaret som hamnar inom samma tidlucka att adderas. I RPS hanteras detta genom att fasinformationen för komponenten med starkast amplitud sparas. Det går att komma runt problemet genom att spara alla komponenter var för sig, men det är mer minneskrävande att göra så.

Resultatet från den rumsliga extrapoleringen har jämförts med RPS-beräkningar, där båda gäller för samma tidpunkt. När resultaten har jämförts har dessa överensstämmt. Däremot skiljer amplitudnivåerna för de extrapolerade och de RPS-beräknade impulssvaren. Skillnaden beror mest på att det extrapolerade impulssvaret gäller för en mellanliggande punkt mellan två RPS-beräkningar.

7.4 Huvudscenariot

Metoden för den dynamiska simuleringen implementerades i huvudscenariot. RPS användes för att beräkna kanalens impulssvar mellan alla noder i ett ad hoc-nät. Dessa användes sedan för att beräkna den inkoherent mottagna effekten som sedan användes för att ta fram transmissionsförlusterna mellan nätets noder. Resultaten från beräkningarna kan användas för nätsimuleringar med Aquarius eller OPNET, se kapitel 2. I scenariot användes transmissionsförlusten för att

avgöra ifall länkar existerar mellan nätets noder, och om så är fallet bestäms även vilken högsta datatakt som kan användas på respektive länk.

Kapitel 8

Fortsatt arbete

Implementering av metoden i RPS

Instutionen för Informationsöverföring har endast haft tillgång till en RPS-licens och därför har det för examensarbetet varit svårt att få tillgång till programmet i tillräcklig omfattning. Det beror på att RPS har använts flitigt för andra simuleringar. Användningen av programmet styrs av en hårdvarunyckel vilket gör det omöjligt att använda programmet (med samma licens) på två olika datorer samtidigt. I examensarbetet har det ofta varit önskvärt att på en dator kunna studera resultaten från en simulering samtidigt som programmet används på en annan. Detta har inte varit möjligt och om det ska bli möjligt vore det bra att utöka antalet RPS-licenser på instutionen.

I dagsläget tas ingen hänsyn till hur terminalers mobilitet påverkar kanalens impulssvar när dessa beräknas av RPS. Det är relativt enkelt att lägga till moduler till RPS och därför är det lämpligt att infoga en modul som gör en dynamisk beräkning.

Undersöka flervägsutbredningens inverkan på metoden

I det undersökta testscenariot har nodernas förflyttningar mellan två tidsuppdateringar varit ca 1 våglängd. Det tillsammans med att det totala avståndet mellan noderna har varit kort, ca 10 - 250 meter, har inte genererat så mycket flervägsutbredning. Därför vore det intressant att analysera metoden för den rumsliga

extrapoleringen för ett scenario där noderna befinner sig längre från varandra. Om det även finns fler objekt mellan noderna, samtidigt som noderna förflyttar sig längre sträckor mellan kanalens uppdateringarna blir flervägsutbredningen kraftigare. Då skulle gångvägsskillnaderna påverka signalkomponenternas fas och fördröjning mer och det vore intressant att undersöka ifall utseendet på den inkoherenta effekten blir annorlunda än i fallet för testscenariot.

Litteraturförteckning

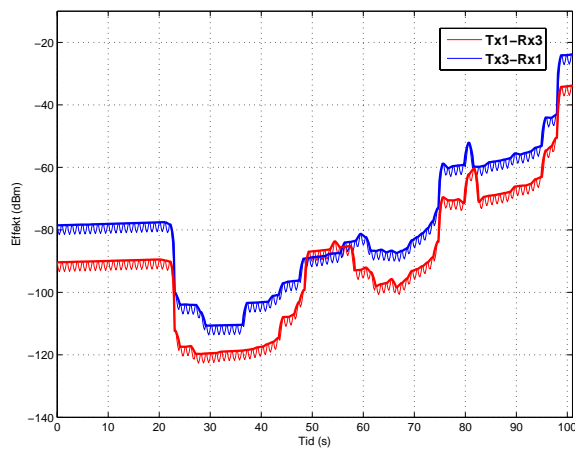
- [1] L. Berglund, J. Arnsby m.fl. Förstudie Telekrig i Urban Miljö. Användarrapport, FOI-R--1386--SE, november 2004.
- [2] L. Ahlin, P. Johansson m.fl. Demonstration av adaptiv radionod. Teknisk rapport, FOI-R--1208--SE, november 2004.
- [3] K. Fors. Implementering av en telekonfliktmodul i mjukvarudemonstratorn ELSA. Användarrapport, FOA-R--0166--SE, juli 2001.
- [4] L. Pettersson. WBBF ett simuleringsverktyg för bredbandig adaptiv lobformning. Teknisk rapport, FOI-R--0605--SE, oktober 2002.
- [5] J. B. Andersen, T. S. Rappaport, and S. Yoshida. Propagation Measurements and Models for Wireless Communications Channels. *IEEE Communications Magazine*, 33(1):42–49, 1995.
- [6] M. Steinbauer, A. F. Molisch, and E. Bonek. The Double-Directional Radio Channel. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 43(4):51–63, 2001.
- [7] A. F. Molisch. Modeling of Directional Wireless Propagation Channels. *The Radio Science Bulletin*, pages 16–26, 2002.
- [8] E. Löfsved, B. Lundborg *et al.* Deterministic calculation of wave propagation in urban areas. Methodology report, FOI-R--1339--SE, September 2004.
- [9] E. Löfsved. Investigation of two wideband and UHF radio channel models. Methodology report, FOA-R--99-01279--SE, November 1999.

- [10] RPS Radiowave Propagation Simulator. User manual-version 5.2.1, Radioplan GbmH, Dresden, 2004.
- [11] B. Lundborg, E. Löfsved m.fl. Erfarenheter av RPS - programvara för vågutbredningsberäkningar i stadsmiljö. FOI Memo 1419, oktober 2005.
- [12] B. Lundborg, L. Ladell m.fl. Modellstruktur och beräkningsmetodik för 3d kanalmodell. FOI Memo Dnr 01-2142:7, AerotechTelub K2-01:0374, december 2001.
- [13] B. Lundborg, L. Ladell m.fl. Grafiskt användargränssnitt för program Channel3D. FOI Memo Dnr 03-169:4, AerotechTelub K2-03:0843, december 2001.
- [14] V. Pérez, J. Jiménez (editors). Final Propagation Model. Report CEC Del. R2020/TDE/PS/DS/P/040al., 1994.
- [15] T. S. Rappaport, K. Blankenship et.al. Propagation and Radio System Design Issues in Mobile Radio Systems for the GloMo Project. January 1997.
- [16] K. Persson. Routing med garanterad tjänstekvalitet i taktiska mobila ad hoc-nät. Metodrapport, FOI-R--0886--SE, juni 2003.
- [17] K. Persson, U. Sterner m.fl. Taktiskt kommunikationsscenario i urban miljö. Teknisk rapport, FOI-R--1844--SE, december 2005.

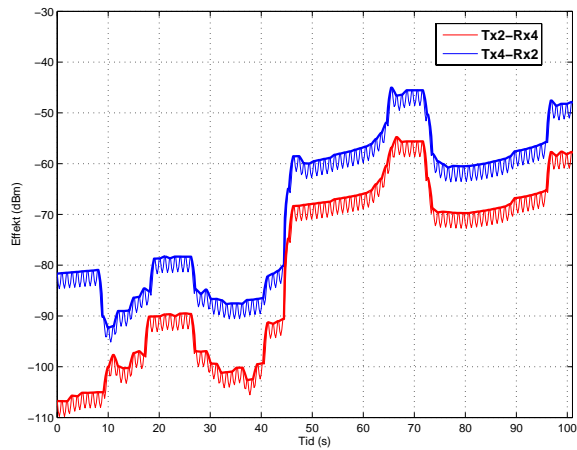
Bilaga A

Inkoherent och koherent effekt

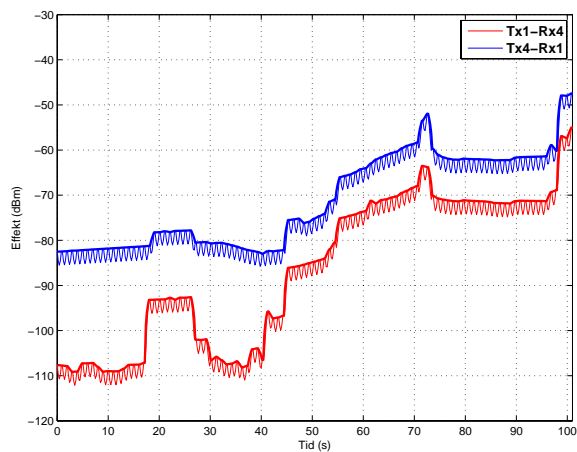
Nedan visas resterande figurer som visar exempel med beräknad koherent och inkoherent mottagen effekt. RPS-beräkningar från testscenariot har använts för detta. Mer om scenariot finns beskrivet i avsnitt 6.



Figur A.1: Visar beräknad koherent och inkoherent effekt (dBm) för nodpar 1 - 3. Effekten är beräknad för båda fallen då nod 1 eller nod 3 är sändare, och för att kunna skilja på kurvorna har 10 dB adderats till effektnivån då nod 3 är sändare.



Figur A.2: Beräknad koherent och inkoherent effekt (dBm) för nodpar 2 - 4, då nod 2 eller nod 4 är sändare. 10 dB har adderats till effektnivån då nod 4 är sändare.

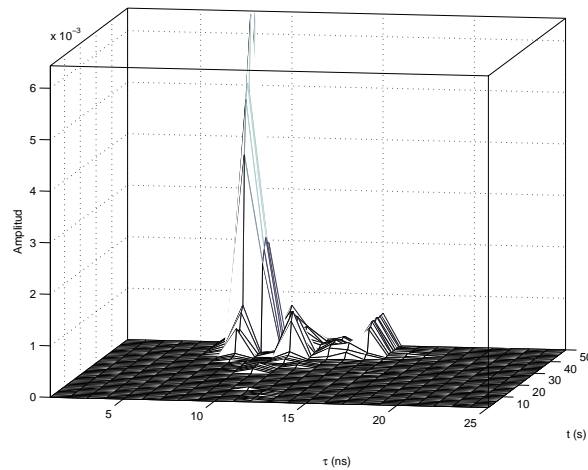


Figur A.3: Beräknad koherent och inkoherent effekt (dBm) för nodpar 1 - 4, då nod 1 eller nod 4 är sändare. 10 dB har adderats till effektnivån då nod 4 är sändare.

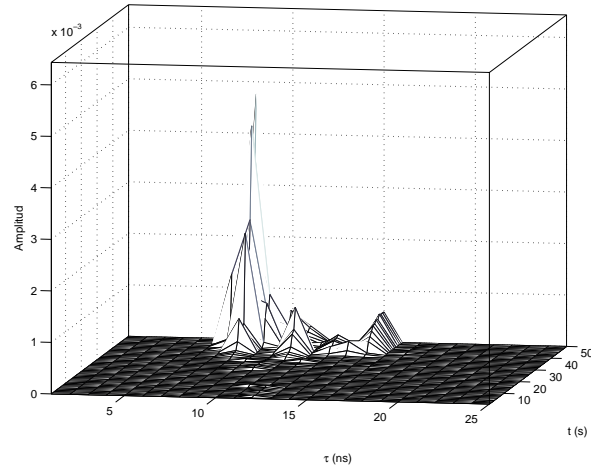
Bilaga B

Beräknat och extrapolerat impulssvar

Figureerna visar RPS-beräknat impulssvar och extrapolerat impulssvar för nodparet 2 - 3.



Figur B.1: RPS-beräknat impulssvar i mottagare tres position från sändare två. X-axeln visar τ (ns) vilket är tiden för när utbredningskomponenter når mottagaren. Y-axeln visar t (s) vilket är tiden för när varje impulssvar uppdateras.



Figur B.2: Figuren visar extrapolerade impulssvar för nodpar 2 - 3. Dessa gäller i exakt samma positioner som de RPS-beräknade vilka visas i figur B.

FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1350 anställda varav ungefär 950 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI
Totalförsvarets Forskningsinstitut Tel: 013-37 80 00 www.foi.se
Box 1165 Fax: 013-37 81 00
581 11 LINKÖPING