

Lars Ahlin, Peter Johansson, Sara Linder,
Lars Pääjärvi, Jouni Rantakokko, Hugo Tullberg

Demonstration av adaptiv radionod

TOTALFÖRSVARETS FORSKNINGSINSTITUT

Ledningssystem

Box 1165

581 11 Linköping

FOI-R--1208--SE

Mars 2004

ISSN 1650-1942

Teknisk rapport

Lars Ahlin, Peter Johansson, Sara Linder,
Lars Pääjärvi, Jouni Rantakokko, Hugo Tullberg

Demonstration av adaptiv radionod

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Ledningssystem Box 1165 581 11 Linköping	Rapportnummer, ISRN FOI-R--1208--SE	Klassificering Teknisk rapport
	Forskningsområde 4. Ledning, informationsteknik och sensorer	
	Månad, år Mars, 2004	Projektnummer E7057
	Verksamhetsgren 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	Delområde 41. Ledning med samband, telekom och IT-system	
Författare/redaktör Lars Ahlin Peter Johansson Sara Linder Lars Pääjärvi Jouni Rantakokko Hugo Tullberg	Projektledare Lars Ahlin	
	Godkänd av Lennart Nyström	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning Försvarsmakten	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Björn Johansson	
Rapportens titel Demonstration av adaptiv radionod		
Sammanfattning (högst 200 ord) Adaptiva radionoder förväntas kunna ge betydande vinster i framtida militära och civila radiosystem, t.ex. förbättrad kapacitet, ökad robusthet, och smygegenskaper. Vi planerar därför en (datorbaserad) demonstration av adaptiva radionoder. Syftet med demonstrationen är att med hjälp av simulering påvisa: 1) möjliga prestandavinster med adaptivitet, 2) realiserbarheten hos de tekniska lösningarna, 3) tekniska utmaningar och ge underlag för forskningsinsatser. Vi har valt att implementera ett kodat MIMO-OFDM-system, där bl.a. modulation, kodning och MIMO-tekniker ska adapteras mot kanalens egenskaper. Syftet med detta dokument är att ge en beskrivning av tankarna bakom demonstrationen, fungera som en vägledning inför implementeringen av demonstratorn i mjukvara, samt beskriva de moment som kommer att demonstreras. En översiktlig beskrivning av demonstratorns uppbyggnad redovisas också. Demonstrationen kommer att vara baserad på ett eller flera taktiska scenarier där inverkan från terrängen kan tydliggöras. Demonstratorn är ett första steg för att bygga upp en avancerad simulator och uppbyggnaden planeras utföras etappvis genom en successiv utveckling och förädling av ingående tekniker och adaptiva funktioner.		
Nyckelord Demonstration, scenario, adaptiv radio, adaptiv modulation, OFDM, turbokodning, MIMO, lobformning, sändningsdiversitet, spatiell multiplexing		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: s. 31	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Command and Control Systems P.O. Box 1165 SE-581 11 Linköping Sweden	Report number, ISRN FOI-R--1208--SE	Report type Technical Report
	Programme Areas 4. C ⁴ ISR	
	Month year March, 2004	Project no. E7057
	General Research Areas 5. Commissioned Research	
	Subcategories 41. C ⁴ I	
Author/s (editor/s) Lars Ahlin Peter Johansson Sara Linder Lars Pääjärvi Jouni Rantakokko Hugo Tullberg	Project manager Lars Ahlin	
	Approved by Lennart Nyström	
	Sponsoring agency The Swedish Armed Forces	
	Scientifically and technically responsible Björn Johansson	
Report title (In translation) Demonstration of adaptive radio node		
Abstract (not more than 200 words) Adaptive radio nodes are expected to give substantial improvements in future military and civilian radio systems, e.g. improved capacity, higher robustness, and stealth performance. Therefore, we plan a (computer-based) demonstration of adaptive radio nodes. The purpose of the demonstration is to show: 1) possible performance gains with adaptation, 2) feasibility with the chosen technical solutions, 3) remaining technical challenges. We have chosen to implement a coded MIMO-OFDM-system, where e.g. modulation, coding and MIMO techniques shall adapt to the prevailing channel conditions. The purpose of this document is to give a description of the ideas behind the demonstration, to act as guidance for the implementation of the demonstrator in software, and to give the reader a feeling for what the demonstration will show. The demonstration will be based upon one or several tactical scenarios where the influence from the terrain on the radio performance can be shown. The demonstrator is a first step in building a more advanced simulator that will be developed through a successive development and refinement of the used techniques and adaptive functions.		
Keywords Demonstrator, scenario, adaptive radio, adaptive modulation, OFDM, turbo coding, MIMO, adaptive beamforming, space diversity, space-frequency block coding, spatial multiplexing		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages p. 31	
Price acc. to pricelist		

Innehållsförteckning

1	Inledning	5
1.1	Bakgrund	5
1.2	Mål och syfte med demonstrator	6
1.3	Förutsättningar för demonstratorn	6
1.4	Dokumentets innehåll	7
2	Scenariobeskrivning	8
2.1	Taktiskt scenario	8
2.2	Kommunikationstjänster	10
2.3	Radiotekniska förutsättningar	10
3	Demonstrator	12
3.1	Genomförande av demonstration	12
3.2	Uppbyggnad	12
3.2.1	Radiokanal	13
3.2.2	Teknikkärna	13
3.2.3	Användargränssnitt	13
3.3	Implementationsordning	14
4	Teknikkärnan	16
4.1	OFDM	17
4.1.1	OFDM-modulering	18
4.1.2	Synkronisering	19
4.1.3	Kanalestimering	19
4.1.4	Adaptiv OFDM	19
4.2	Felrättande kodning	19
4.2.1	Turbokodning	20
4.3	MIMO	20
4.3.1	Mottagningsdiversitet	21
4.3.2	Sändningsdiversitet	21
4.3.3	Spatiell multiplexering	22
4.3.4	Lobformning	22
5	Adaptionsbeskrivning för teknikjärnan	24
5.1	Adaptionsprocessen	24
5.2	Adaptiv modulation	24
5.2.1	Hur får sändaren information om vilken modulation som ska användas?	27
5.2.2	Adaptiv modulation och kodning	28
5.3	Adaption av MIMO-systemet	29
6	Genomförandeplan	30
7	Referenser	31

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Inom Försvarsmakten pågår en utveckling från ett invasionsförsvar till ett flexibelt insatsförsvar. Det nätverksbaserade försvaret (NBF) utgör den metod (koncept) som används för att leda förändringsarbetet. NBF innebär en fokusering på ledning och ledningssystem där den första ansatsen är att skapa en gemensam lägesbild för ingående aktörer i för Försvarsmakten aktuella scenarier. Scenarierna kan innehålla en mångfald av olika sorters sensorer, beslutsstöd i form av datafusion och informationsfusion, distribuerad informationsbehandling, presentationssystem och människa-system-interaktion. Förutom detta behövs ett eller flera kommunikationssystem. NBF och skapandet av en gemensam lägesbild innebär ett kraftigt ökat informationsflöde vilket medför att det ställs fler och avsevärt högre krav på kommunikationssystemen. Några typiska krav är hög kapacitet, hög tillgänglighet och yttäckning, låg fördröjning, skydd mot störning och krav på smygegenskaper. Några av dessa krav ställs även normalt på den civila telekommunikationsinfrastrukturen och de uppfylls också i stor utsträckning i de fasta telenäten. För de mobila civila näten är det betydligt svårare (och kostsammare) att nå motsvarande prestanda som i de fasta näten även om det pågår en tydlig utveckling i denna riktning.

I de militära sammanhangen, och med den valda inriktningen mot ett flexibelt insatsförsvar, kommer en stor del av insatserna att ske via rörliga enheter och därmed är användaren beroende av en mobil infrastruktur. Med de väsentliga extra krav som en militär insats kräver (militära särkrav), och i vissa fall den miljö som en militär insats sker i, så är de mobila kommunikationerna en starkt begränsad faktor för realiseringen av NBF och skapandet av en gemensam lägesbild.

För den rörliga taktiska kommunikationen är den tekniska lösningen oftast någon form av radionät. Även andra tekniker som laser, IR, etc är möjliga som komponenter i nätstrukturen. Näten kan vara uppbyggda i en cellstruktur som i ett mobiltelefonisystem eller av ad hoc-typ där noderna själva förmedlar trafiken via sina närmaste grannar. För båda dessa typer av nät kan en struktur med adaptiva radionoder, där noderna själva kan växla mellan olika egenskaper beroende på vilka behov en användare har i just denna situation, ge stora vinster. Ofta är det behovet av att överföra mycket information (hög kapacitet) som är det viktiga, men i vissa lägen kan scenariot ställa krav på ett kraftfullt störskydd eller på en dold signalering (smygförmåga). Noderna skall också kunna adaptera sig mot den aktuella signalmiljön, dvs förändringar i kanalens egenskaper och varierande störningsnivåer beroende på interferenser och/eller aktiva störare. Adaptiviteten åstadkoms genom att införa tekniska lösningar i sändar-mottagarstrukturen där parametrarna kan varieras i hög grad. Den pågående teknikutvecklingen möjliggör att flertalet radiofunktioner kan realiseras i form av mjukvara, vilket skapar möjlighet att realisera noder med en hög grad av adaptivitet. Vilka tekniska lösningar som är lämpliga beror på en rad faktorer som frekvensområde, typ av plattform, signalmiljö, taktiskt uppträdande etc. Ett flexibelt radiosystem innebär också att samma grundsystem kan användas i många olika tillämpningar vilket kan reducera kostnaden avsevärt.

I projektet adaptiv radionod (ARN) studeras möjligheterna till adaptiv förmåga hos en radionod i en nätstruktur. Syftet med projektet är att ta fram systemmodeller (systemförslag) med stor förmåga till adaptivitet och att visa på de möjliga vinsterna med adaptiva radiofunktioner. Den tekniska fokuseringen är mot nya innovativa signalbehandlingsmetoder

med beaktande av möjligheten att använda den kommersiella teknik som växer fram i den civila utvecklingen av framtida mobila trådlösa system (t ex 4G-system inom mobiltelefoni) i så hög grad som möjligt. Projektets fokus ligger, förutom att ta fram systemmodeller, på att studera adaptiva tekniker och beskriva och implementera adaptionsprocessen i radionoden. Det viktigaste syftet med adaptionen är att kunna öka kapaciteten i radionoden och därmed i radionätet. Detta innebär att vi kan öka tillgängligheten för de tjänster som användaren efterfrågar. Inom både den civila och militära sektorn pågår en utveckling mot bredbandiga vågformer för att erhålla hög kapacitet i systemen. Utnyttjandet av adaption medför att hög kapacitet kan erhållas i förhållande till tillgänglig bandbredd.

Komplexiteten i teknikerna och processerna innebär att det inte är möjligt att inom projektets ram få fram en fullständig systemlösning. Det är dock möjligt att implementera delar av en systemmodell för att visa på möjliga vinster med adaptiva radiofunktioner. För att påvisa vinsterna ämnar vi genomföra en demonstration av adaption i en förenklad systemmodell.

1.2 Mål och syfte med demonstrator

En viktig komponent i ett utvecklingsprojekt är att kunna påvisa effekterna av de metoder och tekniska lösningar som växer fram inom projektets ram. En demonstration är planerad att äga rum under hösten 2004. Demonstrationen av den förenklade systemmodellen för en adaptiv radionod kommer att innehålla ett begränsat antal adaptiva radiofunktioner. Demonstrationen kommer att vara baserad på ett eller flera taktiska scenarier där inverkan från terrängen kan tydliggöras. Denna demonstration är ett första steg för att bygga upp en avancerad simulator som dels kan tjäna som ett verktyg för forskning och utveckling kring adaptiva funktioner och lämpliga systemlösningar och dels vara en plattform för att på ett tydligt sätt demonstrera möjligheterna med adaptivitet. Uppbyggnaden av demonstratorn sker etappvis genom en successiv utveckling och förädling av ingående tekniker och adaptiva funktioner.

Demonstrationen kommer att vara datorbaserad och bygga på modellering av tekniker och funktioner i en systemmodell. Syftet med demonstrationen är att med hjälp av simulering påvisa

- 1) möjliga prestandavinster med adaptivitet,
- 2) realiserbarheten hos de tekniska lösningarna,
- 3) tekniska utmaningar och ge underlag för forskningsinsatser.

En viktig effekt av demonstrationen är att för en bredare och icke-tekniskt bevandrad publik kunna påvisa vilka möjligheter och förmågor med avseende på prestanda som står till buds genom att införa adaptiv förmåga i radionoder.

1.3 Förutsättningar för demonstratorn

Demonstrationen kommer att vara baserad på en eller flera taktiska situationer och genomförs med utgångspunkt från en geografisk beskrivning (karta). Vi har möjlighet att simulera en kommunikationslänk sändare – mottagare med adaptiva förmågor. Vårt fokus och det vi framförallt vill påvisa är adaptionsprocessen och dess möjligheter och begränsningar. Demonstratorn är uppbyggd av en kartbaserad vågutbredningsmodell, en teknikkärna och ett användargränssnitt. Teknikkärnan innehåller en systemmodell med ett antal teknikblock. För att kunna jämföra olika system ges möjlighet att koppla in och ur olika block och att ställa in ett antal parametrar i respektive block. Tanken är att demonstrationen skall kunna ge en jämförelse mellan prestanda för adaptiva system med prestanda för icke-adaptiva system.

Detta kan illustreras t.ex. genom överföring av audio- eller videosekvenser. Olika tjänstetyper bör kunna illustreras såsom överföring av positioner, e-post, realtidsöverföring av tal och video samt filöverföring. Egenskaper hos kommunikationslänken som kapacitet, störskydd, räckvidd, smygförmåga, tillgänglighet bör också kunna illustreras. Vid det första demotillfället kommer inte demonstrationen att innehålla illustration av alla dessa egenskaper utan vi prioriterar de två första; kapacitet och störskydd.

Exempelvis kan kapacitetshöjande metoder illustreras med hjälp av stapeldiagram som visar hur snabbt nedladdning av filer går för olika adaptiva och icke-adaptiva tekniska lösningar. De kvalitetsförbättringar som ges av adaptiva system vid realtidsöverföring av audio- och videosekvenser bör också kunna illustreras. Demonstratorn skall dessutom kunna påvisa inverkan av terrängförhållanden och nodernas rörelser.

Demonstratorn kan också innehålla ett moment där systemmodellen med ingående block och dess egenskaper och förmågor påvisas. Önskvärt är också att kunna illustrera adaptationsprocessen med ingående delar.

Vid demonstrationen har vi möjlighet att simulera en länk sändare-mottagare. Detta räcker för vårt huvudsyfte som är att illustrera effekterna av adaption. Noden är sedan en komponent i ett nät och resultaten från våra simuleringar kan användas för att införa effekterna av adaption och skapa bättre modeller av noderna vid kommande nätsimuleringar.

1.4 Dokumentets innehåll

Syftet med detta dokument är att ge en beskrivning av tankarna bakom demonstrationen, fungera som en vägledning inför implementeringen av systemmodellen i mjukvara samt beskriva de moment som kommer att demonstreras. En översiktlig beskrivning av demonstratorns uppbyggnad redovisas också. Som grund för demonstrationen ligger en systemmodell med ingående teknikblock. Vårt fokus ligger på adaptationsprocessen och att påvisa vilka realistiska möjligheter till adaption som föreligger. Dokumentet syftar också till att ge intresserade en uppfattning om vad som kommer att vara möjligt att demonstrera, dels i det korta perspektivet men också i ett längre perspektiv med en utbyggd demonstrator.

Dokumentet är uppbyggt på följande sätt. I kapitel två beskrivs det taktiska scenario som vi har valt som utgångspunkt för demonstrationen tillsammans med en översiktlig beskrivning av kommunikationstjänster och några radiotekniska förutsättningar för demonstrationen. Kapitel tre innehåller en beskrivning av demonstratorns uppbyggnad och genomförandet av demonstrationen. Uppbyggnaden och innehållet i teknikkärnan går igenom i kapitel fyra och i kapitel fem ges en beskrivning av de adaptionstekniker som vi ämnar använda vid demonstrationen. Slutligen återfinns en översiktlig plan för genomförandet i kapitel sex.

2 Scenariobeskrivning

Demonstrationen utgår från en teknikkärna innehållande en systemmodell av en adaptiv radionod. Utgångspunkten för demonstrationen är ett eller flera taktiska scenarier. I detta kapitel beskrivs två av flera möjliga scenarier tillsammans med några radiotekniska förutsättningar.

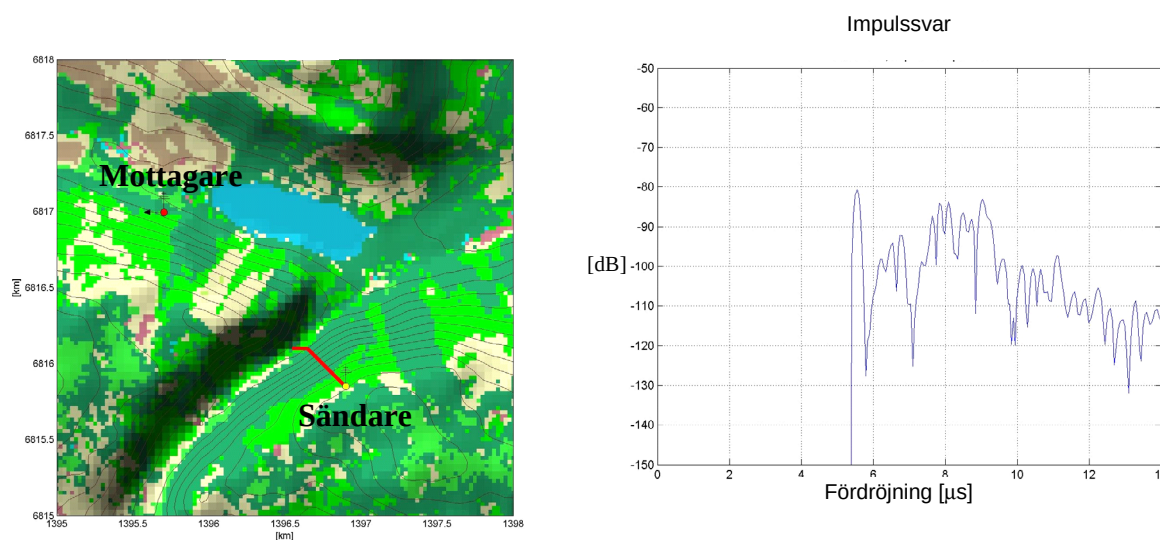
Det tänkta radiosystemet är en del av ett ledningssystem för en mekaniserad bataljon. Varje fordon i bataljonen som rör sig i terrängen utgör en radionod. Vi antar att data som genereras i en nod kan överföras till vilken annan nod som helst i nätet, antingen direkt eller via mellanliggande noder. Kraven på dataöverföringen varierar för olika typer av tjänster.

I vår demonstration studerar vi dataöverföringen i en länk mellan två noder i den mekaniserade bataljonen.

2.1 Taktiskt scenario

Här exemplifierar vi den taktiska situationen med två olika fall och ger exempel på hur radiomiljön ser ut för dessa fall.

Det första fallet är en förbindelse mellan två stridsfordon i en mycket kuperad terräng i Älvdalen. Ett av fordonen är under rörelse ($10 \text{ m/s} = 36 \text{ km/h}$) medan det andra fordonet är stationärt. En mobil nod (gul) rör sig från en kulle ner i en dal där den hamnar i radioskugga från mottagarstationen (röd), se kartan i figur 2-1.



Figur 2-1: Impulssvar beräknat med Channel3D från Älvdalen.

För radioförbindelsen i den kuperade terrängen innebär det att förutom signalen som har gått direkt från sändaren till mottagaren så kommer även kopior av samma signal, som har studsat mot bergväggar och andra ytor runt om i terrängen, till mottagaren. Eftersom signalkopiorna har gått en längre väg än direktkomponenten så kommer kopiorna fram till mottagaren lite senare. Detta fenomen kallas för flervägsutbredning och ger upphov till en störning i mottagaren orsakad av den egna signalen.

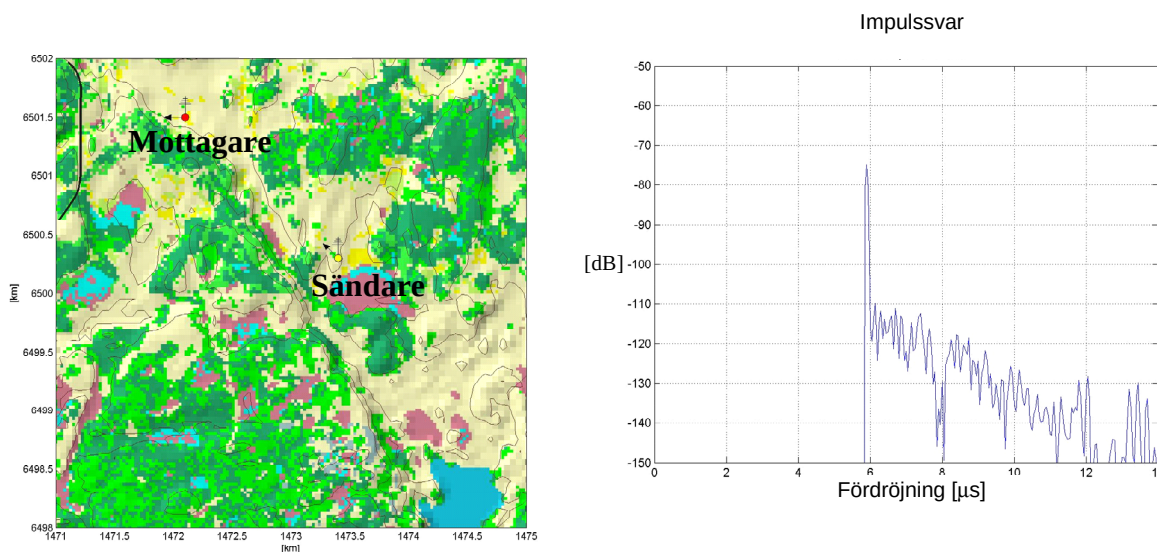
Ett klassiskt sätt att studera flervägsutbredningen är att mäta kanalens impulssvar. Det innebär att sändaren sänder en mycket kort puls och mottagaren mäter hur den mottagna pulsen

klingar av (avtar) med tiden i mottagaren. Om kanalen kan beskrivas matematiskt går det även att räkna fram impulssvaret. En beräkning av impulssvaret med hjälp av den kartbaserade modellen Channel3D [6] för scenariot i figur 2-1 kan ses bredvid kartan. Det syns tydligt att pulsen når mottagaren efter ungefär 5,5 mikrosekunder (μs) och att det finns ganska många signalkopior som når mottagaren mellan 5,5 μs och 9 μs , därefter klingar signalstyrkan av så pass att den inte påverkar mottagningen nämnvärt.

Om nu noderna rör sig, som vi har antagit i scenariot, så kommer geometrin mellan sändare och mottagare hela tiden att förändras. Avstånden till reflekterande ytor ändras och därmed ändras tidpunkten för när en viss signalkopia når mottagaren. Detta medför att impulssvaret hela tiden kommer att förändras.

Scenariot i Älvdalen illustrerar en relativt svår radioförbindelse som ställer stora krav på adaptionsalgoritmerna för att kunna följa och utnyttja förändringarna i den mottagna signalen. Exemplet är att betrakta som ett värsta fall i Sverige men kan vara mer representativt i andra delar av världen, tex Bosnien eller Afghanistan.

Ett radiotekniskt lättare exempel, hämtat från övningsfältet i Kvarn, visas i figur 2-2, där radioförbindelsen sker över relativt flack och öppen terräng. En mobil nod (gul) rör sig även här med 10 m/s mot en stationär nod (röd). Det är nästan bara den signal som har gått direkt mellan sändaren och mottagaren som når mottagaren, runt 6 μs efter att den har sänts. Alla andra signalkomponenter är minst 30 dB (1000 gånger) svagare och kommer inte att påverka mottagaren, se figur 2-2. En kanal med så pass goda egenskaper har potentialen att bära mycket höga datatakter om radiosystemet kan upptäcka och anpassa sig till dessa förhållanden.



Figur 2-2: Impulssvar beräknat med Channel3D från Kvarn.

Andra intressanta fall är kommunikationssituationer som omfattar störning mot radiosystemet. Störningen kan bestå av allt från aktiva fientliga störare med signalanpassade störformer till interferenser orsakade av andra radiosändare eller samlokaliserad elektronisk utrustning. Målet med adaptationen är att upptäcka och neutralisera effekten av störningarna, helst utan att tappa allt för mycket kapacitet i kommunikationslänken. Det kan ske genom att anpassa modulation, kodning, frekvens, antensystem mm. Vår ambition är att demonstrationen även ska innehålla scenarier med aktiv fientlig störning.

I en framtida utveckling av demonstrationen är inverkan från i första hand urban miljö intressant att undersöka. Vi har valt att börja med det beskrivna scenariot då vi har tillgång till kanalmodeller med riktningsinformation (Channel3D) för den typen av terräng, men urban miljö bör kunna införas relativt enkelt då lämpliga kanalmodeller väl tagits fram. Även smygkommunikation är intressant att undersöka och demonstrera. Urban miljö ger andra kanalegenskaper och kommunikationsavstånd medan smygkommunikation ger andra kriterier för vad som anses vara en bra kommunikationslänk. Båda dessa fall ger i sin tur även upphov till behov av nya algoritmer för adaptering.

2.2 Kommunikationstjänster

Flera olika klasser av kommunikationstjänster ska förmedlas av nätet. Tjänsterna har mycket skilda krav på datatakt, feltolerans, fördröjning etc. För att tillgängligheten för de olika tjänsterna ska vara så hög som möjligt krävs att radiosystemet kan adaptera sig efter de olika tjänstekraven och efter de radiotekniska förhållanden som gäller vid överföringen.

Några exempel på tjänster som är intressanta för våra tillämpningar är realtidsöverföring av tal och video, överföring av datafiler, stillbilder, e-post eller internetsurfning och positionsmeddelanden. Kvalitetskraven för dessa tjänster är ganska olika, realtidsöverföringar ställer krav på liten fördröjning men kan tolerera att det uppstår vissa fel vid överföringen. Filöverföringar behöver ofta vara i stort sett felfria, men i gengäld kan en ganska stor fördröjning accepteras. Positionsmeddelanden får inte misstolkas men i de flesta fall kan man tolerera att enstaka uppdateringar förloras. Många av dessa tjänster ställer dessutom relativt höga krav på överföringskapacitet.

2.3 Radiotekniska förutsättningar

Det tänkta radiosystemet är en del av ett ledningssystem för en mekaniserad bataljon. Bataljonen rör sig över en yta som typiskt är 500 km² och består av maximalt 140 fordon. Radiosystemet kan komma att användas i hela skalan av situationer, från ett läge med stillastående noder och goda transmissionsförhållanden till ett läge med mycket rörliga noder och inverkan från fientliga enheter. Vi antar att data som genereras i en nod kan överföras till vilken annan nod som helst i nätet, antingen direkt eller via mellanliggande noder i ett ad hoc-nät, dvs ett nät där alla ingående noder är likvärdiga och där styrningen av nätet är autonom och distribuerad över samtliga noder. Nätet är inte beroende av någon central nod för dess funktion, utan alla noder ska kunna ersättas av vilken annan nod som helst.

Ett ad hoc-nät kan ha flera olika metoder för att fördela (ge access till) den gemensamma radioresursen mellan olika noder. En ytterlighet är att bestämma ett tidsschema i förväg när olika noder får sända, en annan ytterlighet är att varje nod som har något att sända, först lyssnar om någon annan nod sänder och därefter sänder så fort kanalen är ledig. Båda dessa metoder har sina för och nackdelar och kan påverka möjligheterna till adaption. En kort diskussion om detta förs i kapitel 5.2.1. Utöver tidsuppdelning och lyssna/sänd metoden finns även access baserad på frekvensuppdelning och olika spridningskoder samt hybrider av alla här nämnda metoder.

Vi har ännu inte bestämt vilken accessmetod som är lämplig för våra scenarier. Vår förhoppning är att demonstrationen inte ska behöva belastas eller begränsas av allt för många detaljer kring accessmetoden. Fokus ligger på själva adaptionen och algoritmerna för denna men i den mån som adaptionen begränsas av accessmetoden kommer de effekterna införlivas i demonstrationen.

Vid digital kommunikation formas binärt data, ettor och nollor, till symboler innan modulationen, t.ex. kan tre bitar motsvara en symbol med åtta olika värden (modulationsalfabetet blir då $2^3 = 8$). Symbolerna moduleras sedan på en bärvåg genom att en eller flera egenskaper hos bärvågen ändras (amplitud, fas och/eller frekvens) i förhållande till symbolvärdet. Prestanda för mottagaren, dvs sannolikheten att mottagaren korrekt kan detektera utsänd symbol, bestäms i huvudsak av mottagen signaleffekt, storleken på modulationsalfabetet och tiden för en symbol. Korta symboler och stort modulationsalfabet innebär att mer data kan sändas per tidsenhet men de blir samtidigt svårare att detektera rätt, eller med andra ord, signalen blir mer störkänslig för samma mottagna signaleffekt.

Om symboltiden för den använda modulationen på länken mellan sändare och mottagare är kortare än avklingningstiden för de starkaste topparna i impulssvaret så kommer symbolerna att störa varandra. Detta kallas för intersymbolinterferens och motverkas vanligtvis med hjälp av en kanaltjämnare i mottagaren. Ett annat sätt att undvika intersymbolinterferens är att förlänga symboltiden men det leder till lägre datatakt. Orthogonal Frequency Division Multiplex, OFDM, är en metod som förenar lång symboltid med höga datatakter, genom att sända många långa symboler parallellt istället för många korta symboler seriellt i tiden. OFDM beskrivs närmare i kapitel 4.1.

OFDM är en vanlig teknik för trådlösa datanätverk, digital rundradio och andra högkapacitetsnät [4]. Gemensamt för dessa civila nät är att noderna är relativt stillastående och att radiomiljön är relativt lugn. Vi har valt OFDM som grund för modulationen därför att vi vill undersöka hur OFDM fungerar i miljöer som är vanliga för mobil, taktisk kommunikation.

Frekvensbandet som vi i första hand har valt är 240 – 380 MHz. I det frekvensbandet finns det tillräckligt utrymme för att realisera någorlunda bredbandiga signaler samtidigt som radiovågorna har en god genomträngningsförmåga i skog. Ett annat skäl till valet av frekvensband är att våglängden är runt en meter vilket möjliggör användningen av multipla antenner. Vi har begränsat den tillgängliga momentana bandbredden till 10 MHz och uteffekten till 25 W.

I den mekaniserade bataljonen antas varje fordon ha ett antennsystem som maximalt består av 6 monopolantennor. Antennhöjden är ungefär 3 m över marknivå. Tre olika antennkonfigurationer är i dagsläget aktuella att demonstrera. Den första och enklaste är ett ensamt antennelement, den andra är en konfiguration med två antennelement separerade 1,5 m. Dessa två antennkonfigurationer finns redan i dag realiserade på svenska stridfordon. Det tredje alternativet är en 6 elements cirkulär gruppantenn med en diameter på ca 0,8 m. Ett sådant antennsystem är sannolikt möjligt att installera på ett stridfordon men det kräver en viss modifiering av den befintliga antenninstallationen.

3 Demonstrator

Ett av målen med demonstratorn är att påvisa de prestandavinster på länknivå som adaptiva radionoder ger jämfört med radionoder utan adaptionsförmåga. I teorin ger en adaptiv radionod stora prestandavinster, och redan idag finns olika former av adaptivitet med i civila system och standarder. Det återstår att visa att vinster kan uppnås under de speciella förutsättningar som en militär radionod har. I detta avsnitt beskriver vi översiktligt uppbyggnaden av demonstratorn och hur en demonstration kan genomföras.

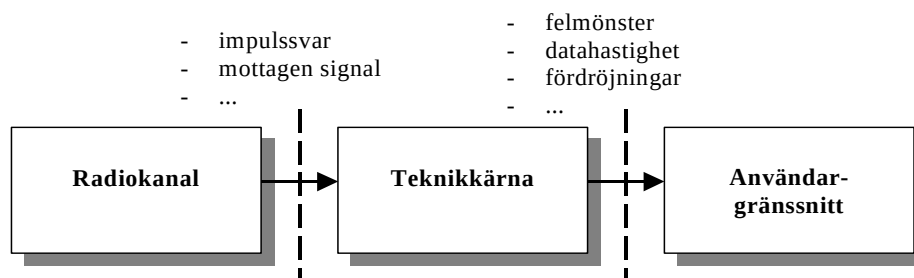
3.1 Genomförande av demonstration

Vi tänker oss att demonstrationen innehåller följande steg:

- Bestämma taktiskt scenario. Detta inkluderar bland annat miljö, sändarens och mottagarens positioner och rörelse, och positioner för eventuella fientliga störare.
- Utifrån det taktiska scenariot bestäms kanalens egenskaper, exempelvis genom simulering eller mätning av kanalens impulssvar. Kanalens egenskaper varierar beroende på nodernas position och rörelse och måste bestämmas för varje tidsögonblick under den tid som händelseförloppet pågår. Eftersom beräkningen av impulssvar, i exempelvis Channel 3D, är tidskrävande kommer den att göras i förväg och resultaten sparas i filer.
- Utifrån kanalens egenskaper används sedan teknikkärnan, med olika adaptiva tekniker, för att beräkna bl.a. felmönster och fördröjningar. Även dessa beräkningar kan komma att bli tidskrävande och därför sparas resultaten i filer för att användas av användargränssnittet.
- Användargränssnittet använder sedan de förberäknade felmönstren för att visa hur radiokommunikationen fungerar. Som vi tidigare nämnt tänker vi oss att presentera bland annat kartinformation, systemstatus och kvalitet hos nyttotrafiken.

3.2 Uppbyggnad

Demonstratorn kommer att vara uppbyggd i mjukvara, dvs den genomförs som en datorsimulering, och den kommer att bestå av tre block, nämligen radiokanal, teknikkärna och användargränssnitt, se figur 3-1. I teknikkärnan realiseras radion (sändare och mottagare). I användargränssnittet realiseras in och utmatning av nyttotrafik och styrning av radion. Genom användargränssnittet påvisas också effekten av radionodens adaptiva förmåga genom att visa effekten på exempelvis tal-, video-, och texttrafik.



Figur 3-1: Uppdelning mellan radiokanal, teknikkärna och användargränssnitt.

Demonstratorn skall vara modulärt uppbyggd för att göra det enkelt att prova nya tekniker. Förutom att visa på effekter av adaptivitet skall demonstratorn fungera som ett forskningsverktyg där nya adaptiva tekniker kan provas.

3.2.1 Radiokanal

Radiokanalen kommer att baseras på en av de kartbaserade utbredningsmodeller som FOI har tagit fram, sannolikt Channel3D [6]. I radiokanalblocket skapas även den mottagna signalen, som består av nyttosignal, eventuella störare och brus.

3.2.2 Tekniskärna

Teknikkärnan innehåller all radiorelaterad signalbehandling inklusive adaption. Den kommer att vara implementerad i Matlab för att medge snabb implementation och möjlighet att enkelt testa nya moduler.

I teknikkärnan implementeras sändaren och mottagaren. I sändaren kommer att ingå kodare för felrättande kod, OFDM-modulering och möjlighet att använda multipla antenner. Mottagaren kommer att bestå av ett antennsystem med multipla antenner, OFDM-demulering och avkodare för den felrättande koden. Teknikkärnan beskrivs i detalj i kapitel 4. I kapitel 5 beskrivs hur adaptiv modulation, adaptiv kodning, och adaption av MIMO-systemet ska kunna införas i demonstratorn.

Eftersom teknikkärnan och radiokanalmodellerna kommer att vara beräkningstunga, och vi planerar att implementera teknikkärnan i Matlab, kommer data sannolikt inte kunna genereras i realtid. Vi kommer därför att utifrån det valda scenariot i förväg beräkna felmönster och tidsfördröjningar som sedan levereras till användargränssnittet. Genom att generera felmönster och tidsfördröjningar kan användargränssnittet köras i realtid.

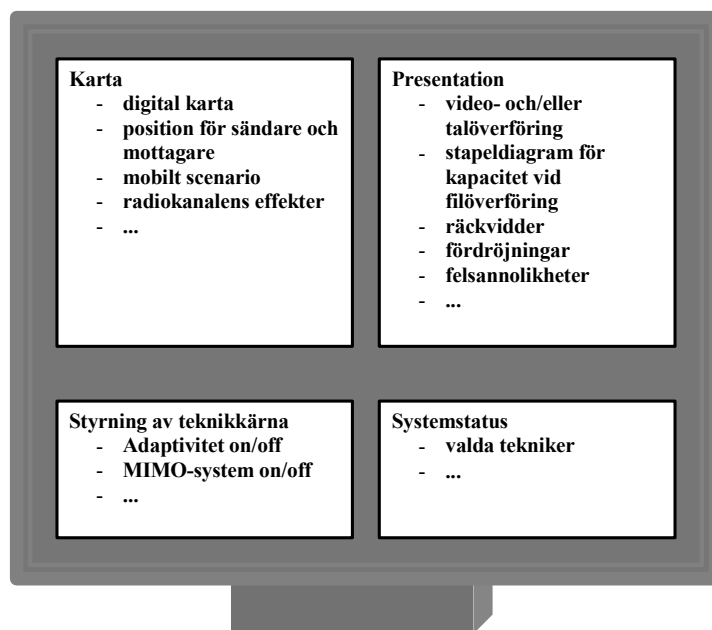
Eftersom felmönster etc. beror av vilka inställningar som väljs i användargränssnittet måste en uppsättning felmönster beräknas för varje möjlig inställning. För att inte datamängden skall bli ohanterlig kommer antalet inställningar begränsas.

3.2.3 Användargränssnitt

Användargränssnittet skall låta användaren styra simuleringen och tydliggöra effekterna av olika adaptionsmetoder och teknislösningar. Vi tänker oss att användargränssnittet består av fyra huvuddelar.

- Ett fönster visar en karta och nodernas placering och rörelse i terrängen. Härigenom kan man se hur miljön påverkar radionoderna och hur noderna adapterar mot förändringar i terräng och eventuella störare.
- I ett fönster kan användaren styra teknikkärnan genom att koppla in och ur olika adaptionsmetoder, eller, vid automatisk adaption, ange vilka adaptionsmetoder som skall kunna användas.
- Ett fönster presenterar systemstatus, exempelvis vilka adaptionstekniker som används för tillfället och hur stor del av tillgänglig kapacitet som används för tillfället.
- Slutligen visas hur nyttotrafiken påverkas. Genom användargränssnittet påvisas radionodens adaptiva förmåga genom att visa effekten på exempelvis tal-, video-, och texttrafik. Vår ambition är att visa att ett adaptivt radiosystem kan upprätthålla en

videokonferens eller förmedla en bildalstrande sensors information även under svåra förhållanden då ett motsvarande icke-adaptivt system får problem. För att påvisa effekten av adaption tänker vi oss att parallellt visa kvaliteten hos ett adaptivt och ett icke adaptivt radiosystem.



Figur 3-2: Preliminär skiss av hur användargränssnittet kan se ut.

3.3 Implementationsordning

En avancerad adaptiv radionod beskrivs i rapporten ”Adaptiv radionod – ett systemförslag” [5]. Det beskrivna systemet är uppbyggt enligt principerna för en mjukvaruradio och olika tekniker kan användas i olika ordning beroende på omständigheterna. Rapporten beskriver de adaptiva tekniker som ingår i systemet, men inte hur de olika teknikerna skall adapteras för att uppnå bra prestanda. Arbete pågår för att beskriva hur de olika adaptiva förmågorna skall utnyttjas under givna situationer.

Den radionod som beskrivs i rapporten är dock alltför omfattande att realisera inom ramen för pågående projekt. Vi har därför prioriterat ett antal funktioner som vi anser väsentliga att inkludera i en demonstrator och i vilken ordning de skall implementeras. För teknikkärnan har vi valt följande moduler i prioritetsordning:

- Grundläggande sändar- och mottagarmoduler baserat på OFDM-teknik. OFDM möjliggör hög överföringskapacitet och är robust mot flervägsutbredning samt har stor adaptionsförmåga.
- Radiokanal baserad på en kartbaserad vågutbredningsmodell, troligen Channel3D.
- Adaptiv modulation för att maximera överföringskapaciteten.
- Sändar- och/eller mottagardiversitet för att minska inverkan av kanalens variationer.
- Fientlig störning.

- Mer avancerade antennfunktioner, exempelvis adaptiv lobformning vid mottagning eller spatiell multiplexering. Adaption mellan olika MIMO-tekniker.
- Adaptiv kodning, för optimering av överföringskapacitet och felskydd.
- Adaptivt OFDM, t.ex. variabelt antal pilottoner och variabel bandbredd.
- Frekvenshopp som skydd mot fientliga störare.
- Direktsekvens som skydd mot signalspaning och störning.

Vår ambition är att en demonstrator som realiserar de fyra första punkterna skall finnas färdig till sommaren 2004. Demonstratorn skall sedan vidareutvecklas under hösten 2004, men alla punkterna kan dock inte implementeras till första demonstrationen. Avsevärd forskning och utveckling återstår innan en demonstrator enligt [5] kan realiseras.

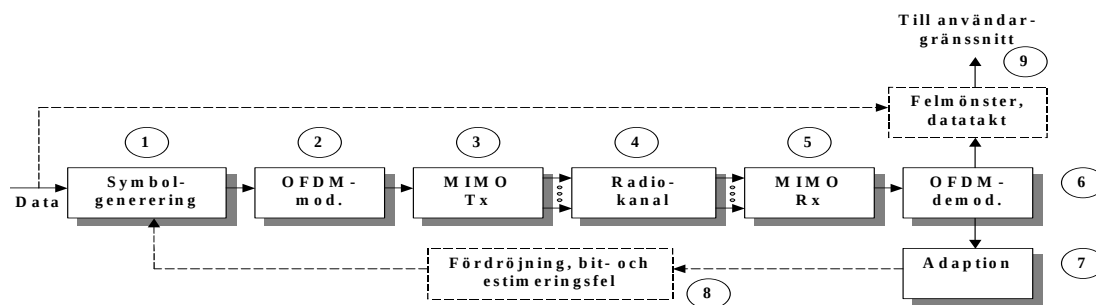
För användargränssnittet har vi gjort följande prioriteringar:

- Visning av karta med sändarens och mottagarens läge och eventuella rörelser markerade.
- Grundläggande resultatvisning i form av hur nyttotrafiken påverkas, exempelvis hur en filöverföring, eller reeltidsöverföring av tal och video påverkas.
- Visning av systemstatus, vilka adaptionstekniker som används för tillfället.
- Styrning av teknikkärnan.
- Utökad visning av resultat.

De tre första punkterna avser vi realisera till sommaren 2004, med en vidareutveckling under hösten.

4 Teknikkärnan

I detta kapitel beskrivs den teknik kärna som ska implementeras. Teknikkärnan ska vara modulärt uppbyggd för att kunna fungera som forskningsverktyg även i framtiden. Teknikblock ska kunna bytas ut och nya tillkomma för att ge möjlighet till utvärdering av olika tekniker och algoritmer. Teknikkärnan ska ha gränssnitt mot både radiokanal och användargränssnitt där resultat kan illustreras på ett intuitivt och lättförståeligt sätt.



Figur 4-1: Skiss av simuleringsschema för den adaptiva radionoden.

Figur 4-1 visar ett flödesschema över simuleringsmodellen innehållande OFDM-sändtagare, radiokanal, samt funktioner för att adaptera noden etc. De heldragna linjerna och blocken markerar den adaptiva radionoden medan streckade linjer och block markerar det ramverk som används för att införa fel och för att bedöma nodens prestanda. Följande lista beskriver kortfattat funktionen hos respektive block.

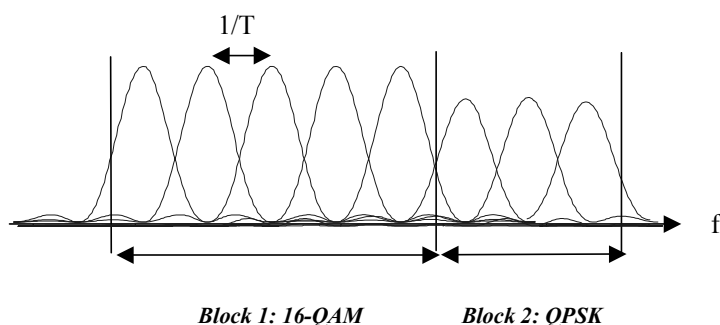
1. En binär ström av data skapas i noden och delas, med hjälp av återkopplingsinformation från mottagaren, upp i symboler anpassade till valda modulationsformer.
2. OFDM-moduleringen, som beskrivs närmare längre fram i detta kapitel, skapar en eller flera OFDM-symboler som skickas över radiokanalen.
3. Genom kombinerad rums-tidskodning kan bl.a. sändningsdiversitet eller en förbättrad kapacitet åstadkommas i MIMO-systemet (se avsnitt 4.3.2). Även lobformning vid sändning är intressant att implementera i ett senare skede.
4. Radiokanalens egenskaper modelleras antingen med hjälp av kanalsimuleringar eller utifrån från verkliga kanalmätningar. Här skapas även den mottagna signalen, som består av nyttsignal, eventuella interferenser och störare samt brus.
5. Diversitet, spatiell multiplexing eller adaptiv lobformning (mottagning) är intressanta tekniker i MIMO-systemets mottagarblock.
6. OFDM-mottagaren gör först en finsynkronisering i tid och frekvens genom att använda antingen det cykliska prefixet eller pilottoner. Därefter sker en demodulering av OFDM-symbolerna. I OFDM-mottagaren estimeras också olika kanalparametrar som t.ex. signal-brusförhållandet (SNR).
7. Blocket "Adaption" använder information om mottagen signal för att beräkna hur kommande OFDM-symboler ska se ut, dvs antal underbärvågor, modulation per underbärvåg, antal pilottoner och deras placering, bandbredd etc, för att sedan "rekommendera" sändaren en viss uppsättning parametrar. I den första versionen av simulatoren använder detta block endast SNR-estimering för att adaptera modulationen, medan övriga OFDM-parametrar inte tillåts adapteras under simuleringen. I senare

versioner av demonstratorn ska detta block ta hand om all adaption som ska utföras, t.ex. beordra sändaren att koppla in en viss typ av MIMO-teknik eller felrättande kod.

8. Fördröjningar och bitfel uppkommer i återkopplingsloopen till sändaren och dessa modelleras i detta block. Även olika estimeringsfel kan läggas på här. Fördröjningar uppkommer också i framkanalen och vid estimeringen. För en väl fungerande adaption är fördröjningen i återkopplingsloopen kritisk och det är därför intressant att undersöka hur stor fördröjning som kan accepteras.
9. I blocket "Felmönster, datatak" jämförs mottaget data med sänt data och prestandamått som t.ex. bitfelshalter beräknas. Genom att jämföra sänt data med mottaget data kan felmönster fås fram. Dessa felmönster kan skickas till användargränssnittet och påverka överföringen av olika typer av tjänster för att utvärdera deras kvalitet. Även datatakten och dess variation, samt eventuellt fördröjningarna, behöver överföras till användargränssnittet.

4.1 OFDM

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) utgör grunden för teknikkärnan och adaptionen. OFDM är en bandbreddseffektiv multi-carrier teknik som medger stor flexibilitet [4] och det är intressant att utvärdera dess möjligheter i militära scenarion. Genom att dela upp den sända signalen i ett flertal smalbandiga ortogonala underbärvågor, se figur 4-2, kommer varje underbärvåg att endast utsättas för flat fädning. Den frekvensselektiva fädningen som annars kräver kanalutjämnare i mottagaren för att motverka intersymbolinterferens kan på så sätt undvikas, och mottagaren blir mindre komplex.



Figur 4-2: Illustration av ett OFDM-spektrum med åtta underbärvågor. Mottagen signalstyrka kan variera för underbärvågorna.

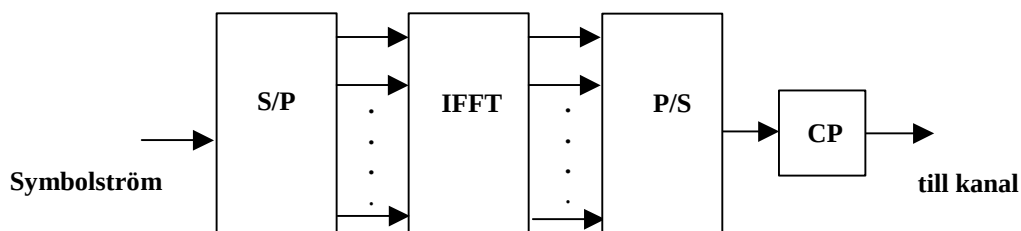
Varje underbärvåg kan ses som en separat signal som moduleras med en symbol från valfri modulationsform, t.ex. QPSK, 8-PSK, 16-QAM eller 64-QAM beroende på hur bra signal-brusförhållandet (SNR) är på respektive underbärvåg. Ofta kommer ett flertal intelligande underbärvågor att moduleras med samma modulationsform eftersom dessa underbärvågor kommer att uppleva liknande kanaler. I figur 4-2 har underbärvågorna i block 1 ett bättre SNR än underbärvågorna i block 2. Bärvågorna i block 1 kan på grund av det moduleras med en modulationsform av relativt hög ordning, t.ex. 16-QAM medan bärvågorna i block 2 måste använda en modulationsordning av lägre ordning, t.ex. QPSK. Genom att adaptivt ändra modulationen beroende på kanalens karaktäristik kan mer data skickas över kanalen än för ett statiskt schema och högre kapacitet kan därmed uppnås.

Hur många bärvågor som kan moduleras med samma modulationsform beror bland annat på hur kanalen varierar i frekvens och bandbredden per underbärvåg (totala tillgängliga

bandbredden/antalet bärvågor). OFDM-blocket kan i ett senare skede bytas ut mot single-carrier block med t.ex. direktsekvensbandspridning om så önskas.

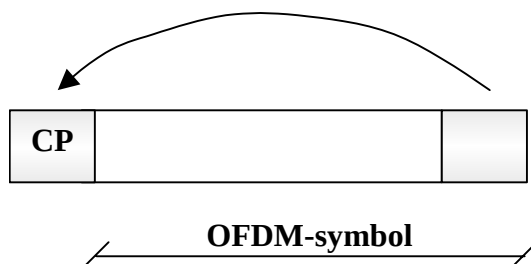
4.1.1 OFDM-modulering

Figur 4-3 visar en schematisk bild av OFDM-sändaren. En ström av symboler, som kan komma från olika modulationsformer, seriell-till-parallellomvandlas varpå en IFFT (Invers Fast Fourier Transform) utförs. Det Fouriertransformerade datat parallell-till-seriellomvandlas och ett cykliskt prefix adderas innan OFDM symbolen sänds över radiokanalen.



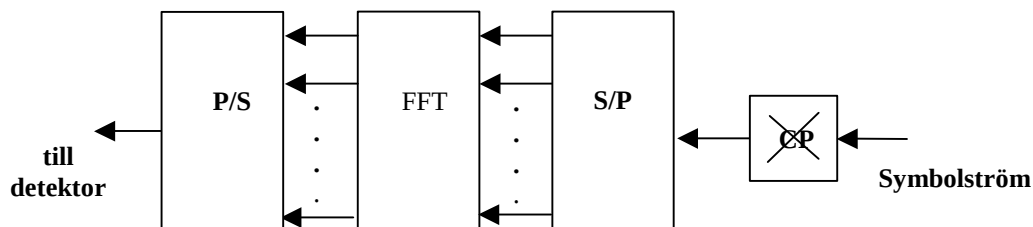
Figur 4-3: OFDM-sändarens struktur.

Det cykliska prefixet är en kopia av den sista delen av OFDM symbolen som läggs till före OFDM-symbolens början för att göra symbolen längre, se figur 4-4. Om prefixet är tillräckligt långt (minst lika långt som kanalens tidsspridning) kommer samtliga flervägsutbredningskomponenter (från föregående OFDM-symbol) att infalla inom denna tid och genom att klippa bort prefixet i mottagaren undviks därmed intersymbolinterferens.



Figur 4-4: Addition av cykliskt prefix (CP) sker genom att den sista delen av OFDM-symbolen kopieras och läggs till även i början av OFDM-symbolen.

I mottagaren sker de omvända operationerna, se figur 4-5. Det cykliska prefixet klipps bort innan en seriell-till-parallell omvandling, FFT (Fast Fourier Transform) och parallell-till-seriell omvandling sker.



Figur 4-5: OFDM-mottagarens struktur.

4.1.2 Synkronisering

Radiokanalen kommer att införa tids- och frekvensfel på den sända signalen, vilket OFDM är känsligt för. Dessa fel måste kompenseras för innan demodulering kan göras. Sändare och mottagare måste således synkroniseras.

En teknik för att i mottagaren utföra synkronisering i OFDM är att använda det cykliska prefixet, vilket inför en korrelation mellan sampel inom en OFDM symbol och detta kan användas för att hitta tids- och frekvenssynkronisering. En annan intressant teknik använder sig av pilottoner, dvs en känd datasymbol som sänds på en specificerad underbärvåg från vilken tids- och frekvensfel kan uppskattas och kompenseras för. Efter att synkronisering hittats kan OFDM-demodulering ske enligt figur 4-5.

4.1.3 Kanalestimering

Efter demodulering av OFDM-symbolen kan kanalestimering utföras. Kanalestimeringen är nödvändig vid koherent demodulering av signalerna. Dessutom använder sig flera MIMO-tekniker av kanalestimaten, vilket beskrivs senare i kapitlet.

Kanalen för de enskilda underbärvågorna kan estimeras efter FFT:n i mottagaren genom att på specificerade underbärvågor sända kända symboler (s.k. pilottoner) och jämföra de mottagna symbolerna med de utsända (som för pilottonerna är kända även i mottagaren). Avvikelsen mellan mottagen signal och utsänd signal orsakas i huvudsak av kanalens påverkan och brus.

Det finns olika mått för att estimeras kanalens status (kvalitet) och det enklaste sättet är att estimeras SNR per underbärvåg eller för ett block av underbärvågor. Genom att jämföra de detekterade symbolerna med de mottagna symbolerna fås ett mått på hur stor avvikelsen är. Avvikelsen kan sedan användas för att uppskatta SNR. Information från avkodaren kan ibland också användas för att estimeras SNR.

4.1.4 Adaptiv OFDM

Adaption av OFDM kan göras på olika sätt. Modulationen på underbärvågorna kan adapteras genom att följa underbärvågornas förändring i SNR så att en bättre bandbreddseffektivitet kan uppnås än för ett statiskt schema. Om kanalen förändras "storskaligt" (dvs kanalens tids-spridning förändras betydligt) kan OFDM-strukturen behöva ändras, t.ex. underbärvågornas bandbredd och antal, det cykliska prefixets längd samt antalet pilottoner. Bredden på frekvensblocket (antalet underbärvågor per block) är en parameter som vi vill kunna adaptera beroende på kanalens frekvenskaraktäristik.

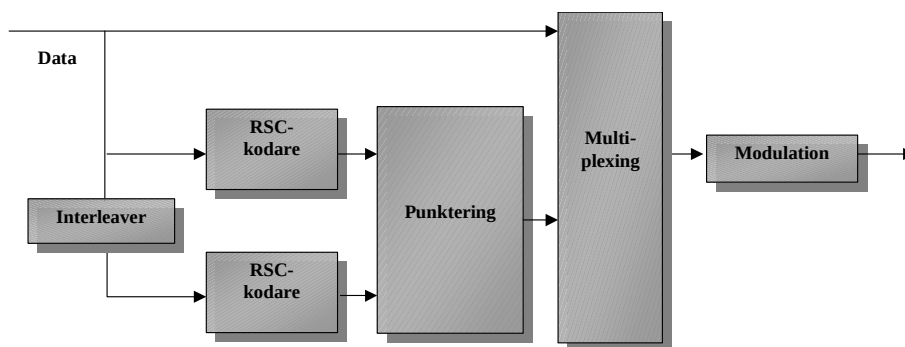
4.2 Felrättande kodning

Felrättande kodning är nästan alltid en förutsättning för att erhålla goda prestanda på en besvärlig radiokanal och kodning kommer därför att ingå i demonstratorn. Olika felrättande koder ska kunna användas, t.ex. turbokoder, faltungs-koder och blockkoder med olika takter.

Ett block för kanalkodning finns inte med i figur 4-1 över simuleringsmodellen utan data som anländer till OFDM-schemat ska vara kodat och randomiserat. Det krävs således även en återkoppling från mottagaren till sändaren om vilken kod som ska användas. Kombinationen av adaptiv kodning/modulation i OFDM behöver undersökas mer noggrant, speciellt vid införandet av turbokoder.

4.2.1 Turbokodning

Den klassiska turbokoden utgörs av två parallellt konkatenerade faltningskoder, se figur 4-6. Prestanda för turbokoder är bra för låga och moderata SNR, och vi förväntar oss att ofta ha ett lågt förhållande mellan bitenergin (E_b) och brusnivån (E_b/N_0) eftersom vi kommer att använda oss av adaptiv modulation. Ju högre modulationstyp som används, desto lägre blir bitenergin för ett givet SNR. Traditionella koder har fokuserat på att uppnå stora s.k. *minimivstånd* i koderna, vilket ger bra prestanda för höga E_b/N_0 . Anledningen till den överlägsna prestandan vid låga E_b/N_0 är att turbokoderna är designade för att minska den s.k. *multipliciteten av lågviktskodord*. Det innebär i praktiken att turbokoden designas så att fler av dess kodord får en hög vikt (stort minimivstånd) och koden får få kodord med litet minimivstånd. Medelvikten för kodorden vid turbokodning är högre än för traditionella koder, vilket ger en bättre prestanda vid låga E_b/N_0 . Traditionella turbokoder har normalt ett fåtal kodord med relativt litet minimivstånd och det försämrar prestanda vid höga E_b/N_0 .



Figur 4-6: Klassisk turbokodare, bestående av två rekursiva systematiska faltningskodare, punktering och multiplexing.

Interleaverns uppgift är att randomisera informationsbitarna till den andra rekursiva systematiska faltningskodaren (RSC-kodaren) för att minska risken att kodorden från båda kodarna samtidigt har låg vikt. Turbokodens prestanda förbättras med ökande interleaverlängd, men det leder även till ökad fördröjning. Koden kan därefter punkteras, dvs vissa kodbitar tas bort, för att erhålla önskad kodtakt, på bekostnad av en något försämrad prestanda.

Den stora upptäckten som gjort turbokoderna så populära de senaste åren är dock inte turbokoderna i sig, utan upptäckten av en relativt enkel suboptimal avkodningsalgorithm. Namnet turbokod kommer även från den iterativa avkodningsprocessen där outnyttjad information åter matas in i avkodaren i nästa iteration.

Prestanda vid turbokodning avgörs bland annat av valet av ingående koder, interleaverns storlek och struktur, antalet iterationer i den iterativa avkodningen och av hur punkteringen genomförs.

4.3 MIMO

System där både sändare och mottagare är utrustade med gruppantennor kallas för MIMO-system (Multiple Input Multiple Output).

Beroende på hur miljön mellan sändare och mottagare ser ut kommer olika MIMO-teknikerna att fungera olika bra. I fallet med ett MIMO-system kan sändningsdiversitet, mottagningsdiversitet, spatiell multiplexering, lobformning, eller kombinationer av dessa tekniker användas [3,7].

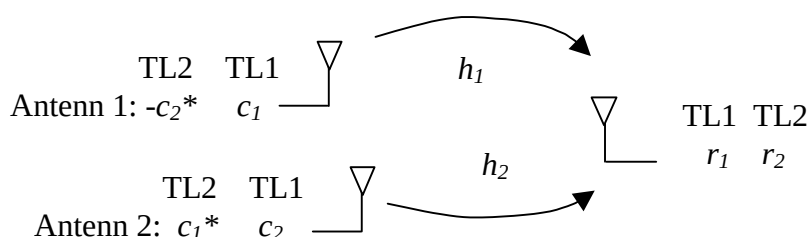
4.3.1 Mottagningsdiversitet

Mottagningsdiversitet med multipla antenner (rumsdiversitet) är en teknik som används för att hantera fädning. Vid rumsdiversitet utnyttjas det faktum att om mottagarantennerna är tillräckligt separerade från varandra kommer signalerna som infaller på dem att se olika ut (pga olika gångvägar och spridning). Den enklaste sammanvägningsmetoden, som kallas valdiversitet, väljer hela tiden den signal (det antennelement) som har högst SNR och genom detta fås diversitetsvinst i förhållande till ett system med endast en mottagarantenn. En annan vanlig diversitetsteknik, som ger bättre prestanda än valdiversitet, är Maximum Ratio Combining (MRC) vilken viktar ihop signalerna från de olika antennelementen proportionellt mot deras SNR. Därmed fås, utöver en minskad varians av SNR, även en förbättring av medel-SNR i mottagaren.

4.3.2 Sändningsdiversitet

I en del fall kan inte mottagaren använda multipla antenner på grund av utrymmesskäl, men samtidigt kan det ändå vara önskvärt att använda rumsdiversitet. Från den civila sektorn, där mobila enheter inte kan ha multipla antenner medan basstationen har relativt gott om utrymme och effekt, har tekniker som använder sig av sändningsdiversitet utvecklats. Dessa går ut på att sändaren använder sig av multipla antenner medan mottagaren har en eller fler antenner. Ju fler antenner desto högre diversitetsvinster.

Den enklaste MIMO-tekniken baserar sig på Alamoutis schema [1] varvid två sändarantennerna och en mottagarantenn används för att ge sändningsdiversitet. Före sändning buffrar sändaren två symboler c_1 och c_2 . I tidlucka ett (TL1) sänds symbol c_1 på antennelement ett och symbol c_2 på antennelement två. I tidlucka två (TL2) sänds sedan $-c_2^*$ på antennelement ett och c_1^* på antennelement två. Konjugeringen och negeringen görs för att det på ett enkelt sätt ska gå att lösa upp symbolerna i mottagaren. Eftersom de sända symbolerna använder både rums- och tidsdimensionen benämns den här typen av tekniker för Space-time coding (STC).



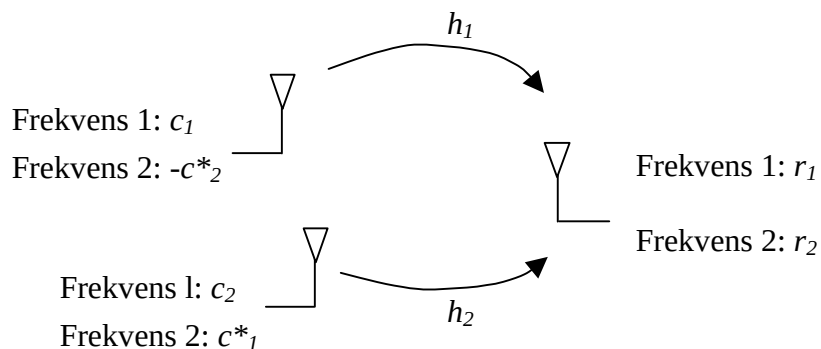
Figur 4-7: Schematisk bild av Alamoutis schema.

På grund av sändarantennernas separation i rummet kommer symbolerna som sänds från respektive antennelement att uppleva olika kanaler. Vid mottagarantennen kommer den mottagna signalen, i tidlucka ett, r_1 , och tidlucka två, r_2 , att vara en sammanblandning av de sända signalerna.

Om kanalerna är beroende (korrelerade) kommer r_1 och r_2 att vara blandprodukter av c_1 och c_2 och prestanda försämras. Kanalestimering av respektive kanal (h_1 och h_2) är nödvändig för att kunna lösa upp symbolerna. Dessutom krävs att kanalen är konstant över två på varandra följande symboler. Alamoutis schema kan utvidgas till att omfatta fler sändar- och mottagarantennerna vilket medför ytterligare diversitetsvinster.

Sändningsdiversitet i kombination med OFDM kan i princip ske på liknande sätt som beskrevs ovan. I den enklaste MIMO-tekniken för OFDM appliceras Alamoutis schema direkt i frekvens istället för tid. Detta kallas för Space-Frequency Coding (SFC) eftersom kodning sker över rums- och frekvensdimensionerna. I detta fall används inte tidsdimensionen som i STC. Däremot sker motsvarande komplexkonjugering och negering som i Alamoutis schema men symbolerna skickas istället på olika frekvenser. Här krävs att kanalen är konstant över två närliggande underbärsvågor.

Det finns även tekniker för sändningsdiversitet som använder alla tre dimensionerna (rum, tid och frekvens) vilka då kallas för Space-time-frequency coding (STFC). Med dessa tekniker kan ännu större vinster uppnås i vissa situationer, till priset av en ökad komplexitet.



Figur 4-8: Alamoutis schema över frekvens.

4.3.3 Spatiell multiplexering

Spatiell multiplexering går ut på att olika data skickas från samtliga sändarelement, under samma tidlucka och på samma frekvens. På grund av att data endast skickas en gång i tid och frekvens upptar inte repeterade sändningar (symboler) utrymme som nu istället kan utnyttjas till att höja kapaciteten. Spatiell multiplexering ger alltså ingen diversitetsvinst, men högre kapacitet kan erhållas än vid STC och SFC. Spatiell multiplexering fungerar emellertid bra endast under kraftig flervägsutbredning som kan uppkomma i t.ex. urbana miljöer. I scenarion med begränsad flervägsutbredning försämras prestanda för spatiell multiplexering och då är andra tekniker att föredra. Antalet mottagarantennerna måste vara lika många, eller fler, än antalet sändarantennerna som används för spatiell multiplexering. Den maximala kapacitetsvinsten som kan uppnås vid spatiell multiplexering är proportionell mot antalet sändarantennerna.

4.3.4 Lobformning

Lobformning kan användas för att rikta en huvudlob i den tänkta sändnings- eller mottagningsriktningen och därmed ge en förstärkning av nyttsignalen. Lobformning fungerar normalt bäst då det finns en tydlig direktvåg, alternativt en stark flervägskomponent som kan identifieras. I miljöer där det förekommer mycket spridning så att ett flertal lika starka signalkomponenter infaller till mottagaren från olika riktningar kan det vara svårare att lobforma, men eftersom maximalt sex antennelement används i det beskrivna scenariot blir huvudloben relativt bred och känsligheten mot flervägsutbredning minskar. Genom lobformning kan flervägsutbredningen reduceras något, men i scenarion med betydande flervägsutbredning behöver lobformningen troligen kompletteras med rumsdiversitet.

Adaptiv lobformning är en effektiv teknik för att i mottagaren undertrycka starka bredbandiga¹ störare eller interferenser. På stridsfordon 90 och stridsvagn 122 är det troligen svårt att använda mer än ungefär 6 antennelement i en gruppantennen avsedd för frekvensområdet 240-380 MHz. Det innebär att endast ett begränsat antal (normalt inte mer än fem, oftast färre beroende på kanalen) störare och interferenser kan undertryckas genom adaptiv lobformning.

¹ Smalbandiga störare undertrycks ofta effektivare genom smalbandig adaptiv bandpassfiltrering (notchfilter).

5 Adaptionbeskrivning för teknikkärnan

Adaption kan utföras på flera olika nivåer, och vi har tidigare identifierat tre olika nivåer av adaption [5], nämligen

1. adaption mot tjänstekrav,
2. adaption mot kanal (vågutbredningseffekter och signalmiljö),
3. adaption mot nätresurser.

Vi har för närvarande inom projektet begränsat oss till att studera de två första adaptionsnivåerna, men även den tredje adaptionsnivån är viktig för användarens slutliga prestanda. Huvudmålet med demonstrationen är att först visa på möjligheterna med kanaladaption i framtida militära radionoder. De övriga nivåerna av adaption kan därefter gradvis föras in i demonstratorn.

Många typer av adaption tror vi kommer att utföras på pakethnivå (i syfte att följa förändringar i kanal eller tjänstekrav mellan olika paket) eller för enskilda OFDM-symboler. Viss adaption, i synnerhet adaption som inkluderar även nätaspekter, förväntas istället utföras med en långsammare tidsskala.

5.1 Adaptionprocessen

Adaptionprocessen har en central betydelse i en adaptiv radionod. Normalt gäller att de moment som en adaptiv radionod behöver utföra för att genomföra en lyckad adaption är:

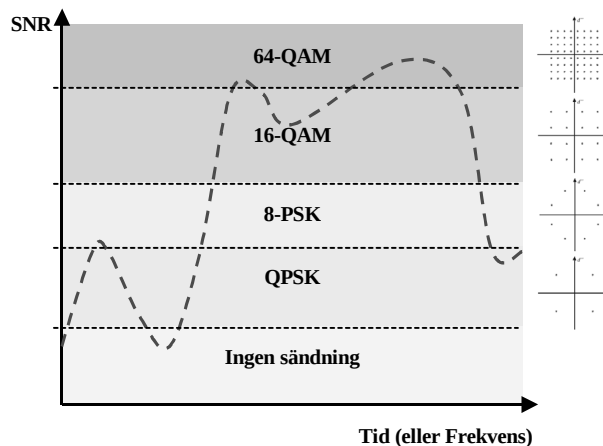
1. detektion,
2. analys,
3. slutsats,
4. åtgärd,
5. och utvärdering.

Adaptionprocessen börjar med att kanalen på något sätt förändras. Radionoden behöver först och främst upptäcka att en kanalförändring har inträffat (detektion), och därefter används olika estimeringsmått för analys av kanalen och till att fatta beslut om hur kanalen ser ut för tillfället (slutsats). Därefter beslutar den adaptiva radionoden om vilken åtgärd som är bäst att vidta i det befintliga scenariot. Slutligen behövs även olika mått som kan utvärdera resultatet efter åtgärden som vidtogs i respons mot kanalförändringen. Tiden för att utföra adaptionen är viktig, dvs tiden från det att kanalen på något sätt förändras till att en åtgärd är genomförd måste vara mindre än förändringshastigheten.

Inför implementeringen av en specifik adaption måste alltså ett eller flera estimeringsmått tas fram som möjliggör att rätt åtgärd vidtas och därefter ska även en utvärdering genomföras, antingen med samma estimeringsmått eller med ett nytt mått. Samma principer gäller även i ett fall då kanalen inte förändras men utvärderingen indikerar att prestanda inte är ”optimal”.

5.2 Adaptiv modulation

Adaptiv modulation är en teknik som rönt stort intresse de senaste åren. Anledningen är att tekniken har potentialen att väsentligt förbättra spektrumeffektiviteten, och därmed kapaciteten, i många olika kommunikationssystem [2]. Störst är intresset inom den civila



Figur 5-1: Principen för adaptiv modulation. De olika modulationsformerna kräver olika högt SNR för att garantera en bitfelshalt som inte överstiger en specificerad nivå. Symbolkonstellationerna visas även för de olika modulationerna.

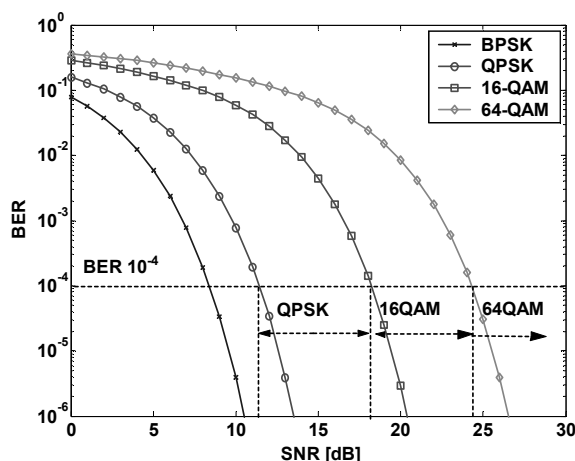
sidan där adaptiv modulation redan finns med i ett flertal olika standarder inom de befintliga (bl.a. EDGE) och kommande civila mobiltelefonisystem. Adaptiv modulation tillsammans med OFDM utgör t.ex. grunden i standarder för WLAN (Wireless Local Area Networks) som IEEE 802.11a och Hiperlan/2 [4].

Här beskriver vi ett förslag för hur den adaptiva modulationen kan genomföras i en adaptiv radionod. Först beskrivs en realistisk, praktiskt fungerande metod som därefter kan modifieras och förbättras. Målet med den adaptiva modulationen är att maximera radionodens spektraleffektivitet samtidigt som bitfelshalten (BER) hålls under en angiven nivå. Vår första approach går i korthet ut på att estimeras SNR i mottagaren för de olika underbärsvågorna i OFDM-systemet och därefter välja de modulationsmetoder på underbärsvågorna som ger en tillräckligt hög kvalitet (t.ex. mätt i bitfelshalt) för detta SNR, se figur 5-1. Symbolkonstellationerna visas även för de olika modulationerna. Vid QPSK-modulation väljs ett av fyra faslägen vid sändningen och den översända informationen (2 bitar/symbol, dvs 00, 01, 10 eller 11) fås från det valda fasläget. Utifrån ett givet krav på bitfelshalt kan SNR-värden bestämmas för de olika modulationerna över vilket bitfelshalten understiger kravet, se figur 5-2.

Förslag till genomförande av adaptiv modulation²:

1. Bestäm krav på bitfelshalt på länken utifrån olika tjänster.
2. Beräkna SNR-trösklar, dvs nivåer för (medel-)SNR där kraven på bitfelshalt uppfylls, för de modulationsmetoder som är aktuella, se figur 5-2.
3. Estimeras (medel-)SNR i mottagaren för de olika underbärsvågorna.
4. Använd SNR-trösklarna till att avgöra vilka modulationstyper som ska användas för de olika underbärsvågorna.
5. Mottagaren översänder information om de modulationstyper som sändaren ska använda för de olika underbärsvågorna.

² Här tillåts alla underbärsvågorna att ha olika modulation. Adaptionen kan också genomföras så att olika underbärsvågor med liknande kanal grupperas och samma modulation används inom de olika grupperna.



Figur 5-2: Illustration av adaptiv modulation som baseras på SNR. Bitfelshalten (BER) visas som funktion av SNR för olika modulationer över en AWGN-kanal. Olika modulationer är, för ett givet krav på BER, spektrumeffektivast för olika SNR-regioner.

6. Sändaren skickar ett nytt datameddelande med de angivna modulationstyperna.
7. Mottagaren kan slutligen estimerar momentant SNR för de olika underbärvägarna och därigenom utvärdera prestanda.

Punkt 1 och 2 kan genomföras i förväg, medan punkterna 3-7 genomförs kontinuerligt för varje OFDM-symbol. Den stora praktiska utmaningen med den adaptiva modulationen är givetvis att sändaren inte har kunskap om det SNR mottagaren har då den tar emot själva datameddelandet, utan vid en tidigare tidpunkt. SNR informationen estimeras i mottagaren och måste sedan överföras till sändaren. Detta orsakar en fördröjning och under denna fördröjning kommer kanalen att förändras. Därmed kommer SNR vid mottagningen av själva datameddelandet att skilja sig från de tidigare estimaten, vilket kan innebära att en högre modulationstyp används än vad mottagaren kan demodulera med det angivna kravet på bitfelshalt. En säkerhetsmarginal kan läggas på SNR-trösklarna för att göra den adaptiva modulationen mer robust.

Känsligheten mot fördröjningar vid adaptiv modulation kan i många fall reduceras väsentligt genom att införa prediktion av mottagarens SNR-värden. Målet med prediktionen är att utifrån tidigare estimat av SNR-värden försöka förutsäga vad SNR kommer att vara en bit framåt i tiden. Dock ökar prediktionsfelet ju längre fram i tiden SNR behöver predikteras och det finns därmed en praktisk gräns för hur stor fördröjningen kan tillåtas vara utan att adaptionsprestanda försämras avsevärt.

Målet för den här typen av adaptiv modulation är att se till att bitfelshalten för de översända symbolerna på de olika underbärvägarna inte överstiger det maximalt angivna. Det finns ett antal andra metoder för att beräkna tröskelvärden som istället försöker hålla medelbitfelshalten på det angivna, och därmed kan spektraleffektiviteten höjas. Dessa metoder är dock mer komplexa och ett flertal behöver modifieras så att de kan fungera i realistiska fall, t.ex. med fördröjningar.

Genom att dela in underbärvägarna i grupper behöver mindre information sändas över från mottagaren till sändaren om vilken modulationstyp som ska användas, istället för att tvingas skicka information om varje underbärvägs modulation. Ju större grupperna är desto mindre information behöver skickas. För att det ska fungera bra bör underbärvägarna inom gruppen uppleva ungefär samma kanal, och därför kan även antalet underbärvägar i grupperna behöva

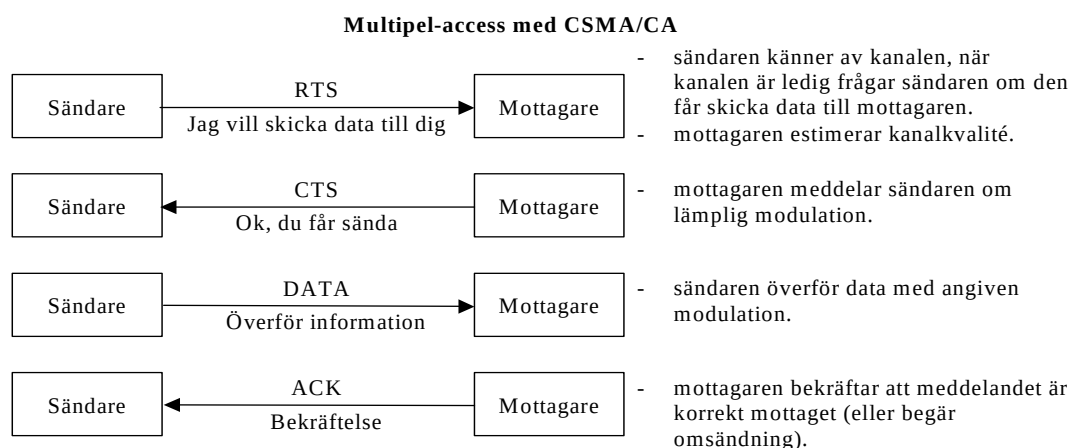
varieras. Extremfallen är antingen att varje underbärvåg får en egen modulationstyp eller att samma modulationstyp används på alla underbärvågor.

Om underbärvågorna inom en grupp inte upplever samma kanal, utan SNR varierar för underbärvågorna inom gruppen, krävs något sätt för att bestämma vilken modulationstyp som ska användas. Till exempel kan den underbärvåg med sämst SNR inom gruppen avgöra modulationstyp för alla underbärvågorna. Genom att istället beräkna och väga samman bitfelssannolikheterna för de olika underbärvågorna för olika modulationsmetoder och välja den modulation som ger högst kapacitet, samtidigt som kravet på bitfelshalten uppfylls, kan kapaciteten förbättras, men till priset av en ökad komplexitet.

5.2.1 Hur får sändaren information om vilken modulation som ska användas?

Den stora utmaningen vid införandet av adaptiv modulation ligger i att sändaren inte har ögonblicklig kunskap om kanalens kvalitet. Den resulterande fördröjningen i den adaptiva modulationen orsakas till stor del av nätets utformning (multipel access, MAC, protokollet). Ett mobilt ad hoc-nät av typen CSMA/CA³, där sändaren först sänder en fråga till mottagaren om denna kan ta emot ett meddelande och där den tänkta mottagaren därefter svarar, kan t.ex. ha en betydligt kortare fördröjning än ett TDMA-baserat⁴ mobilt ad hoc-nät där fördröjningen normalt blir ett antal tidluckor.

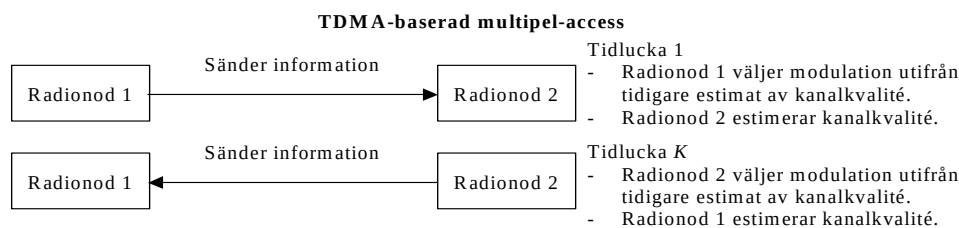
Exempel på hur den adaptiva modulationen kan genomföras i dessa två typer av ad hoc-nät kan ses i figur 5-3 och figur 5-4. Generellt gäller att valet av MAC-protokoll starkt kommer att påverka den prestandavinst som användaren kan erhålla vid användningen av adaptiva radionoder. I demonstratorn är ambitionen att påvisa vilka möjligheter som en adaptiv radionod kan ge användaren, men designen av nätet påverkar i slutändan hur väl dessa möjligheter kommer användaren tillgodo.



Figur 5-3: Exempel på adaptiv modulation i ett ad hoc-nät av typen CSMA/CA. RTS-paketet designas så att kanalen kan estimeras på detta. CTS-paketet designas så att information om parameterval kan infogas.

³ Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance.

⁴ Time Division Multiple Access.



Figur 5-4: Exempel på adaptiv modulation i ett TDMA-baserat ad hoc-nät. K är antalet tidluckor från att radionod 1 sänder till radionod 2 tills radionod 2 får sända till radionod 1. Varje paket behöver innehålla information om vilken modulation som används.

5.2.2 Adaptiv modulation och kodning

För att kunna nå den bitfelssannolikhet som en tjänst ställer krav på behövs ofta felrättande kodning. Att införa felrättande kodning kostar i kapacitet eftersom redundant information tillförs. Andelen redundans kan minskas genom att utnyttja information om kanalen (t.ex. SNR-nivå) vid avkodningen. Å andra sidan ger kodning en kodningsvinst, dvs kravet på SNR minskar för att uppnå en viss given bitfelssannolikhet. I ett system med adaptiv modulation innebär detta att SNR-trösklarna ändras för de olika modulationstyperna och på så sätt kan kodning, totalt sett, ge ökad kapacitet.

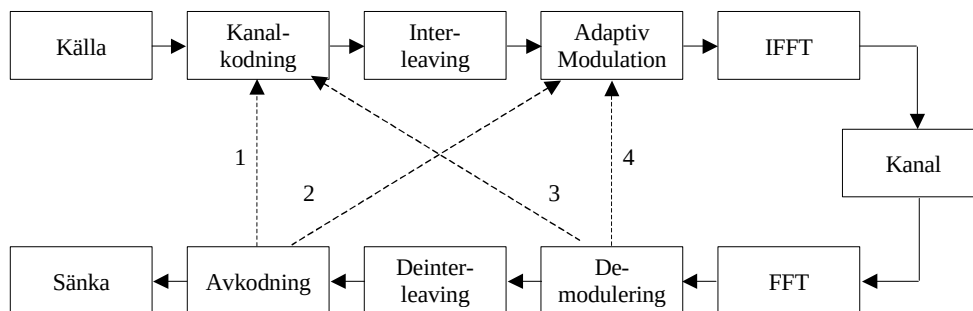
Beroende på scenario kommer olika koder att ge olika prestanda och ett system som även adapterar kodningen är intressant att studera. Turbokoder har utvecklats det senaste decenniet och de har visat sig ge bra prestanda för låga SNR, och de är högtintressanta för användning i adaptiva radionoder. I vissa scenarier behövs inte den prestanda som kan uppnås med turbokoder, och då kan enklare koder användas, t.ex. blockkoder.

Adaption av kombinationen kodning och modulation kan göras på ett flertal olika sätt, och vi beskriver de mest intressanta av dessa här. Följande grundalternativ finns att tillgå:

- Kodningen är bestämd och modulationen förändras.
- Kodningen förändras och modulationen är fast.
- Kodningen och modulationen förändras båda samtidigt mellan olika "moder".

Vid införandet av adaptiv kodning gäller allmänt att ett eller flera mått behövs, som kan användas för att fatta beslut om vilken kod som ska användas, och ange lämpliga parametrar för koden (kodtakt, punktering, osv). En möjlighet är att adaptera mot bitfelssannolikheten i mottagaren, dvs information från avkodaren för kanalkoden används (pilarna 1 och 2 i figur 5-5). Problemet med det är fördröjningen i adaptionen. Ett snabbare alternativ är normalt att adaptera mot SNR, som tidigare beskrivits för adaptiv modulation (pilarna 3 och 4 i figur 5-5).

Svårigheten med att kombinera adaptiv kodning med det ovan beskrivna förslaget till adaptiv modulation, där varje underbärvåg tillåts anta en egen modulation, ligger i att tjänsten ställer krav på kvaliteten efter avkodningen. Därför behöver tjänstens krav översättas till ett krav på maximalt tillåten bitfelshalt före avkodningen. Det nya kravet på bitfelshalt används därefter för att beräkna SNR-trösklarna som används vid valet av modulation.



Figur 5-5: Schema för informationsflöde vid adaptiv kodning och modulation.

Om alla underbärvägor istället adapteras gemensamt för varje OFDM-symbol (dvs alla underbärvägor tvingas använda samma modulation) kan kombinationen av adaptiv kodning och modulation implementeras enklare. Först simuleras BER-kurvor för kombinerade modulations- och kodningsmoder. Därefter beräknas SNR-trösklar för de angivna kraven på bitfelshalter. Genom att estimeras SNR i mottagaren kan sedan SNR-trösklarna användas till att välja den bästa modulations- och kodningsmoden, se till exempel [8].

5.3 Adaption av MIMO-systemet

MIMO-systemet kan användas på många olika sätt, t.ex. för lobformning, spatiell multiplexering eller rumsdiversitet, eller genom att kombinera teknikerna. Adaptiv lobformning i mottagaren är effektivt i scenarion med ett fåtal starka bredbandiga störare eller interferenser. Lobformning kan användas vid sändning och mottagning för att maximera SNR och för att reducera flervägsutbredningen. Rumsdiversitet, som kan utföras både vid mottagning och vid sändning, är ett effektivt sätt att motverka fädningen, samtidigt som SNR kan förbättras. Spatiell multiplexering kan användas till att öka kapaciteten i kanaler med kraftig flervägsutbredning.

De olika MIMO-teknikerna fungerar olika bra för olika scenarion. Därför behöver MIMO-systemet adapteras så att den bästa tekniken används för det befintliga scenariot. Olika mått i mottagaren kan användas för att avgöra om kanalen är fädande. Det kan t.ex. utföras genom analys av fördelningen hos SNR (för olika underbärvägor) eller genom estimering av den s.k. K -faktorn som indikerar om kanalen har en kraftig direktvägskomponent, och i så fall hur dominerande den är, eller om kanalen kan anses vara Rayleigh-fädande. För att adaptera mellan olika MIMO-tekniker kan också kanalens rang användas. Måttet kan sägas beskriva antalet oberoende utbredningsvägar mellan sändare och mottagare. Om kanalen har hög rang är spatiell multiplexing ett intressant alternativ, medan diversitetsmetoder eller lobformning bör användas då kanalen har låg rang.

6 Genomförandeplan

Demonstrationen är planerad att äga rum under hösten 2004, senast under november månad. Vår ambition är att en första enkel fungerande version skall finnas färdig till sommaren 2004. I avsnitt 3.3 beskrevs de funktioner och tekniker som vi anser är intressanta att implementera i en demonstrator, och där gavs även en preliminär prioritetsordning för dessa. Demonstratorn skall sedan vidareutvecklas under hösten. Uppbyggnaden av demonstratorn planeras ske etappvis genom en successiv utveckling och förädling av ingående delar.

Nästa steg är att ta fram detaljerade tidplaner för implementationen av demonstratorns olika delar, dvs radiokanalen, teknikkärnan och användargränssnittet. Detaljplanerna ska även innehålla implementeringsförslag för de föreslagna teknikerna. Följande delar kommer att i ett första skede implementeras i demonstratorn.

En deterministisk kartbaserad modell för radiokanalen, baserad på Channel3D, som möjliggör användningen av multipla antenner i sändare och mottagare.

I teknikkärnan ska följande delar ingå:

- Sändar- och mottagarmoduler baserat på OFDM-teknik.
- Adaptiv modulation.
- Mottagningsdiversitet
- Sändningsdiversitet.

I användargränssnittet ska följande delar ingå:

- Kartvisning.
- Positioner och rörelse för sändare, mottagare och eventuella interferenser eller störare.
- Resultatvisning, t.ex. filöverföring eller reeltidsöverföring av tal och video.
- Systemstatus, presentation av tekniker som används.

7 Referenser

- [1] S.M. Alamouti, "A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol 16, nr 8, 1451-1458, oktober 1998.
- [2] S. Catreux, V. Erceg, D. Gesbert och R.W. Heath, "Adaptive Modulation and MIMO Coding for Broadband Wireless Data Networks", *IEEE Communications Magazine*, 108-115, Juni 2002.
- [3] D. Gesbert, M. Shafi, D.-S. Shiu, P.J. Smith och A. Naguib, "From Theory to Practice: An Overview of MIMO Space-Time Coded Wireless Systems", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol 21, nr 3, 281-302, april 2003.
- [4] P. Heiskala och J. Terry, *OFDM Wireless LANs: A Theoretical and Practical Guide*, Sams Publishing, ISBN 0-672-32157-2, september 2002.
- [5] P. Johansson, L. Pääjärvi och J. Rantakokko, "Adaptiv radionod – ett systemförslag", FOI-R--0714--SE, ISSN 1650-1942, december 2002.
- [6] P. Krans, L. Ladell och B. Lundborg, "3D vågutbredning - Delstudie inom projekt FFTK", FOI MEMO Dnr 03-169:10, september 2003.
- [7] A.F. Naguib, N. Seshadri och A.R. Calderbank, "Increasing Data Rate over Wireless Channels", *IEEE Signal Processing Magazine*, 76-92, maj 2000.
- [8] J. Rantakokko och H. Tullberg, "Adaptive Radio Node", PvTT Seminar on Signal Processing Advances and Smart Antenna Systems, oktober 2003.