

Kapitel 1

Introduktion

Detta är en svensk översättning av det populärvetenskapliga introduktionskapitlet i doktorsavhandlingen *Multiantenna Cellular Communications: Channel Estimation, Feedback, and Resource Allocation* av Emil Björnson. Forskningsämnet är telekommunikation och avhandlingen skrevs på Avdelningen för signalbehandling, ACCESS Linnaeus Center, Skolan för elektro- och systemteknik, Kungliga Tekniska högskolan (KTH), 2007-2011.

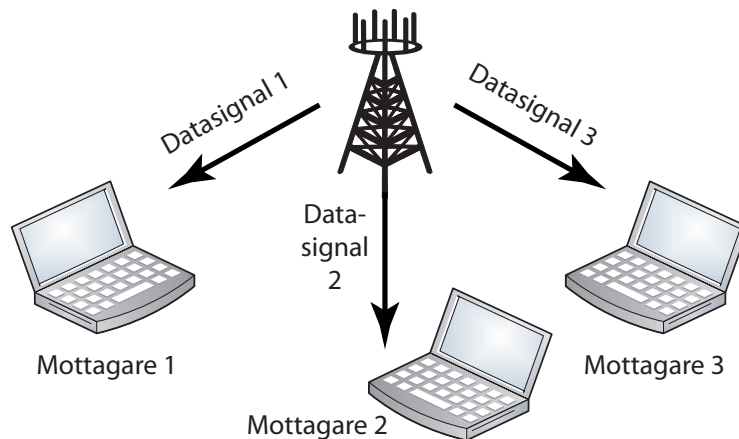
Detta kapitel ger en grundläggande introduktion till ämnena som behandlas i avhandlingen: digital kommunikation, trådlösa kanaler, sändning med flera antenner och hur överföringar fungerar i mobiltelefonisystem. Målet är att förmedla tillräckligt med bakgrundsinformation för att kunna förstå de problemställningar som behandlas i avhandling samt hur avhandlingen bidrar till utvecklingen av dessa forskningsområden.

1.1 Digital kommunikation

Syftet med digital kommunikation är att överföra någon typ av information från en användarterminal till en annan. Denna *digitala* information består av en (ändlig) sekvens med så kallade *bitar*, alltså en sifferkombination med ettor och nollor. Dessa bitar kan i princip beskriva vilken information som helst, antingen exakt eller ungefärligt. En text består av ett begränsat antal olika bokstäver och tecken och kan därför beskrivas exakt med bitar; om vi låter varje tecken representeras av en specifik sifferkombination så räcker åtta bitar till att beskriva $2^8 = 256$ olika tecken, vilket är mer än alla vanligt förekommande bokstäver och symboler i västerländska språk. Att text kan beskrivas exakt med bitar var något som Samuel Morse och hans kollegor uppmärksammade redan på 1800-talet när de skapade Morsealfabetet. De behövde ett sätt att överföra text via den elektriska telegrafan och lät därför varje bokstav i Morsealfabetet motsvaras av en sekvens med långa och korta toner, vilket är just en sekvens med bitar.

Ljud och bilder kan, i motsats till text, bara beskrivas med ett (begränsat) antal bitar på ett ungefärligt vis, eftersom de inte är begränsade i hur de låter eller ser ut. Omvandlingen till en ungefärlig digital version består av två steg: *sampling* och *kvantisering*. Sampling innebär exempelvis att en bild blir uppbyggd av ett begränsat antal pixlar (dvs. bildpunkter med en distinkt färg), medan kvantisering innebär att färgen i varje pixel beskrivs av en begränsad färgpalett (24 bitar kan representera miljontals olika färger). På motsvarande sätt innebär sampling att ljudet bara lagras ett visst antal tillfällen per sekund (t.ex. 44.100 tillfällen/sekund på en CD), medan kvantisering ger en ungefärlig beskrivning av ljudet vid varje tillfälle som kräver ett begränsat antal bitar (t.ex. 16 bitar/tillfälle på en CD). Om samplingen och kvantiseringen är tillräckligt noggrann, vilket innebär att antalet bitar är tillräckligt stort, är det nästan omöjligt för en människa att uppfatta någon skillnad mellan den ursprungliga information och den ungefärliga digitala versionen.

Varje sekvens av bitar (t.ex. en text eller en film) kallas för en *datasignal* i den här avhandlingen och kan beskriva någon godtycklig information (det är oviktigt om bitarna beskriver just en text eller en film). Vi studerar ett scenario där en sändare ska förse en uppsättning trådlösa användarterminaler med olika datasignaler (se Figur 1.1). Dessa signaler skickas som radiovågor och det övergripande målet är att överföra dem till sina respektive motta-



Figur 1.1: Denna avhandling behandlar ett scenario där en sändare skickar olika datasignaler till en uppsättning mottagare.

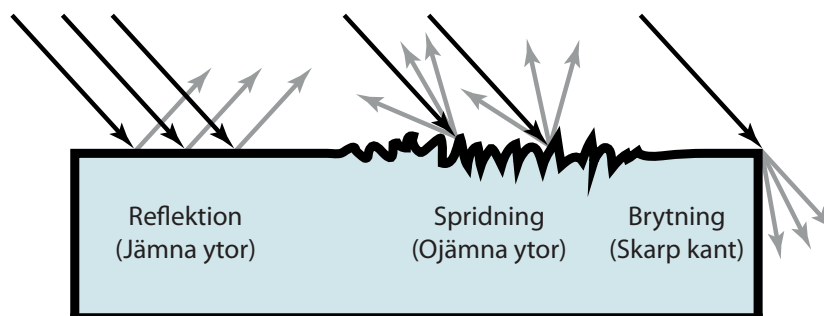
gare så snabbt och effektivt som möjligt. *Datahastigheten* beskriver hur många bitar som kan överföras till en specifik användare per sekund. Höga datahastigheter bör eftersträvas eftersom det innebär snabb kommunikation, men detta gör även överföringen mer sårbar för störningar (t.ex. från andra signaler i omgivningen och från bakgrundsbruset). Den effektiva datahastigheten beror i princip på hur mycket effekt som används för att skicka datasignalen dividerat med effektnivån för störningarna. Den tillgängliga sändeffekten begränsas av faktorer som elförsörjning, nationella regleringar (t.ex. för tillåten effekt på olika frekvenser) och driftkostnader. Från ett ingenjörsperspektiv innebär därför effektiv dataöverföring att de tillgängliga effektresurserna används för att uppnå så höga datahastigheter som möjligt.

Det är inte självklart att datahastigheten är det bästa måttet på hur bra systemet fungerar. För varje datahastighet finns det nämligen en risk att störningarna råkar vara så stora att mottagaren inte kan återskapa den exakta datasignalen; vissa nollor kan feltolkas som ettor och vice versa. Detta kan illustreras med att lyssna på en Morse-överföring. Det är enkelt att höra skillnaden mellan långa och korta toner i ett tyst rum, men om ett jetplan råkar flyga förbi ovanför taket så går det inte att urskilja någonting.

Risken för feltolkningar ökar med datahastigheten och fel kan ha avgörande konsekvenser: "ja" kan förväxlas med "nej". Sådana misstag kan man undvika genom att ha en mekanism för att upptäcka fel. Om någon skickar ett textmeddelande så kan vi lägga till några bitar för *feldetektering*. Dessa kan exempelvis beskriva hur många gånger varje bokstav förekommer i texten. Mottagaren kan sedan kontrollera om den mottagna texten har ett korrekt bokstavsinnehåll. Om detta inte är fallet så vet mottagaren att något är fel och kan begära att meddelandet skickas på nytt. Effektiv överföring innebär därmed att hitta en bra balans mellan att ha en hög (ursprunglig) datahastighet och en låg risk för fel. Utformningen av feldetekteringen är ett stort forskningsområde i sig självt och behandlas inte i avhandlingen, men tydliggör en av huvudorsakerna till att man skickar digital information (även om det bara ungefärligt beskriver originalinformationen): feldetekteringen säkerställer att mottagaren får exakt den information som skickades från sändaren.

1.2 Trådlösa kanaler

När digital information ska överföras från en apparat till en annan så kallas vägen/mediet mellan dem för en *kanal*. Det finns två huvudsakliga typer av kanaler: trådbundna och trådlösa. Den första kategorin innebär att signalerna sänds som elektriska impulser i koparkablar eller som ljus i fiberoptiska kablar. Avhandlingen fokuserar på den andra kategorin, trådlösa kanaler, där datasignalerna representeras av elektromagnetiska radiovågor som utbreder sig genom luften (och andra medium). Mobiltelefoni och trådlösa datornätverk är typiska exempel på kommunikationssystem som använder trådlösa kanaler. Trådlös kom-



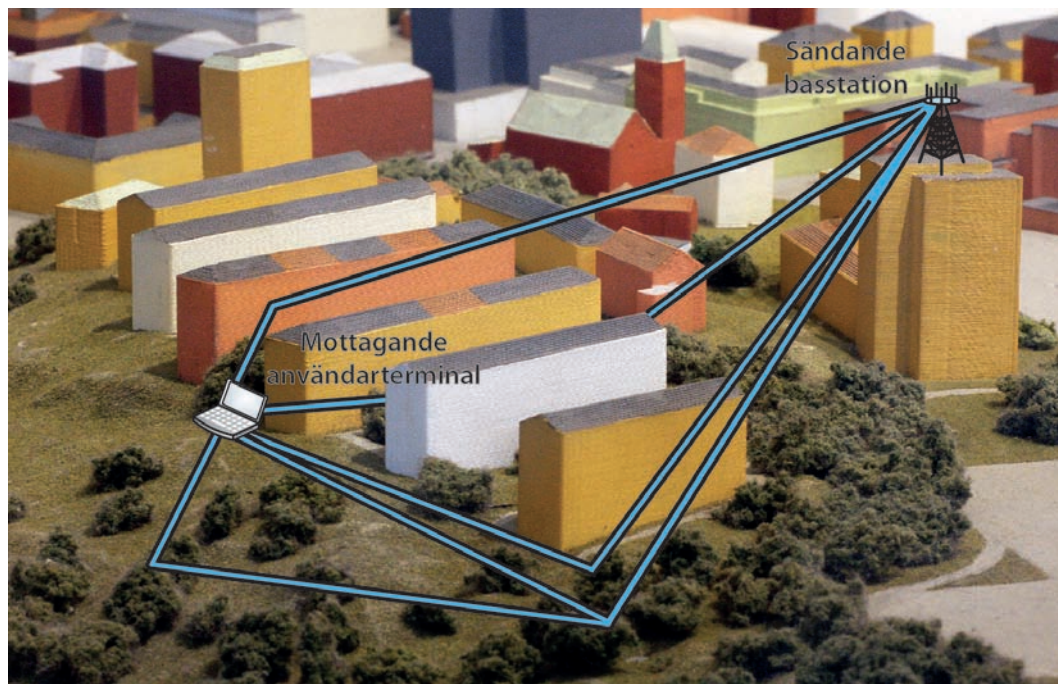
Figur 1.2: Illustration av tre utbredningsegenskaper hos radiovågor.

munikation är mer flexibel än trådbunden kommunikation eftersom användarna kan röra sig fritt i omgivningen. Nackdelen är att den trådlösa kanalens egenskaper ständigt förändras, särskilt när användaren rör sig, vilket gör det svårare att anpassa datahastigheten efter kanalen. Följande utbredningsegenskaper ger viss förståelse för beteendet och problemen med trådlösa kanaler:

- **Spridningsförlust:** När radiovågor skickas från en antenn så utbreder de sig i alla riktningar, ungefär som vattnet från en sprinkler. Man kan därför föreställa sig att ju längre det är mellan sändaren och mottagaren, desto mindre signaleffekt (eller vatten) kommer att nå destinationen. Denna minskning kallas *spridningsförlust* och avgör hur stor andel av signaleffekten som tas emot. Andelen minskar snabbt med avståndet; för varje fördubbling av avståndet så försvinner ytterligare 75% av signaleffekten ifall det är fri sikt mellan sändaren och mottagaren, och så mycket som 90% kan försvinna (per fördubbling) i stadsmiljöer där det bara finns flervägsutbredning (se nästa punkt).
- **Flervägsutbredning:** Eftersom radiovågorna utbreder sig i alla riktningar så kommer de att nå mängder av objekt i omgivningen: byggnader, vägbanor, bilar, träd, etc. Dessa objekt absorberar delar av signaleffekten. Beroende på objektets struktur och material kommer vågorna även att reflekteras (mot jämna ytor), spridas (mot ojämna ytor) eller brytas (ifall objektet har skarpa kanter). Dessa utbredningsegenskaper illustreras i Figur 1.2. Resultatet är att de utsända radiovågorna träffar en mängd olika objekt och når mottagaren längs olika vägar, se Figur 1.3. Denna flervägsutbredning kan vid en första anblick verka fördelaktig eftersom en större andel av den utsända signaleffekten når fram (varje väg bär med sig lite signaleffekt). Men eftersom vägarna är olika långa så kan komponenterna vara ur fas och därför motverka snarare än stödja varandra. Detta fenomen illustreras i Figur 1.4 och man kan föreställa sig det som havsvågor, vilka är resultatet av vatten som strömmar åt olika håll och ibland skapar vågtoppar och ibland vågdalar. Mottagaren vill vara i en punkt där vågorna är höga, men de ständiga variationerna gör det svårt, för även om mottagarterminalen är stilla så kommer olika objekt i omgivningen att förflyttas och påverka flervägsutbredningen.
- **Skuggning:** I vissa miljöer finns stora byggnader eller kullar som blockerar vägen mellan sändaren och mottagaren. Detta kallas för skuggning och innebär i princip att den mottagna signaleffekten kan vara mycket lägre i ett visst område än vad som beskrivs av spridningsförlusten. Till skillnad från flervägsutbredning skapar skuggning långsamma variationer i den mottagna signaleffekten – man måste lämna det skuggade området för att situationen ska kunna förbättras.

Rent teoretiskt är det möjligt att hitta en exakt modell för hur radiovågorna färdas mellan sändaren och mottagaren, men detta är inte särskilt meningsfullt eftersom omgivning ständigt förändras. Dessutom behövs inte en så detaljerad modell, utan det räcker att dela in kanalegenskaperna i två typer av så kallad fädning¹:

¹Begreppet fädning kommer från engelskans *fading*. Alternativ översättning är blekning eller borttoning.



Figur 1.3: Illustration av en trådlös kanal i stadsmiljö. Trots att det inte är fri sikt mellan sändaren och mottagaren så kan signal nå fram genom flervägsutbredning (t.ex. reflektioner i byggnader, spridning i träd, osv.).

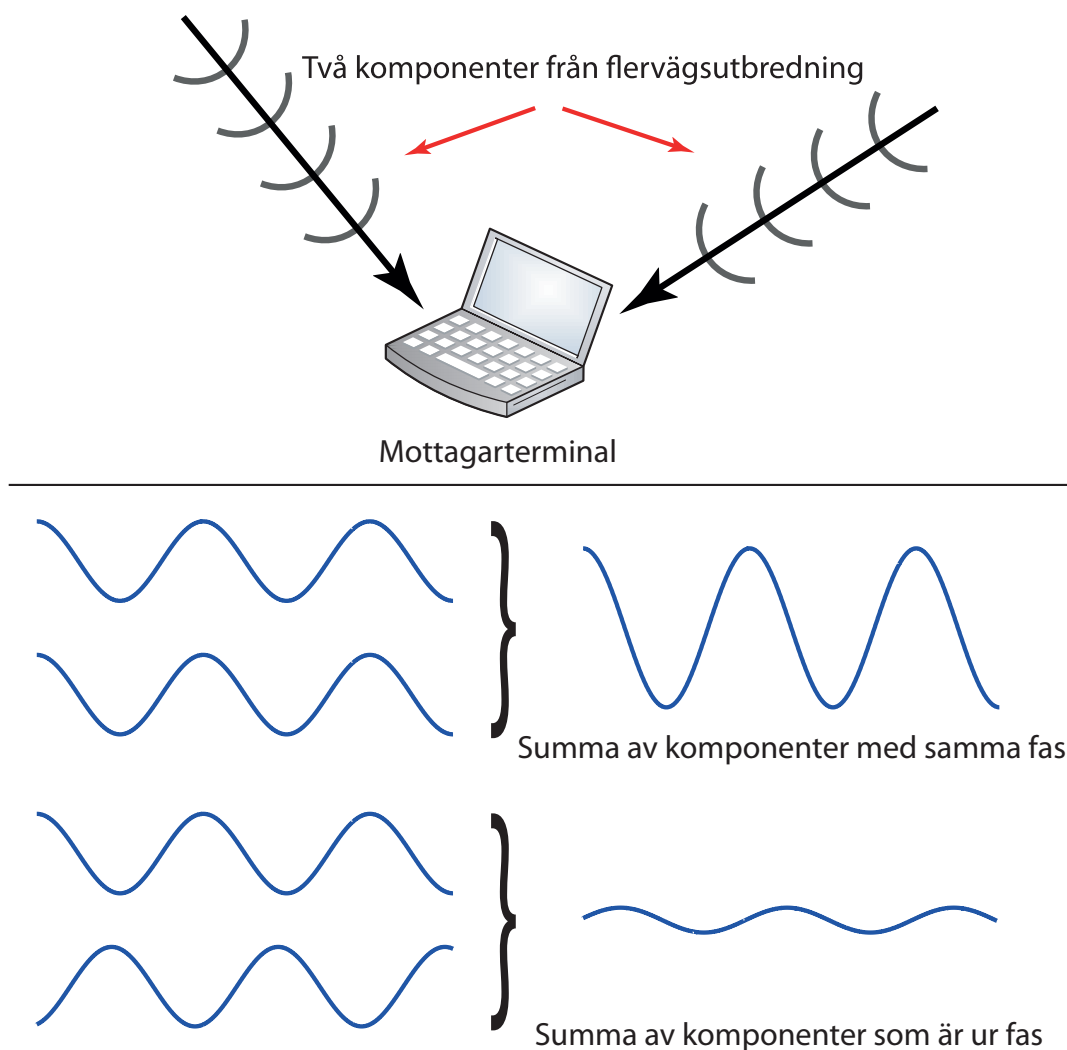
- **Storskalig fädning:** Långsamma variationer som sker när användarterminaler färdas över ett större område. Dessa beror exempelvis på spridningsförluster och skuggning.
- **Småskalig fädning:** Snabba variationer som sker hela tiden på grund av förändringar i flervägsutbredningen.

Avhandlingen antar att den storskaliga fädningens egenskaper är kända hos sändaren och mottagaren, eftersom förändringarna är tillräckligt långsamma för att kunna mätas och följas. För att möjliggöra analys antar vi att den småskaliga fädningen har konstanta egenskaper under en kort period (t.ex. några millisekunder) som kallas *koherenstiden*. Detta medför att egenskaperna bara behöver mätas en gång per sådan tidsperiod. Den tillgängliga informationen kring kanalens egenskaper kommer härnäst att kallas *kanalkännetecken*.

Frekvensspektrum: Smalbandigt och bredbandigt

Radiofrekvensspektrumet är en global resurs som kan användas för många olika saker: FM radio, tevesändningar, mobilkommunikation, trådlösa datornätverk, satellittjänster, navigation, amatörradio, militära tillämpningar, etc. Frekvensspektrumet är med andra ord fullproppat och det är svårt att hitta oanvända resurser som kan utnyttjas för nya trådlösa tjänster. Många länder släckte nyligen ner sina analoga tevesändningar och ersatte dem med effektivare digitala tekniker. Detta frigjorde vissa frekvensband och möjliggjorde utbyggnaden av fjärde generationens mobiltelefoni. Men frekvensresurserna är fortfarande otillräckliga, vilket har gjort licensiering av spektrum till en stor kostnad för teleoperatörerna. Från ett ingenjörsperspektiv ska trådlösa kommunikationssystem utformas så att de utnyttjar de tillgängliga frekvensresurserna så effektivt som möjligt.

De flesta trådlösa kommunikationssystem sänder på frekvenser någonstans i området 0,7-5 GHz och har en total bandbredd på 10-40 MHz. Så stora bandbredder kallas *bredbandiga* och är komplicerade att mäta och skapa modeller för eftersom den småskaliga fädningen har olika beteende och egenskaper i olika delar av frekvensbandet. Det är därför vanligt att dela in bandbredden i många mindre frekvensband som är *smalbandiga*. Delningen utförs så att

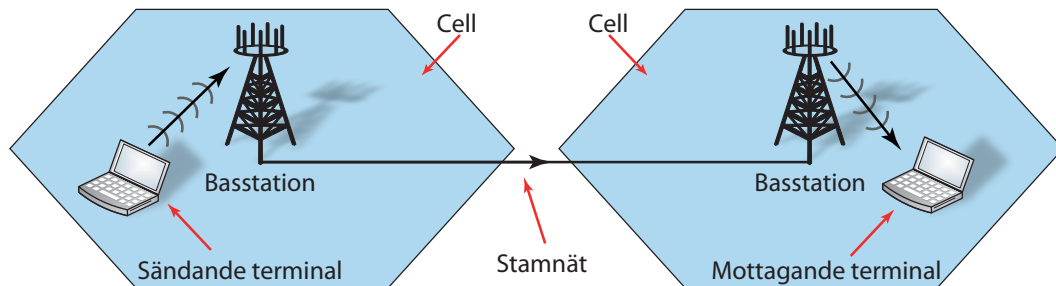


Figur 1.4: Illustration av flervägsutbredning där radiovågorna når mottagaren längs olika vägar. Om alla komponenter har samma fas så kommer den mottagna signalen att bli starkare. Men vägarna är olika långa och därför kan komponenterna motverka varandra genom att vara ur fas. De snabba förändringar i kanalen som skapas av flervägsutbredning kallas småskalig fädnings.

kanalegenskaperna är ungefär desamma i hela frekvensbandet, vilket underlättar mätning av dem. De senaste standarderna för mobiltelefoni och trådlösa datornätverk använder en så kallad *ortogonal frekvensdelningsmultiplex*-teknik (OFDM) för att dela en bredbandig kanal i många smalbandiga delkanaler. Denna avhandling fokuserar på smalbandiga kanaler och resultaten kan enkelt appliceras på varje delkanal i ett OFDM-system.

1.3 Cellulära telekommunikationssystem

Två trådlösa användarterminaler kan i princip kommunicera direkt med varandra (precis som walkie-talkies), men detta är inte särskilt praktiskt eftersom avståndet mellan dem antingen måste vara litet eller så krävs enorma mängder energi för att nå fram. Detta brukar lösas genom att man delar upp ett geografiskt område i celler där varje cell styrs av en basstation. Dessa basstationer är placerade på förutbestämda platser, företrädesvis på hustak och andra upphöjda platser som gör det lättare för radiovågorna att nå fram till användare i cellen (dvs. det minskar risken för skuggning). Basstationerna är sammankopplade genom



Figur 1.5: Schematisk beskrivning av cellulär kommunikation mellan användare i olika celler. Den sändande användarterminalen skickar datasignaler till sin basstation. Datasignalen vidarebefordras över stamnätet till den basstation som ansvarar för mottagaren och skickar den trådlöst till denna användarterminal.

ett *stamnät* som kan bestå av både kablar och trådlösa mikrovåglänkar.

När en terminal vill skicka en datasignal till en annan terminal så skickas signalen först trådlöst till den närmaste basstationen. Denna basstation vidarebefordrar signalen över stamnätet till den basstation som är närmast den mottagande terminalen. Slutligen skickas datasignalen trådlöst till mottagaren. Detta exempel illustreras i Figur 1.5.

Cellulära kommunikationssystem har många fördelar jämfört med direkt kommunikation:

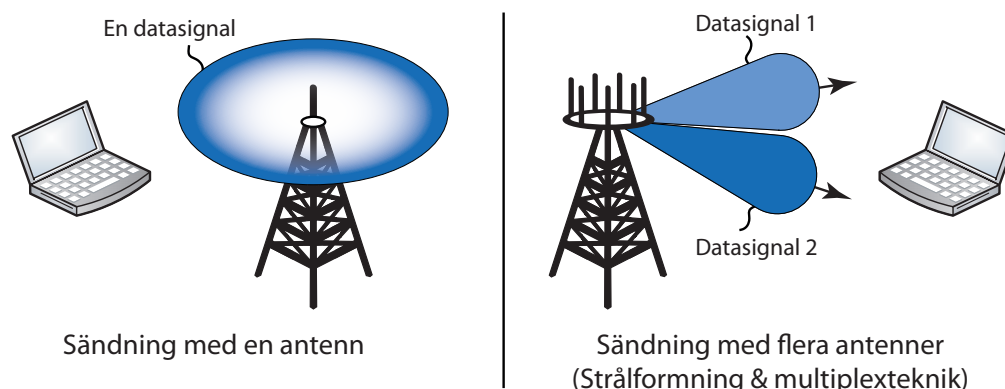
1. Kortare avstånd innebär lägre effektförbrukning och möjliggör högre datahastigheter.
2. Effektivare användning av frekvensresurser eftersom samma frekvensband kan användas samtidigt i flera geografiskt avdelade celler (med bara små störningar som följd).
3. Det är enkelt att kommunicera med det fasta telenätet och att ansluta till Internet.

Avhandlingen studerar cellulära kommunikationssystem och analyserar hur sändningarna i en cell ska utformas för att uppnå höga datahastigheter och hur cellerna kan koordinera sina sändningar för att minska störningarna. Vi fokuserar på överföring från basstationer till mottagande användare, vilket brukar ses som ett svårare forskningsproblem än sändning i den motsatta riktningen.

Sändning med flera antenner

Den totala datahastigheten i ett cellulärt kommunikationssystem kan förbättras genom att man placerar mer än en antenn på varje basstation och varje användarterminal. Sådana system kallas *multiple-input multiple-output* (MIMO), vilket kan översättas med att ha flera infarter till kanalen och flera utfarter (dvs. sändarantennerna respektive mottagarantennerna). Varje sändarantenn kan ses som en mun och varje mottagarantenn som ett öra. Att ha flera munnar och öron skapar diversitet och möjliggör så kallad multiplexteknik:

- **Diversitet:** Flervägsutbredningen blir olika mellan varje par av sändarantenn och mottagarantenn. Detta skapar en diversitet/mångfald av olika utbredningsvägar som datasignalen kan färdas till destinationen. En av dessa vägar ger den starkaste signalen och bör användas för överföringen. Genom att välja den starkaste vägen bland flera möjliga kan man självfallet få bättre datahastigheter än om det saknas valmöjligheter (som i fallet med en antenn). Det kan beskrivas som att prata med flera munnar på ett sådant sätt att rösten riktar mot mottagaren och att vrida öronen för att lyssna noggrant i denna riktning. Den bästa utbredningsvägen får man oftast inte av att välja bara en sändarantenn/mun och en mottagarantenn/öra, utan genom att kombinera allihopa på ett sätt som skapar en stark röst som är lätt att urskilja. Denna metod



Figur 1.6: Jämförelse mellan överföring med en antenn och flera antenner. Signalen från en sändarantenn utbreder sig i alla riktningar (och de flesta riktningarna är sådana där signalen inte når fram till mottagaren). Med flera sändarantenner kan signalen grovriktas mot mottagaren, vilket illustreras med rundade strålar och kallas strålförning. Det är även möjligt att skicka flera samtidiga signaler med olika strålförning (detta kallas multiplexteknik).

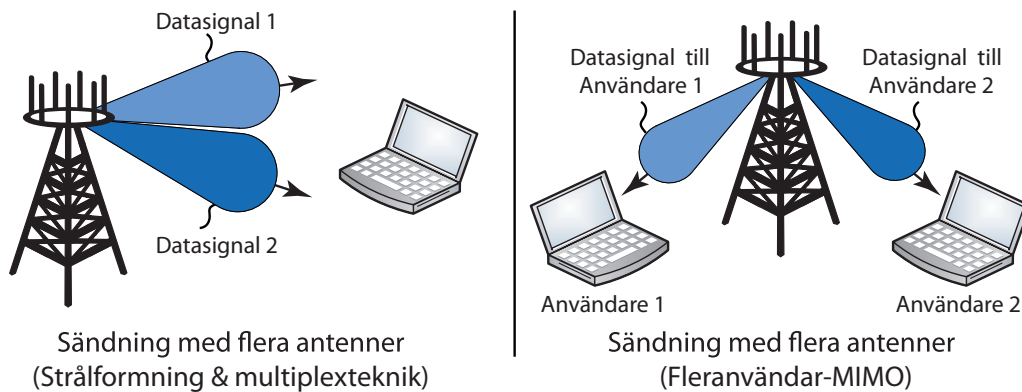
kallas *strålförning*² eftersom man försöker skapa en riktad signal längs en stråle till mottagaren, istället för att skicka signalen i alla riktningar som i fallet med en antenn. Den bästa strålförningsriktningen kan vara ganska olik fågelvägen eftersom det ofta inte är fri sikt mellan sändaren och mottagaren utan endast finns flervägsutbredning (se Figur 1.3).

- **Multiplexteknik:** Istället för att bara använda den bästa utbredningsvägen, som beskrevs i diversitetsfallet ovan, så kan antennerna även användas för att skicka många parallella datasignaler. Man kan tänka sig detta som att lyssna på olika röster med varje öra och det kallas *multiplexteknik*, där multiplex betyder mångfaldigande. Detta kan man uppnå genom att rikta olika datasignaler till olika öron med hjälp av strålförningssidan som illustrerades i Figur 1.6. För att skicka fyra samtidiga signaler krävs det att både sändaren och mottagaren har minst fyra antenner vardera – minimumet av antalet munnar och öron avgör hur många signaler som kan skickas samtidigt.

När en apparat har flera antenner är det inte självklart om dessa bör användas för att uppnå diversitet eller för multiplexteknik – eller lite av varje. Diversitet minskar risken för att det uppstår fel i sändningen (eftersom alla öronen är fokuserade på samma signal), medan multiplextekniker kan öka den totala datahastigheten (eftersom varje öra hör en separat signal). Strålförning kräver att kanalegenskaperna är någorlunda kända, annars kan man inte veta vilken riktning som ska väljas för strålen. Multiplexteknik kräver därför en ganska noggrann kanalkännedom (så att varje öra hör rätt röst) medan diversitet kan skydda mot osäkerhet i kanalkännedom. Att uppnå hög noggrannhet är ett av huvudproblemen som analyseras i denna avhandling.

Fördelarna med att ha flera antenner bygger på att flervägsutbredningen mellan varje sändarantenn och varje mottagarantenn är olika. Detta är inte alltid fallet: om både sändaren och mottagaren är placerade i en tunnel (som agerar vägledare) så finns det i praktiken bara en väg mellan sändaren och mottagaren, oavsett hur många antenner som vi sätter upp. Sådana slutna miljöer är dock sällsynta i verkligheten. Istället är det viktiga för flervägsutbredningen att antennerna är tillräckligt separerade. Det är våglängden som avgör vad som är en bra separering och våglängden är kort när frekvensen är hög och vice versa. I frekvensbandet 0,7-5 GHz handlar det om en eller ett par decimeter. Man kan därför förvänta sig att nästa generation av trådlösa kommunikationssystem kommer att ha två antenner i handhållna terminaler, upp till fyra antenner i laptops och kanske ännu fler antenner på basstationerna (då dessa inte är lika begränsade i storlek). Det finns förstås alltid

²Begreppet strålförning är en översättning av engelskans *beamforming*. En vanligare översättning är lobförning, vilket tydliggör att signalintensiteten inte blir exakt strålförad utan grovriktas åt det önskade hållet. I takt med att antalet sändarantennerna utökas så blir dock signalen allt spetsigare.



Figur 1.7: Två typer av sändning med flera antenner: Skicka många parallella datasignaler till en användare eller en signal vardera till många användare. Det senare gör att varje användarterminal kan vara enklare uppbyggd och är mindre känsligt för dåliga kanalegenskaper. Å andra sidan krävs noggrann kanalkänedom för att välja rätt riktningar.

en viss likhet i flervägsutbredningen mellan antennerna. Detta kallas för *rumslig korrelation* eftersom det innebär att sändning i vissa rumsliga riktningar har större möjlighet att nå fram till mottagaren och att det är mer sannolikt att mottagaren hör starka signaler från vissa riktningar. Detta är helt naturligt; om basstationen är placerad på ett hustak så är det bättre att rikta signalen längs en gata som leder mot mottagaren än att välja en helt annan riktning (jämför med Figur 1.3). Avhandlingen analyserar hur rumslig korrelation påverkar olika egenskaper hos cellulära kommunikationssystem.

Fleranvändar-MIMO

Det finns vanligtvis många användare i varje cell som vill skicka data vid en given tidpunkt. Behovet och efterfrågan på datatrafik ökar ständigt eftersom både antalet användarterminaler och användning av dem ökar snabbt. Detta sätter stark press på cellulära telekommunikationssystem och kräver effektiva metoder för att fördela de tillgängliga överföringsresurserna mellan användarna. Sådan *resurstilldelning* ska fördela tidsintervall, frekvens-delkanaler, rumsliga riktningar och sändeffekt mellan användarna.

En fördel med att ha många användare är att det skapar *fleranvändar-diversitet*, vilket betyder att vi kan välja att sända till en användare när den småskaliga fädningen är fördelaktig (dvs. kanalen är stark). Det är också möjligt att välja en uppsättning användare som är jämnt fördelade i cellen så att deras strålformningar är kompatibla och inte skapar så mycket störningar. Den totala datahastigheten kan öka drastiskt om man prioriterar användare med goda kanalegenskaper och väljer sådana som är geografiskt välseparerade. Resurstilldelning är i allmänhet ett väldigt komplext och svårt problem att lösa, eftersom det både innebär att hitta användare med bra kanalegenskaper och att upprätthålla någon typ av rättvisa mellan användare som har olika avstånd till basstationen (så att närliggande användare inte lägger beslag på alla resurser).

Vid varje given tidpunkt och på varje delkanal måste basstationen avgöra om den ska skicka till en användare (kanske med multiplextekniker) eller om flera användare ska servas samtidigt (se Figur 1.7). Det senare kallas fleranvändar-MIMO och har flera praktiska fördelar jämfört med att bara skicka till en användare:

- **Enkla användarterminaler:** I Avsnitt 1.3 nämndes det att antalet parallella datasignaler när man skickar till *en* användare begränsas av antalet sändarantennar (munnar) och mottagarantennar (öron). I fleranvändar-MIMO finns en mängd öron placerade på olika användarterminaler och alla dessa mottagarantennar räknas. Det är därför möjligt att uppnå samma totala datahastighet med många enkla terminaler med få antenner och begränsad beräkningskraft som med en stor och avancerad mottagare med många antenner. Fleranvändar-MIMO kan även möjliggöra fler parallella datasignaler

än om man bara har en användare, eftersom antalet signaler i princip bara begränsas av antalet antenner på basstationen och detta antal kan ganska enkelt kan utökas.

- **Bättre kanalegenskaper:** Eftersom varje användare befinner sig i en särskild riktning från basstationen är det naturligt att bara ett fåtal riktningar kan användas för effektiv strålformning. Även om mottagarantennerna är välseparerade så kan de bara ta emot signaler som letat sig fram till en liten del av cellen. Med fleranvändar-MIMO kan vi välja användare som befinner sig i helt olika riktningar (från basstationen) och därmed ha aktiva öron överallt i cellen. Strålformning kan användas för att rikta varje signal mot sin mottagare utan att skapa särskilt mycket störningar mellan dem (se Figur 1.7).

Det påpekades i ett tidigare avsnitt att noggrann kanalkänedom är nödvändigt för att hitta rätt riktningar för strålformning. Nackdelen med fleranvändar-MIMO är att noggrannheten behöver vara ännu högre än när man bara skickar till en användare; vi vill att varje signal bara ska höras hos den avsedda mottagaren och därför måste basstationen ha väldigt noggrann riktningsinformation för att kunna begränsa störningarna. Om kanalkänedom är osäker så blir signalerna uppblandade och varje användare blir överöst med störande signaler. Avhandlingen analyserar hur osäkerhet i kanalkänedom påverkar systemet och vad man kan göra för att uppnå högre noggrannhet i scenarier med många användare.

Koordinering av basstationer

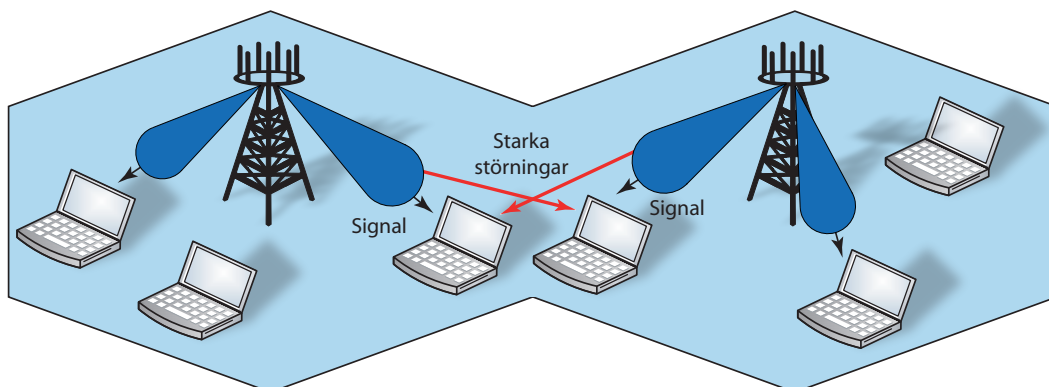
Ett cellulärt kommunikationssystem består av ett stort antal celler och varje användare kommunicerar med den närmsta basstationen (dvs. den som har starkast kanal). Det finns därför osynliga gränser mellan cellerna där användarterminalerna växlar mellan respektive basstation. Sändningarna i en cell påverkar de omgivande cellerna. I extremfallet befinner sig två användare bredvid varandra men på olika sidor om cellgränsen och tillhör därför olika celler. Om dessa användare ska ta emot sina datasignaler samtidigt (på samma delkanal) så kommer deras respektive signaler att skapa stora störningar för varandra (se Figur 1.8a). Det är viktigt att koordinera resurstilldelningen mellan närliggande basstationer för att undvika denna typ av problem.

Den enklaste typen av koordinering är att inte tillåta närliggande basstationer att använda samma delkanaler. Detta tar i praktiken bort alla störningar, men ger ett dåligt utnyttjande av de redan väldig begränsade frekvensresurserna. Flerantenntekniker möjliggör effektivare koordineringslösningar där basstationer bara undviker att använda samma tid/frekvens-resurs till att sända till närliggande terminaler vid cellgränsen. Detta illustreras i Figur 1.8b och kräver att basstationerna (i viss utsträckning) tar gemensamma beslut. Varje basstation behöver dessutom känna till kanalerna mellan sig själva och alla terminaler i de omgivande cellerna som de kan tänkas störa.

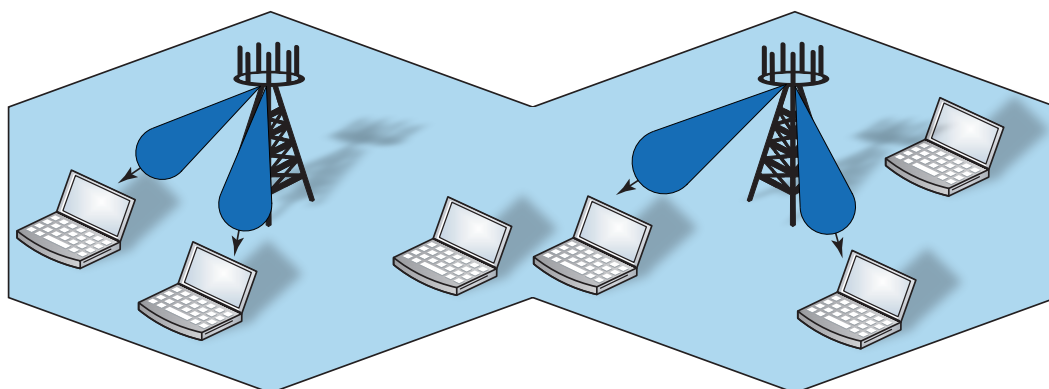
Det finns fler ändamål med att koordinering mellan basstationer än att bara undvika störningar, exempelvis att skicka en datasignal till en viss användare från flera basstationer. På så vis kan de strikta cellgränserna avlägsnas, vilket illustreras i Figur 1.8c. Denna typ av gemensam sändning kallas *koordinerad flerpunktssändning*³ och innebär i idealfallet att basstationerna agerar som om det bara fanns en enda basstation (vars antenner råkar vara utplacerade på olika ställen). Metoden har potential att öka datahastigheterna på ett betydande sätt, eftersom antalet simultana datasignaler nu begränsas av det totala antalet antenner (munnar) på alla basstationer. Men metoden har samma nackdel som alla andra avancerade flerantenntekniker, nämligen att det krävs väldigt noggrann kanalkänedom. Dessutom krävs ett stamnät som möjliggör snabb koordinering mellan basstationerna.

Denna avhandling visar hur cellulära kommunikationssystem med olika nivåer av koordinering kan beskrivas och analyseras på ett enhetligt sätt. Vi härleder en metod för att hitta den optimala resurstilldelningen (vilket kräver avsevärda beräkningsresurser) och föreslår praktiska tilldelningsmetoder som ger höga datahastigheter.

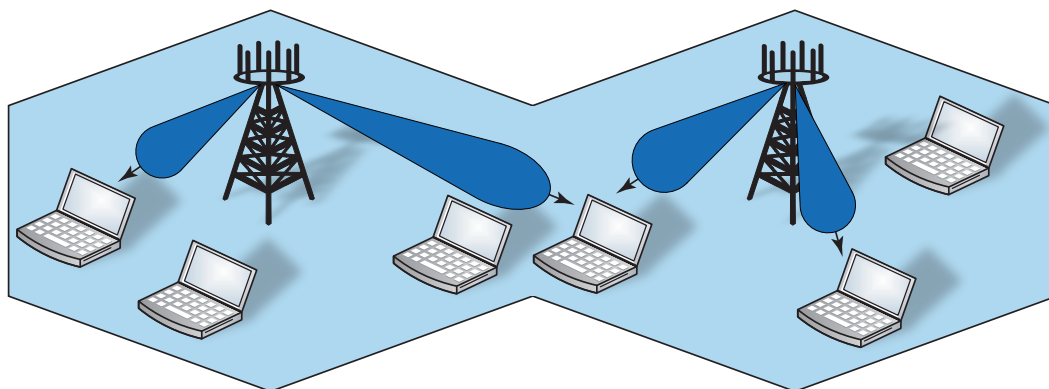
³Detta begrepp kommer från engelskans *coordinated multipoint* (CoMP) transmission.



(a) Okoordinerade celler: Användare vid cellgränsen riskerar starka störningar.

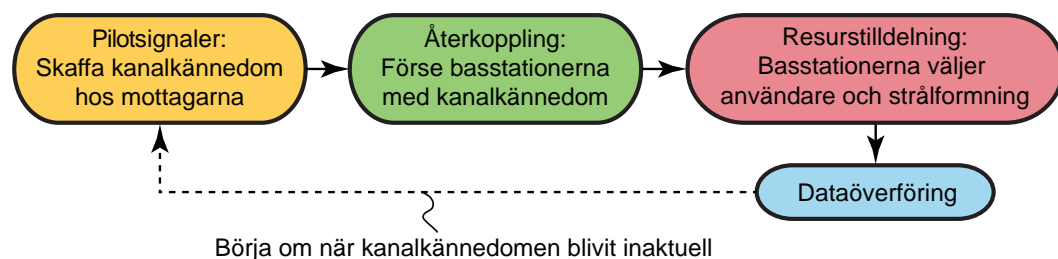


(b) Koordinering av störningar: Basstationerna samarbetar genom att välja användare som befinner sig i olika riktningar.



(c) Koordinerad flerpunktssändning: Basstationerna samarbetar genom att gemensamt skicka datasignaler till användare vid cellgränsen.

Figur 1.8: Tre nivåer av koordinering mellan basstationer. Mer koordinering innebär mindre störningar och högre datahastigheter, men kräver mer informationsutbyte mellan basstationerna och noggrannare kanalkännedom.



Figur 1.9: Schematisk illustration av systemproceduren i ett trådlöst kommunikationssystem. De tre huvudkomponenterna är att skicka pilotsignaler för att uppnå kanalkännedom, återkoppling av kanalkännedom till basstationen och resurstilldelning. Dessa komponenter är även de tre huvudområdena i avhandlingen.

1.4 Systemproceduren

Det finns två överföringsriktningar i cellulära kommunikationssystem; sändningen från basstationen till terminalerna kallas *nedlänken* medan sändningen från terminalerna till basstationen kallas *upplänken*. Som tidigare nämnt fokuserar avhandlingen på nedlänken och på en enda delkanal, men vi antar att det även finns delkanaler som används för upplänken så att basstationen och användarterminalerna kan utbyta information och beslut.

De flerantenn tekniker och koordineringslösningar som diskuterades i Avsnitt 1.3 kräver noggrann kanalkännedom. Samtidigt gör den småskaliga fädningen att kanalegenskaperna ständigt förändras. Därför är det nödvändigt att ha en procedur för att regelbundet skaffa aktuell kanalkännedom. Detta uppnås vanligtvis med så kallade *pilotsignaler*⁴, vilket innebär att man skickar en känd signal och försöker mäta kanalegenskaperna genom att jämföra originalsignalen med vad som mottogs. Pilotsignaler kan förse mottagaren med kanalkännedom. Denna information kan sedan skickas tillbaka till basstationen, vilket kallas *återkoppling*. Det bör ske på ett koncist sätt och med bara ett fåtal bitar (för att inte ödsla bort resurser som kunde ha använts för riktiga datasignaler). När både basstationen och användarna har fått kanalkännedom så utnyttjas den för resurstilldelning, fleranvändar-MIMO, koordinering mellan basstationer och inte minst för att ta emot datasignalerna på ett effektivt sätt. Efter en stund (t.ex. några millisekunder) har den småskaliga fädningen förändrat kanalen och gjort den tidigare kanalkännedomen inaktuell. Då börjar proceduren om på nytt och vi skickar en ny pilotsignal.

Denna cykliska procedur illustreras i Figur 1.9. Avhandling är uppbyggd kring strukturen i denna figur och analyserar dess tre komponenter: 1) pilotsignaler för att uppnå kanalkännedom; 2) koncis återkoppling av kanalkännedom; 3) resurstilldelning i cellulära kommunikationssystem.

Mål och resultat i avhandlingen

Målet med avhandlingen är att analysera olika aspekter av att skaffa kanalkännedom hos användarna med hjälp av pilotsignaler, att skicka tillbaka kanalkännedom till basstationen och att fördela sändningsresurser i cellulära kommunikationssystem där både basstationer och användarterminaler kan ha flera antenner. Optimeringsteori används för att studera de teoretiskt bästa lösningarna på ett antal forskningsproblem. Lärdomarna används för att föreslå metoder som är praktiska användbara.

Vi avslutar kapitlet med en kortfattad beskrivning av forskningsbidragen i avhandlingen:

- **Pilotsignaler för att uppnå kanalkännedom:** Fleranvändar-MIMO och koordinering mellan basstationer kräver väldigt noggrann kanalkännedom. Många forskare har tidigare studerat hur kvaliteten på kanalmätningarna kan förbättras om man känner till kanalens statistiska egenskaper. Medan tidigare arbeten fokuserat på olika specifika statistiska strukturer så visar avhandlingen hur dessa resultat kan samlas i ett

⁴Ordet pilot används här i betydelsen test eller försök (dvs. testsignal eller försökssignal).

gemensamt ramverk under mer generella förutsättningar. Avhandlingen härleder hur utformningen och längden av pilotsignalen beror på de statistiska egenskaperna. Vi visar även hur olika specifika egenskaper hos kanalen, såsom den mottagna signaleffekten, kan mätas på ett enkelt sätt med hjälp av pilotsignaler.

- **Återkoppling av kanalkännedom:** Den kanalinformation som skickas tillbaka till basstationen måste vara både koncis och ytterst noggrann, så att själva sändningen kan starta så fort som möjligt. Avhandlingen undersöker hur man kan maximera mängden användbar information som förmedlas per bit av återkopplad information. Den relativa betydelsen av att skicka tillbaka kanalriktningar och styrkan hos kanalen analyseras. Dessutom bevisar vi att det är bättre att skicka en datasignal vardera till många användare än flera datasignaler till ett fåtal användare.
- **Resurstilldelning i cellulära kommunikationssystem:** Avhandlingen föreslår ett generellt ramverk som försöker modellera de praktiska förhållandena i cellulära kommunikationssystem. Ramverket möjliggör enhetlig analys av olika nivåer av koordinering. Den optimala resurstilldelningen är mycket komplicerad att beräkna. Det krävs en enorm beräkningskapacitet och därför kan lösningen inte användas i praktiken. Vi föreslår dock en metod för att beräkna den optimala resurstilldelningen för att möjliggöra jämförelser och utvärdering av praktiska lösningar. Vi beskriver vissa egenskaper hos den optimala lösningen och visar hur dessa kan användas för att utforma enkla men välfungerande och praktiskt användbara resurstilldelningsmetoder. Slutligen utvärderas alla de föreslagna metoderna under praktiska förhållanden, baserat på riktiga uppmätta kanaler från Stockholm.

© Emil Björnson, 2011.

Tack till alla korrekturläsare!

Hela avhandlingen finns tillgänglig på:

<http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-45035>