

ADAPTIV MODULATION OCH SCHEMALÄGGNING BASERAD PÅ KANALPREDIKTION

Mikael Sternad, UU
(Med flera medarbetare)

<http://www.signal.uu.se/Research/PCCwirelessIP.html>



UPPSALA UNIVERSITET

Problemställningen

**Ett adaptivt framtida radiogränssnitt
skulle behöva baseras på prediktion av snabb
fädning.**

Hur ska länk-adaption då genomföras?

Vilka prestanda kan uppnås i ett fleranvändar-system?

Berättelsen i sammandrag:

Ett adaptivt framtida radiogränssnitt...

- **Kort beskrivning av nedlänken som studerats i Wireless IP-projektet.**

behöver baseras på prediktion av snabb fädning.

- **Hur predikteras bäst fädande kanaler? Vilka prestanda kan uppnås?**

Hur ska länk-adaption då genomföras?

- **Kan man trimma M-QAM så att BER garanteras trots prediktionsfel?**
- **Bör man sträva efter att uppnå BER-gränser? ARQ istället?**

Vilka prestanda kan uppnås i ett fleranvändar-system?

- **Principer för schemaläggning**
- **Prestanda i ett enkelt fall**
- **Prestanda i ett cellulärt system (första resultat).**

Wireless IP-projektet:

www.signal.uu.se/Research/PCCwirelessIP.html

Studerar samoptimering av radiogränssnitt, MAC- och högre lager för data till/från mobila användare.

Samarbete mellan Uppsala Univ. Chalmers och Karlstad Univ.

Inom PCC 2000-2002, stöd av SSF 2002-2005.

Deltar i Wireless World Research Forum.

Deltar i EU 6FP WINNER (**W**ireless World **I**nitiative **N**ew **R**adio).

Radiogränssnitt och systemförslag

Syfte med ett konkret radiogränssnitt:

Fokuserar våra tankar och vårt arbete med algoritmer.

Är dessutom roligt att konstruera någonting extremt.

Strävar mot **högre spektraleffektivitet** för **paketdata** till/från **mobila användare** i

- **cellulära yttäckande system** (100Mbit/s/sector, 100 km/h)
- **Hotspots/"Infostations"** (hög dataakt lokalt, kanske hög mobilitet)
- **Nya WLAN** (större räckvidd, högre dataakt per accesspunkt)

Designprinciper:

Paketdata för mobila användare:

- Se bandbredden som en gemensam resurs! Utnyttja statistisk multiplexing, med bivillkor på fördröjning och paketfelhalt (*optimerad schemaläggning*)
- Utnyttja kanalers tidsvariabilitet (*länkadaption, opportunistisk schemaläggning*). Utnyttjas effektivare ju fler användare som är aktiva (*fleranvändardiversitet*)

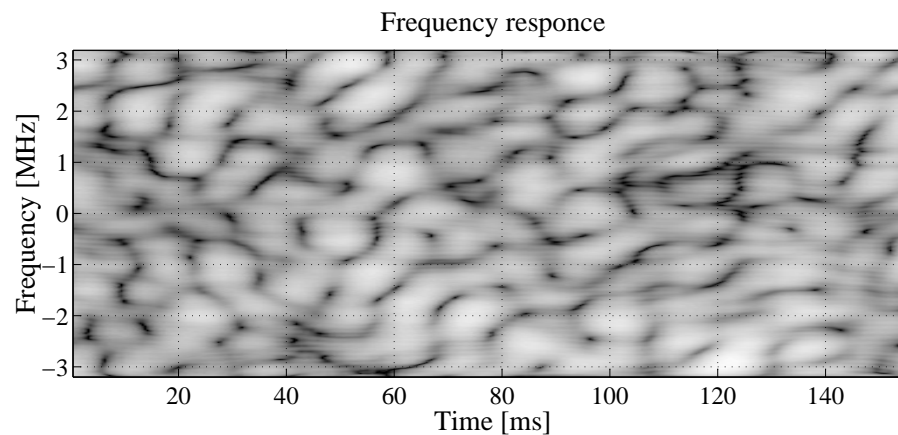
Hög spektraleffektivitet:

- Bör kontrollera interferens (*reglerat frekvensband, ortogonalitet, FDD i yttäckande system, smarta antenner i terminaler, ...*)
- Bör mäta kanalkvalitet och återkopplingsreglera, snarare än dimensionera för värsta fall (*adaptiva system*).
- Bör använda kodning sparsamt.

Utmaningar:

- Stor bandbredd: Finns några kanalvariationer att utnyttja?

Lösning: Tilldela tid-frekvensluckor (exklusivt) i nedlänk, OFDM.



- Hög datatakt i frekvensselektiv kanal. (OFDM attraktiv i nedlänk)
- Adaption till snabb fädning kan kräva orimligt mycket kontrollinformation
- Långsam fädning kan ge problem med QoS.
- Återkopplingsfördröjningar kräver kanalprediktion (100 km/h designpunkt).

Utkast till nedlänk i cellulärt FDD-system:

(Utarbetat tillsammans med T. Ottosson, A. Ahlén och A. Svensson VTC03-Fall)

- **OFDM**, med $100 \mu\text{s}$ symboler, $11 \mu\text{s}$ cycliskt prefix, 10 kHz bärvågor.
- **Tid-frekvensluckor på $0.666 \text{ ms} \times 200 \text{ kHz}$** , eller 6 symboler x 20 bärvågor (120 symboler) tilldelas exklusivt till användare.
- **Adaptiv modulation, med 1-8 bitar per symbol** (BPSK - 256 QAM), ev. med trellis-kodad modulation. (4 piloter och 8 nedlänk-kontrollsymboler per lucka är alltid 4-QAM. Dessa används för kanalskattning.)
- **Varje användare predikterar hela bandbredden tre luckor (2 ms) framåt.**
- Baserat på predikterat SINR rapporteras, via upplänken, en lämplig modulationsnivå för varje tid-frekvenslucka.
- En schemaläggare vid basstationen tilldelar resurser. Sedan sker sändning **Snabb länklager-återsändning $\approx 2 \text{ ms}$** utnyttjas.

Länkadaption baserad på prediktion:

(Arbete främst tillsammans med Sorour Falahati, Chalmers/UU)

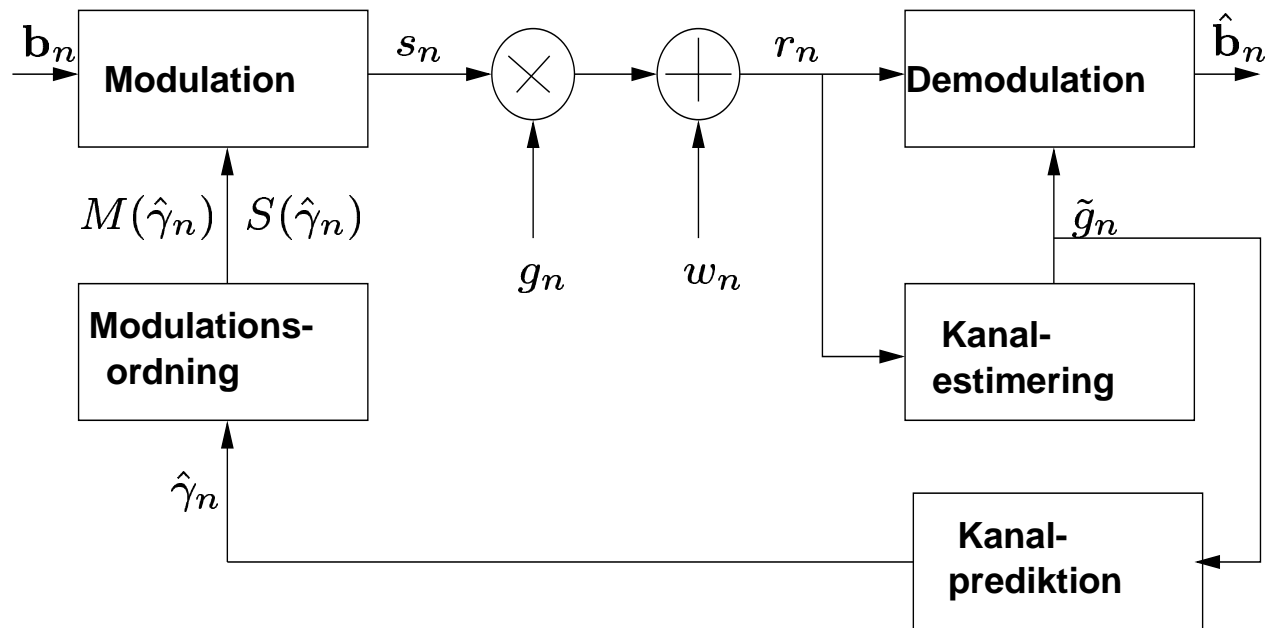
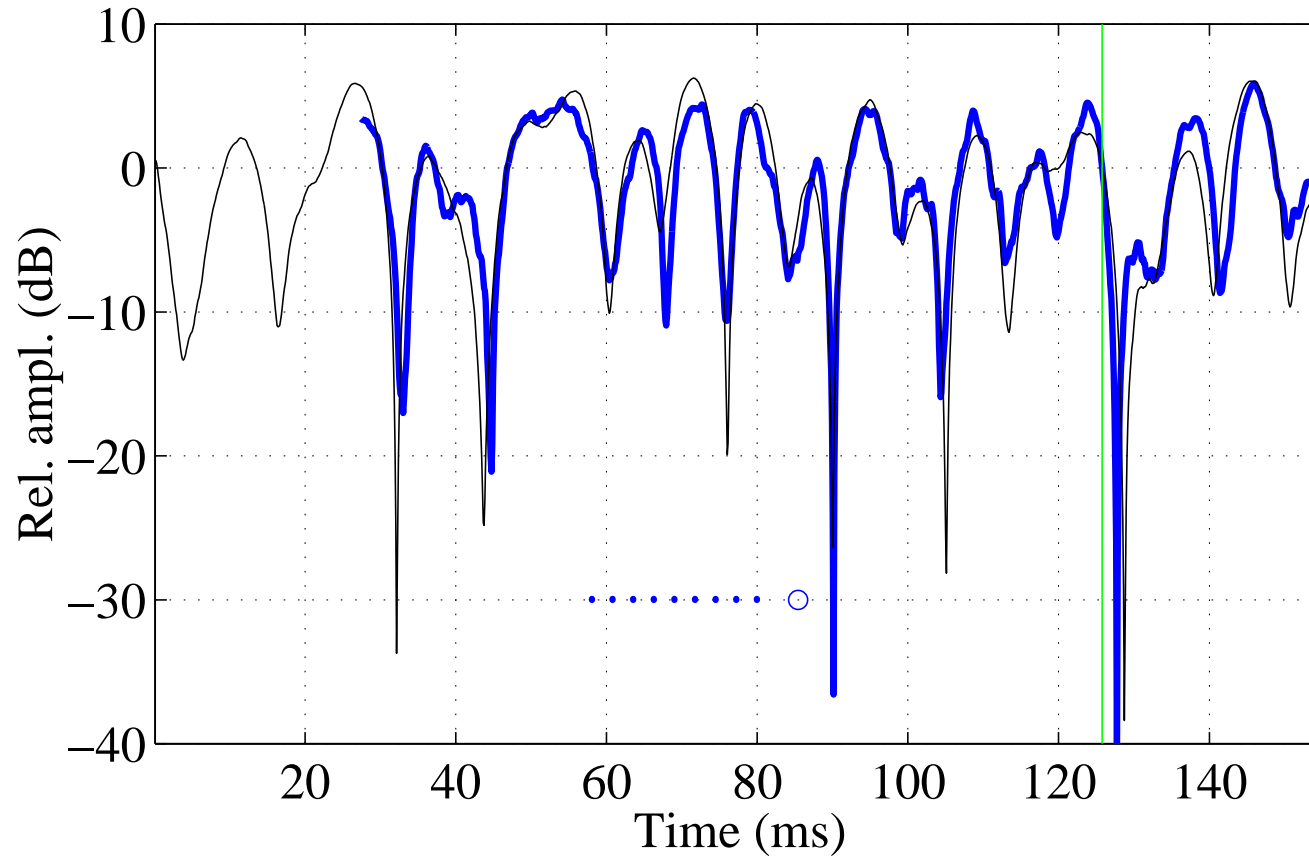


Figure 1: Modulationsgraden M och ev. sändareffekten S justeras, baserad på predikterad SINR $\hat{\gamma}_n$. Modulerade symboler s_n sänds över block-Rayleighfädande kanal $r_n = g_n s_n + w_n$.

Prediktion av mottagen signaleffekt



Vi vill prediktera kanaleffekten (och bruseffekten) över en tid motsvarande ca 0.3 våglängder. (=2 ms vid 2 GHz bärvåg och 100 km/h mobilhastighet.)

Hur ska prediktion ske?

Resultat, efter (mycket) arbete tillsammans med Torbjörn Ekman och Anders Ahlén:

- Bäst resultat erhålls om man predikterar signifikanta tappar i impulssvaret, baserat på gamla estimat av dessa tappar. (Prediktion av OFDM-kanaler i frekvensdomänen verkar ge sämre resultat.)
- Bäst skattning av tapparnas effekt erhålls med en **bias-kompenserad kvadrat av tapp-estimatet.**
- Stor omsorg bör läggas på **brusrensning** av regressorerna (de gamla tapp-estimaten)!
- Använd ej för många justerbara koefficienter i prediktorn. Annars hänger den inte med då fädnings-statistiken förändras.

Prediktion av en tapp i impulssvaret:

Brusiga estimat av kanal-tapp $y_n = g_n + e_n$, där e_n är estimeringsfel.

Linjär subsamplad L-steps FIR-prediktor av tappen:

$$\hat{g}_{n|n-L} = \varphi_{n-L}^H \theta = [y_{n-L}, y_{n-L-m}, \dots, y_{n-L-(K-1)m}] \theta .$$

Bias-kompenserad kvadratisk prediktion av tapp-effekten $p_n = |g_n|^2$:

$$\hat{p}_{n|n-L} = |\hat{g}_{n|n-L}|^2 + \underbrace{\sigma_g^2}_{\text{Addera korrekt medelvärde}} - \underbrace{\sigma_{\hat{g}}^2}_{\text{Subtrahera felaktigt medel}} .$$

Addera korrekt medelvärde Subtrahera felaktigt medel.

Om g_n är komplex gaussisk (Rayleighfädning) och brusets/störningens effekt är konstant, så

känner vi fördelningsfunktionerna för SNIR $f_{\hat{\gamma}}(\hat{\gamma})$ och $f_{\gamma}(\gamma|\hat{\gamma})$.

Prediktion av tapp-signaleffekt, 41 kanaler

Effektprediktion 0.1 våglängder och 0.3 våglängder framåt:

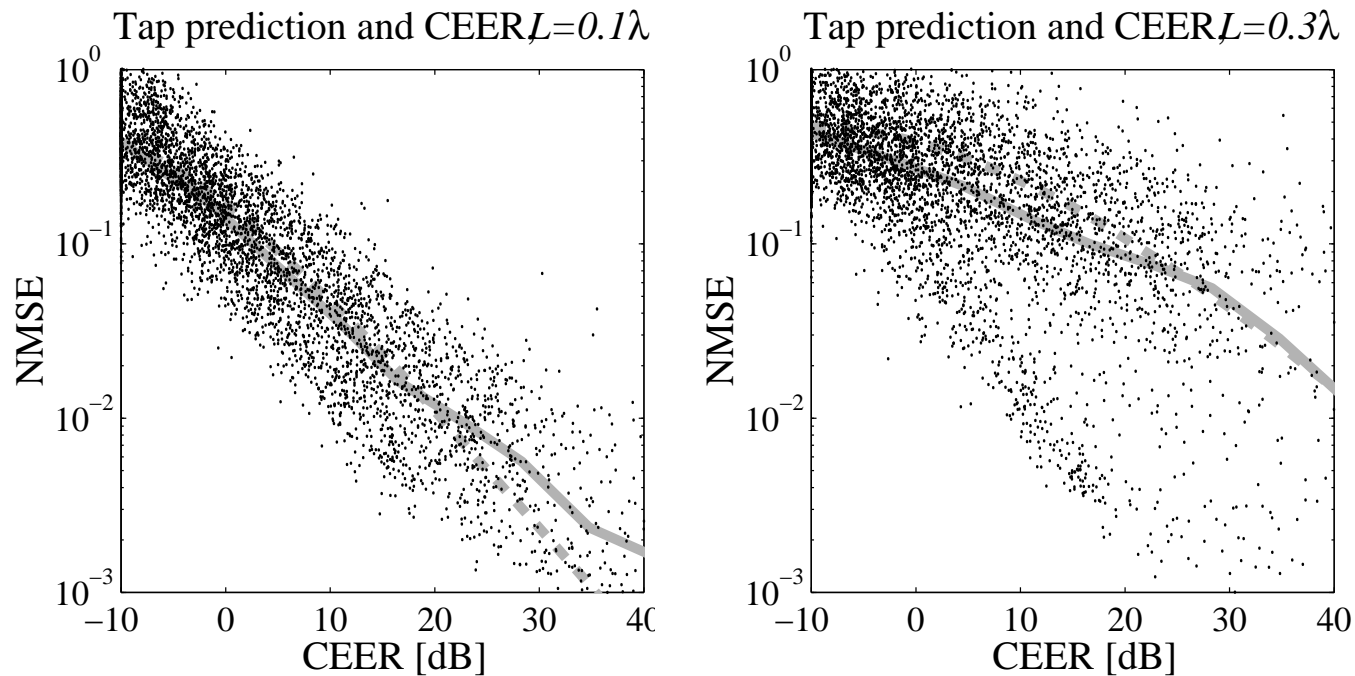


Figure 2: Biaskompenserad kvadratisk prediktor med 8 koefficienter. Normaliserad prediktions-MSE (NMSE) som funktion av signal-till-estimeringsfelet (CEER) hos regressorerna. Grå kurva: medianen. Streckad grå kurva: teoretiskt för Rayleigfädning.

Prediktion av tapp-signaleffekt, 41 kanaler, forts.

Predikterbarhet för olika horisonter och olika regressor-kvalité:

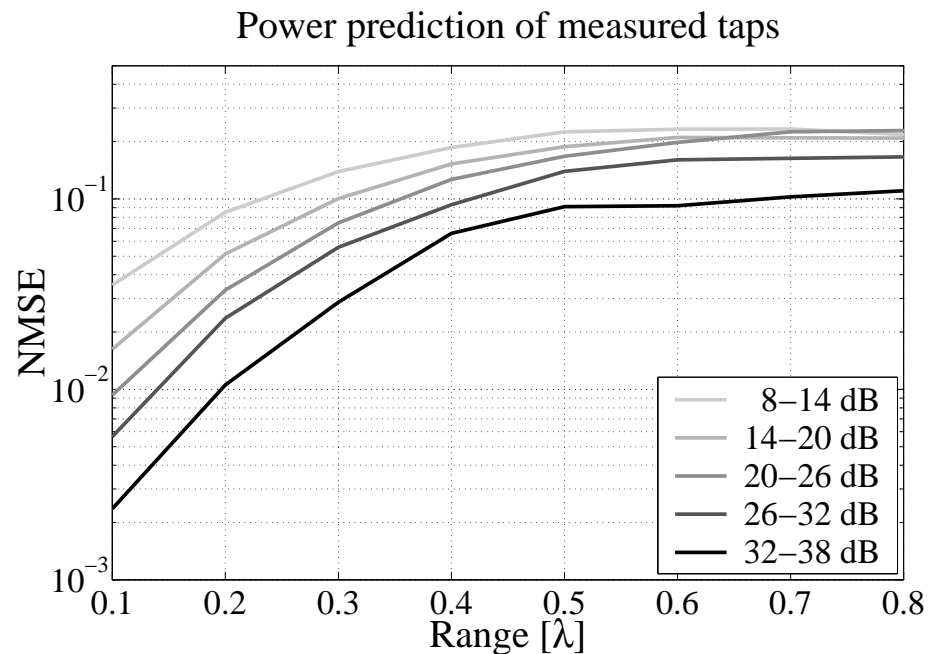


Figure 3: Medianen av effekt-prediktions-NMSE som funktion av prediktionshorisonten för fall med olika stora estimeringsfel på regressorerna (CEER). Biaskompenserad kvadratisk prediktor med 8 koefficienter. Glättning av regressorer har använts för brusundertryckning.

Predikterbarhet av kanaleffekten

Prediktorns prestanda indikeras av det normaliserade effekt-prediktionsfelet (NMSE)

$$\sigma_p^2 = \frac{E||g_n|^2 - \hat{p}_{n|n-L}|^2}{E|g_n|^4}$$

- $\sigma_p^2 = 0.001$: Praktiskt taget perfekt prediktion.
- $\sigma_p^2 = 0.01$: Uppnåbart för $L = 0.1$ våglängder.
- $\sigma_p^2 = 0.1$: Uppnåbart för $L = 0.33$ våglängder (**=2 ms vid 2GHz, 100 km/h**).
- $\sigma_p^2 = 0.5$: Erhålls då $\hat{p}_{n|n-L} = E|g_n|^2$ vid Rayleighfädning.

Intressant egenskap:

Den **relativa** standardavvikelsen hos det betingade prediktionsfelet

$\sigma_p(\hat{p}_{n|n-L})/\hat{p}_{n|n-L}$ **ökar** när $\hat{p}_{n|n-L}$ minskar, dvs då vi predikterar in i en fädningdipp.

Adaptiv modulation baserad på predikterad SNR

Modulation M_i (k_i bit/symbol) används i intervallet $\hat{\gamma} \in [\hat{\gamma}_i \hat{\gamma}_{i+1})$.

Ingen sändning sker då $\hat{\gamma} < \hat{\gamma}_1$.

Utsänd medel-effekt \bar{S} . Konstant effekt $S > \bar{S}$ då sändning sker.

Vi försöker först finna optimala SNIR-gränser (switchpunkter) $\{\hat{\gamma}_i\}_{i=1}^N$ så att den genomsnittliga spektraleffektiviteten

$$\eta_B = \sum_{i=1}^N k_i \int_{\hat{\gamma}_i}^{\hat{\gamma}_{i+1}} f_{\hat{\gamma}}(\hat{\gamma}) d\hat{\gamma} \quad \text{bps/Hz.}$$

maximeras, under olika bivillkor (Lagrange-formulering).

Bivillkor på BER

Verklig bitfelshalt vid ett givet predikterat SINR:

$$\text{BER}(\hat{\gamma}) = \int_0^{\infty} \text{BER}(\gamma, \hat{\gamma}) f_{\gamma}(\gamma|\hat{\gamma}) d\gamma,$$

där $f_{\gamma}(\gamma|\hat{\gamma})$ är känd från vår prediktor och

$$\text{BER}(\gamma, \hat{\gamma}) \approx 0.2 \exp\left(\frac{-1.6\gamma}{M_i - 1} \frac{S(\hat{\gamma})}{\bar{S}}\right),$$

för okodad M-QAM enl. Goldsmith et. al. 2001.

Analytisk lösning är då möjlig för bivillkor på BER($\hat{\gamma}$).

Kan istället ha bivillkor på BER($\hat{\gamma}$) medelvärdesbildad även över $\hat{\gamma}$.

Kan genomföras även för trellis-kodad modulation (VTC03-Fall).

Optimering under BER-bivillkor (Globecom 03)

Mål-BER 0.001, medel-SNR 20 dB:

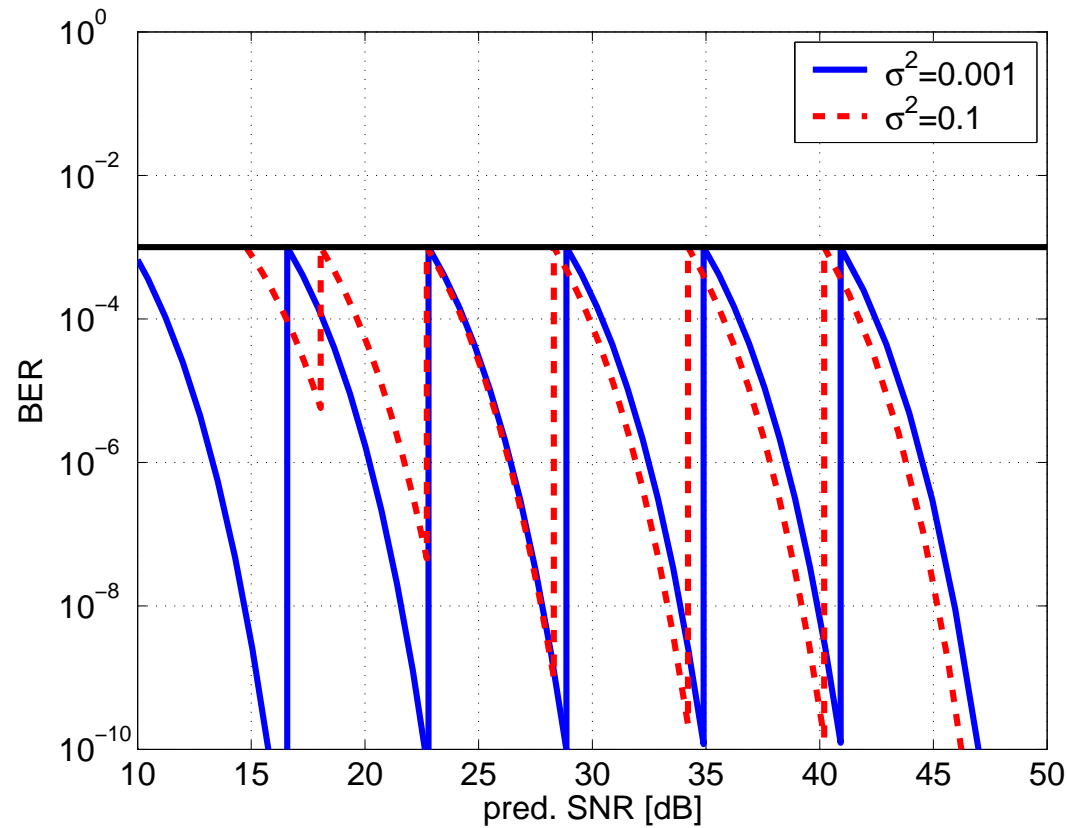
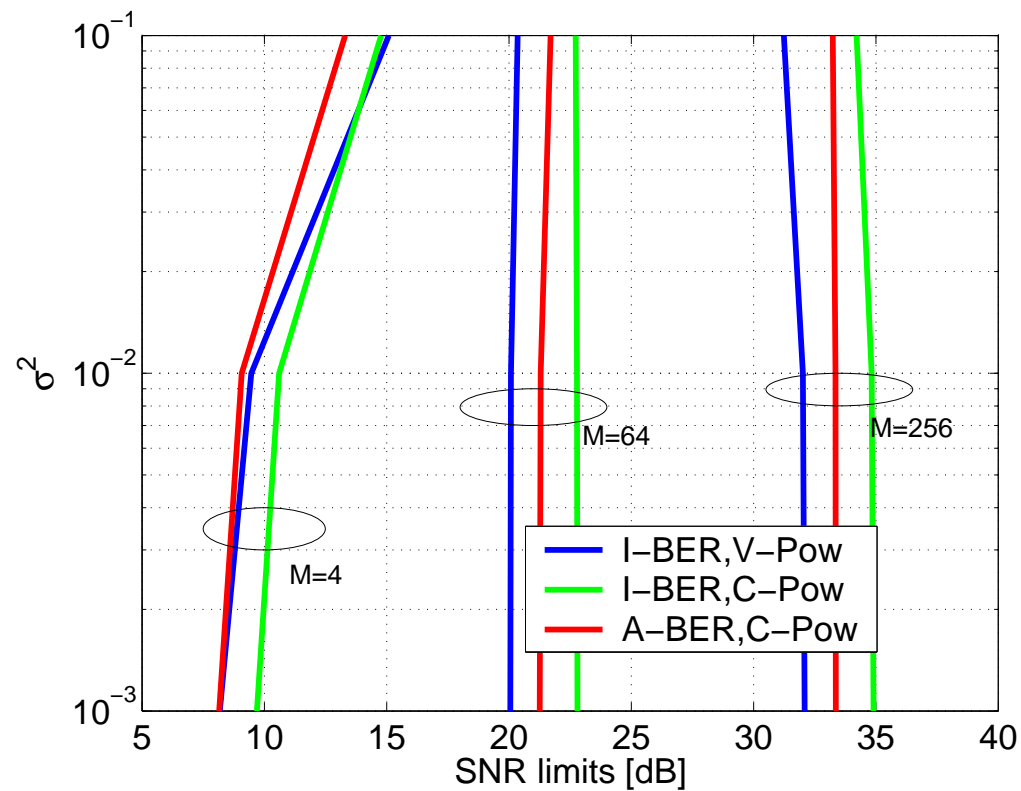


Figure 4: BER som funktion av predikterad SNR. Exempel för 4,16,64,256,1024-QAM.

Switchgränser för olika prediktor-NMSE

Mål-BER 0.001, medel-SNR $\bar{\gamma} = 20$ dB, tre olika bivillkor:



Strategin blir "rädd" för fädingdippar ($\gamma < \bar{\gamma}$) då prediktionen är osäker.

Maximering av bitar i korrekta länklager-ramar

Behövs verkligen BER-bivillkor?

Vi antar ju länklager-återsändning (ram = 108 nyttsymboler i tid-frekvensluckan).

Varför inte försöka **maximera antalet bitar som kommer fram i korrekta ramar**?

Nytt kriterium (**utan bivillkor**):

$$\bar{\eta} = \sum_{i=1}^N k_i \int_{\hat{\gamma}_i}^{\hat{\gamma}_{i+1}} \underbrace{E_{\gamma}[(1 - p_s(k_i, \gamma))^{n_s}]}_{p(\text{korrektram})} f_{\hat{\gamma}}(\hat{\gamma}) d\hat{\gamma} \quad \text{bps/Hz.}$$

där n_s = symboler/ram och p_s är symbolfelhalten (ingen approximation behövs här).

Balansekvation som definierar switchpunkterna $\hat{\gamma}_i$:

$$k_i \int_0^{\infty} [1 - p_s(k_i, \gamma)]^{n_s} f_{\gamma}(\gamma | \hat{\gamma} = \hat{\gamma}_i) d\gamma = (k_i + 1) \int_0^{\infty} [1 - p_s(k_i + 1, \gamma)]^{n_s} f_{\gamma}(\gamma | \hat{\gamma} = \hat{\gamma}_i) d\gamma.$$

(Opublicerade resultat, förhoppningsvis Sternad & Falahati ICC 2004.)

Ny optimerad M-QAM. Switchgränser:

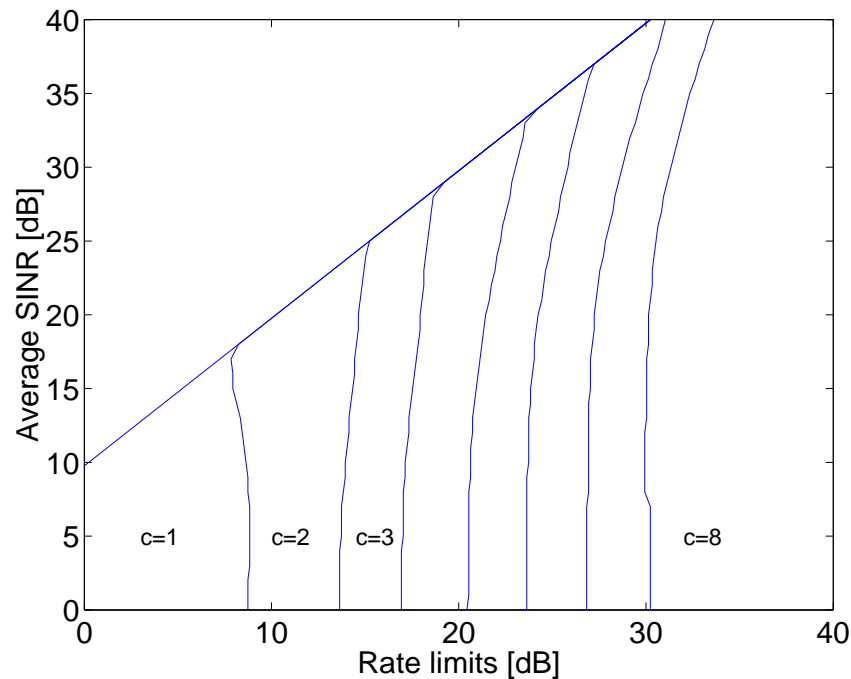


Figure 5: Optimerade switchpunkter för $k_i \in [1, \dots, 8]$ som funktion av medel-SINR när SINR prediktions NMSE är 0.1. **Den nedersta gränsen $\hat{\gamma}_1$ försvinner.**

Denna optimering är inte rädd för fädingdippar.

Ny optimerad M-QAM. Ramfelhalter:

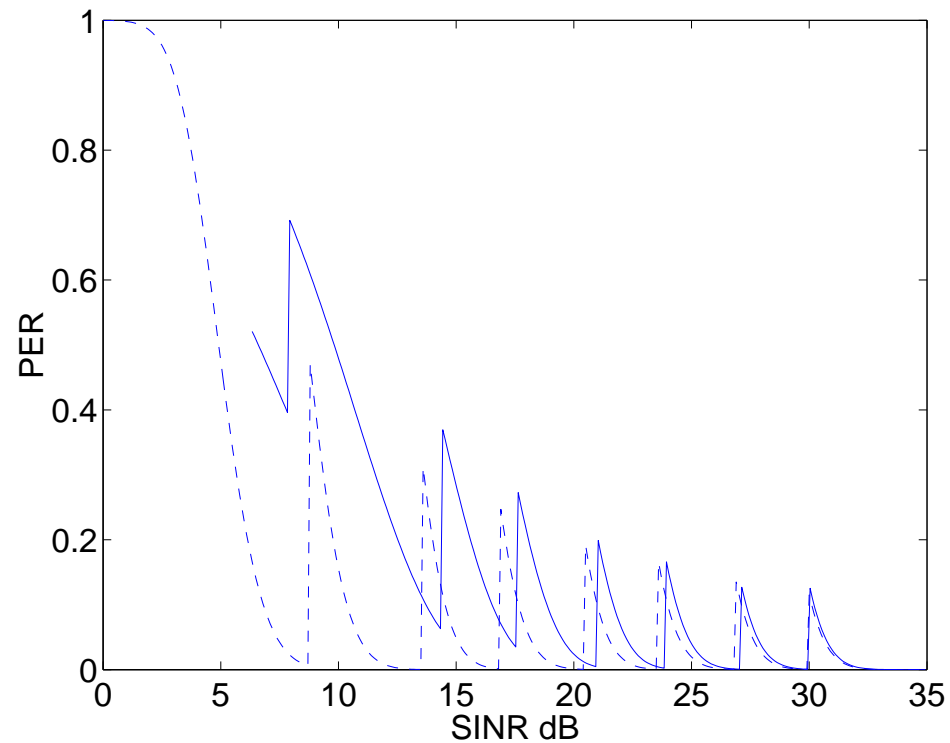
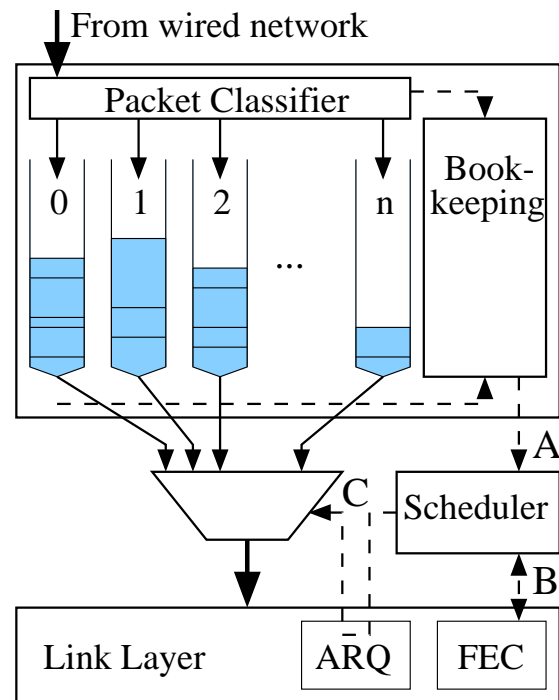


Figure 6: Ramfelhalter (108 symboler/ram) med optimerade switchgränser som funktion av medel-SINR, när prediktionens NMSE är 0.1. Medel-SNR 16 dB. Jämför med situationen utan prediktionsfel (streckad).

Flera användare i sektorn



- Buffring per flöde (olika användare och trafikklasser).
- Kanalkvalité vägs mot kölängd, prioritet, QoS-krav.
- Länklageråtersändning (ARQ) ges hög prioritet.

Några enkla principer för schemaläggning

(Dessa strategier tar ej hänsyn till buffernivåer och prioriteter.)

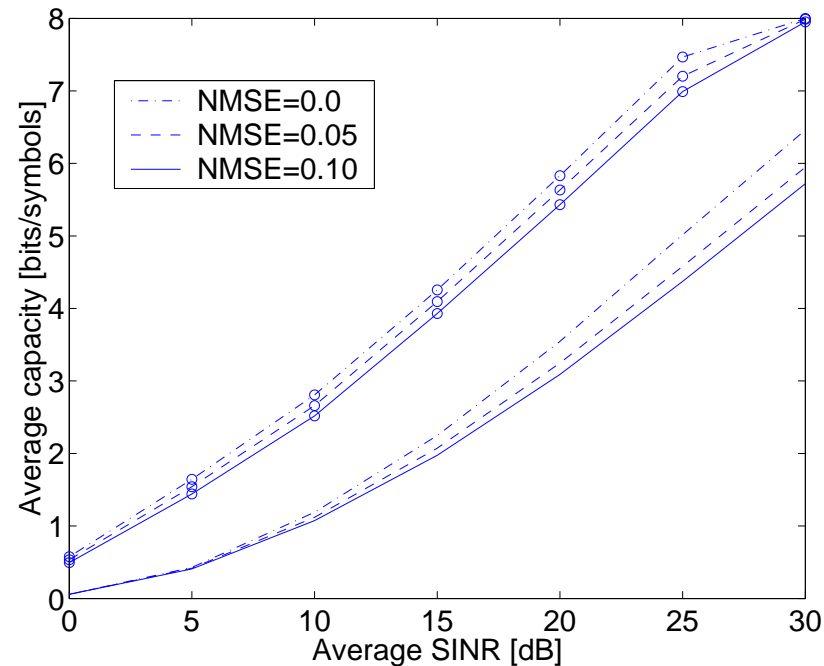
Av användare $u = 1 \dots K$, välj efter

- $\max_u \hat{\gamma}_u$: Maximal througput. Missgynnar användare långt från basstationen.
- $\max_u \hat{\gamma}_u / \bar{\gamma}_u$: **Störst SINR relativt det egna medelvärdet.**
- $\max_u \hat{\gamma}_u / \text{medel-througput}$ (Proportional Fair Scheduling enl. Tse et. al.).

Vi arbetar här med det första och andra kriteriet. De sammanfaller då samtliga aktiva användare har samma medel-SIR $\bar{\gamma}$.

Vi undersöker prestanda med adaptiv okodad M-QAM anpassad för att maximera antal bitar i korrekta ramar.

Spektraleffektivitet då alla har samma medel-SNIR:

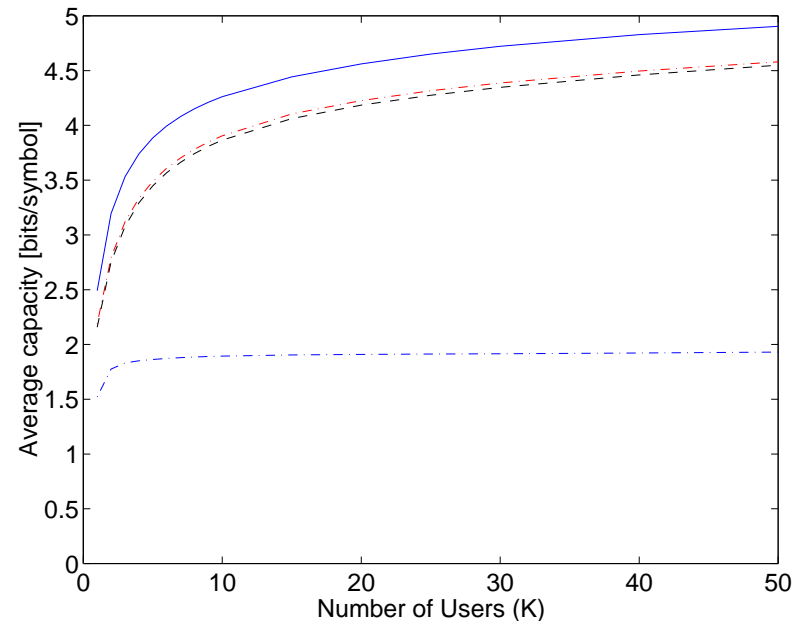


Medel-kapaciteten som funktion av Medel-kapaciteten som funktion av medel-SINR som är lika för alla användare för $K = 1$ aktiva terminaler (nedre kurvor) and $K = 20$ terminaler (övre kurvor med ringar). Perfekta prediktioner (punktstreckade), NMSE 0.05 (streckade) och NMSE 0.10 (heldragna). Slutsatser:

1: Förlorar lite på NMSE 0.1, jämfört med perfekt prediktion.

2: Kraftig vinst pga fleranvändar-diversitet med $K=20$ då användaren med $\max_u \hat{\gamma}_u / \bar{\gamma}_u$ väljs.

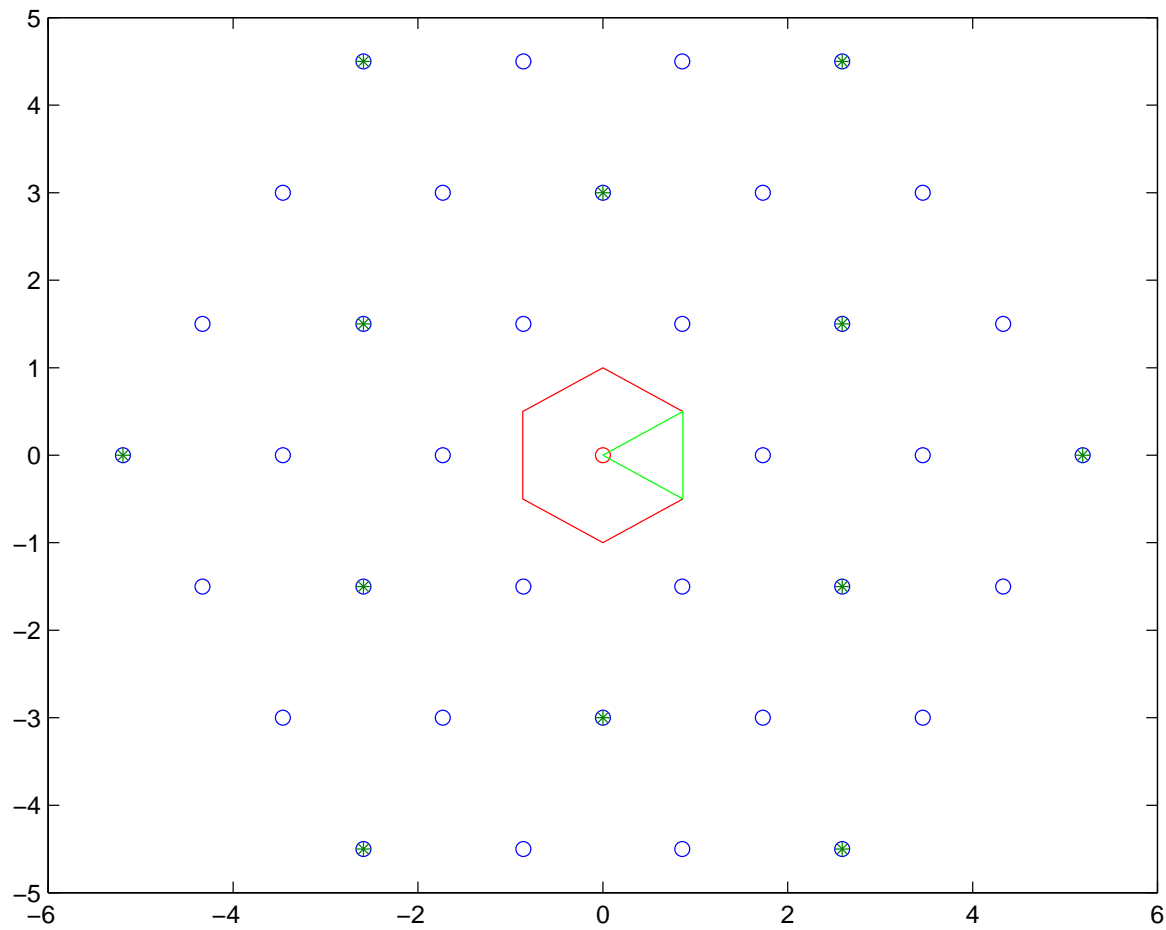
Spektraleffektivitet då alla har samma medel-SINR:



Medel-kapaciteten för medel-SINR 16B (lika för alla) då man väljer högst SINR av K Rayleighfärdande användare. Heldraget: perfekt prediktion. Punktstreckat: prediktions-NMSE $\sigma_{\Delta\gamma/\gamma}^2 = 0.1$, med optimerade switchgränser. Streckat: prediktions-NMSE med switchgränser anpassade för perfekt prediktion. Nedre punktstreckade: NMSE 0.495. Slutsatser:

1. Det duger att använda switchgränser optimerade för perfekt prediktion.
2. Man tappar inte mycket fleranvändar-diversitet vid NMSE 0.1. (Men tappar allt vid NMSE 0.5.)

Hexagonalt cellulärt system, 60 graders sektorer:



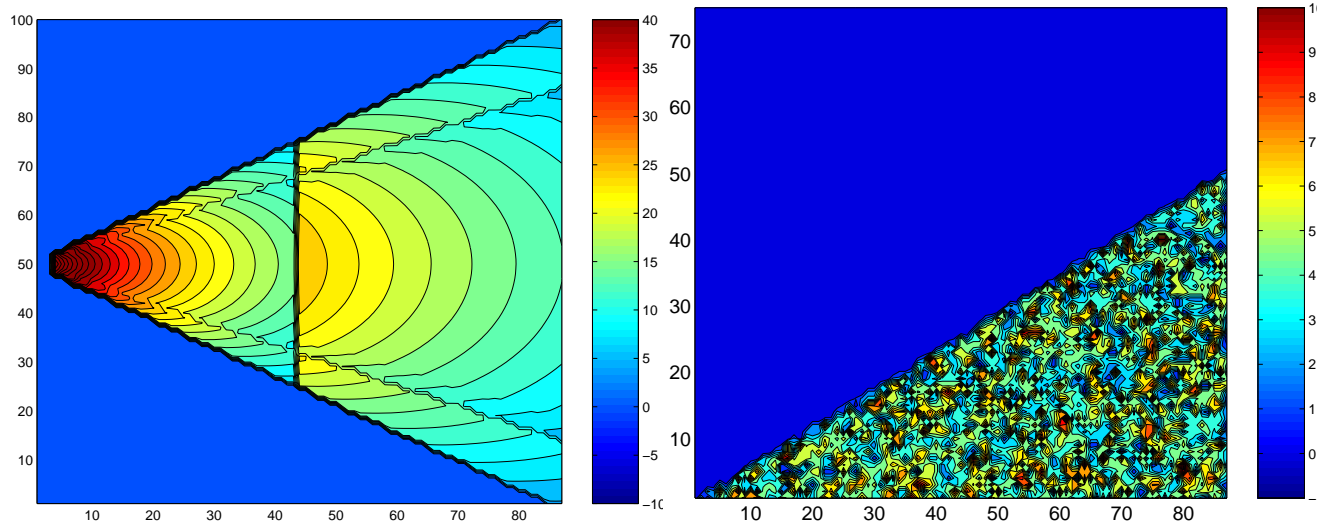
Störningskontroll i sektor

Hög spektraleffektivitet kräver **dels reuse nära 1 och dämpning av samkanalstörare**. Två principer för att dämpa interferensen (VTC03-Fall):

- Reuse 1 i inre delen av sektorn, reuse 3 i yttre delen,
- Koordineras schedulering mellan sektorer i samma bas

SIR-fördelning:

Fördelning av luckor då $\max_u \hat{\gamma}_u / \bar{\gamma}_u$ väljs:



Sektor-througput (preliminär utvärdering)

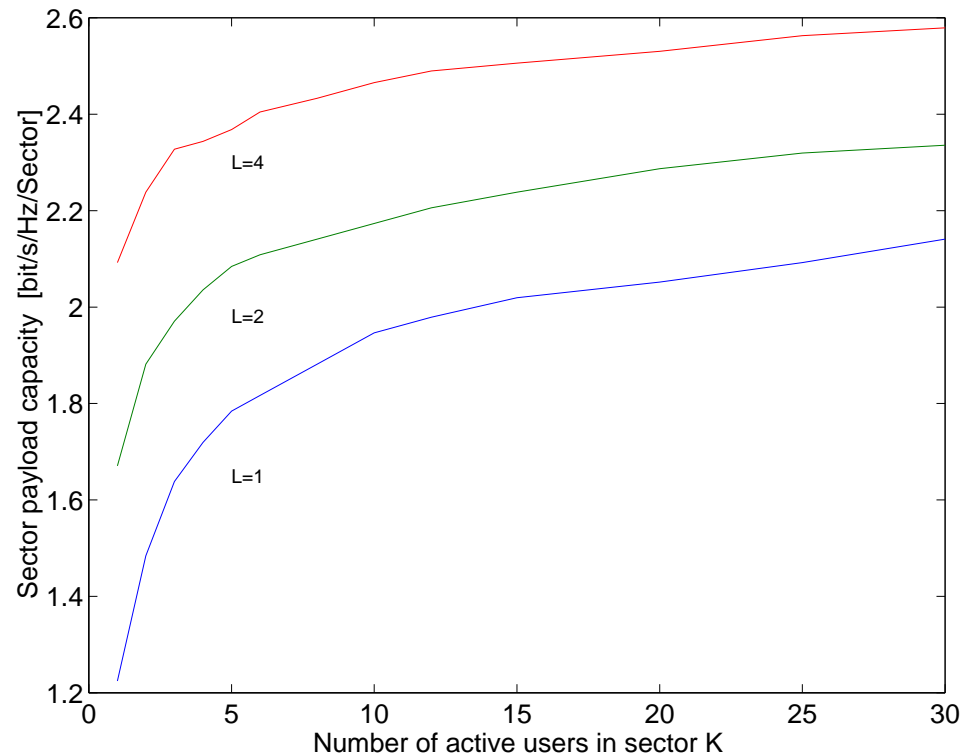


Figure 7: Estimerad sektorkapacitet med Rayleighfädning (ingen skuggfädning). Två zoner i sektor, gräns 0.7 av radien (**reuse 1.73**). **OFDM-overheadfaktor 0.81** (prefix, nedlänkskontroll). **K aktiva användare**, alla med **L antenner**, som utnyttjar Maximum Ratio Combining. Varje datapunkt baseras på 10000 realiseringar. Lastfaktor i störande celler är $\ell = 1$ och gånvägsförlust-exponenten är $\alpha = 4$.