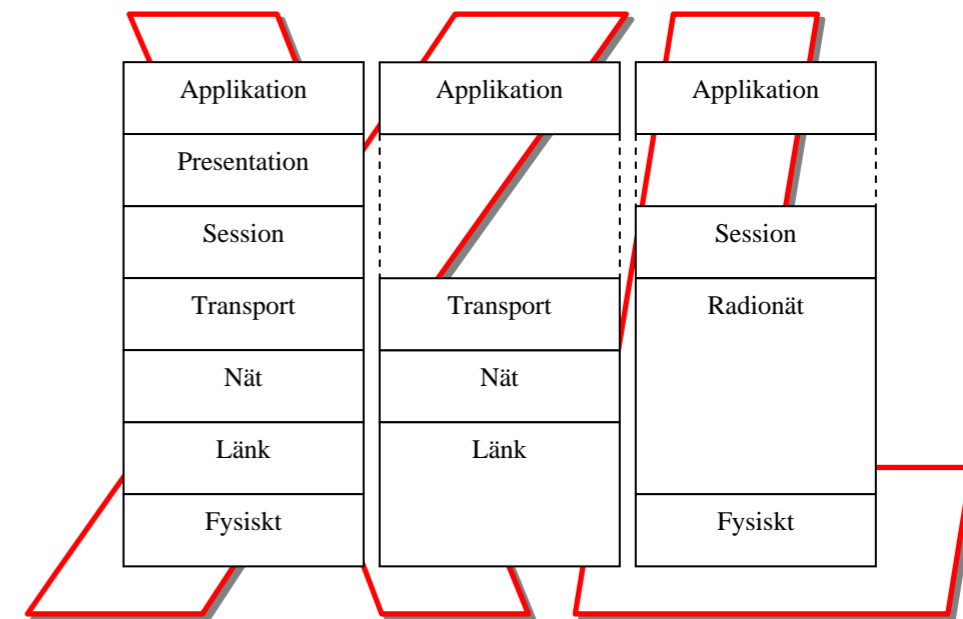


HUGO TULLBERG



FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1250 anställda varav ungefär 900 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.

Hugo Tullberg

# Cross-layer design i kommunikationssystem – en översikt

<b>Utgivare</b> FOI - Totalförsvarets forskningsinstitut Ledningssystem Box 1165 581 11 Linköping	<b>Rapportnummer, ISRN</b> FOI-R--2069--SE	<b>Klassificering</b> Teknisk rapport
	<b>Forskningsområde</b> 4. Ledning, informationsteknik och sensorer	
	<b>Månad, år</b> Oktober 2006	<b>Projektnummer</b> E7107/E7108
	<b>Delområde</b> 41 Ledning med samband och telekom och IT-system	
	<b>Delområde 2</b>	
<b>Författare/redaktör</b> Hugo Tullberg	<b>Projektledare</b> Kia Wiklundh/Mattias Sköld	
	<b>Godkänd av</b> Sören Eriksson	
	<b>Uppdragsgivare/kundbeteckning</b> Försvarsmakten	
	<b>Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig</b> Lars Ahlin	
<b>Rapportens titel</b> Cross-layer design i kommunikationssystem -- en översikt		
<b>Sammanfattning</b> <p>De senaste åren har cross-layer design (lageröverskridande design) rönt starkt intresse inom kommunikationsforskningen. Vid cross-layer design genomför man samtidig optimering av funktioner i flera lager i en referensmodell med avseende på en systemkritisk dimensionerande resurs, t ex nätkapaciteten eller batterilivslängden. Rätt använt kan cross-layer design leda till stora prestandavinster medan felaktig användning kan medföra en oavsiktlig begränsning i modulariteten.</p> <p>Rapporten behandlar olika aspekter av cross-layer design och dess inverkan på effektiva kommunikationssystem. I rapporten inventeras pågående forskning om cross-layer design för kommunikationssystem. Vi diskuterar definitioner och olika tolkningar av cross-layer design. Vi föreslår en definition enligt följande:</p> <p><i>Cross-layer design är när man avviker från en specifik referensmodell, genom extra informationsflöde eller på annat sätt, i syfte att optimera prestanda med hänsyn till en specificerad kritisk resurs för ett väl avgränsat system.</i></p> <p>Vi konstaterar även att det behövs en ny radioreferensmodell som tar hänsyn till utbredningsegenskaper och behov av flexibilitet i radionära signalbehandling men ändå ger tillräcklig struktur för modularitet.</p> <p>Slutligen ger vi exempel på områden där cross-layer design är av intresse för militär kommunikation och pekar på nya möjligheter inom taktiska radionät och sensornät.</p>		
<b>Nyckelord</b> Cross-layer design, lageröverskridande design, kommunikation, forskningsområden		
<b>Övriga bibliografiska uppgifter</b>	<b>Språk</b> Svenska	
<b>ISSN</b> 1650-1942	<b>Antal sidor:</b> 44 s.	
<b>Distribution enligt missiv</b>	<b>Pris:</b> Enligt prislista	

<b>Issuing organization</b> FOI – Swedish Defence Research Agency Command and Control Systems P.O. Box 1165 SE-581 11 Linköping	<b>Report number, ISRN</b> FOI-R--2069--SE	<b>Report type</b> Technical report
	<b>Programme Areas</b> 4. C4ISTAR	
	<b>Month year</b> October 2006	<b>Project no.</b> E7107/E7108
	<b>Subcategories</b> 41 C4I	
	<b>Subcategories 2</b>	
<b>Author/s (editor/s)</b> Hugo Tullberg	<b>Project manager</b> Kia Wiklundh/Mattias Sköld	
	<b>Approved by</b> Sören Eriksson	
	<b>Sponsoring agency</b> Swedish Armed Forces	
	<b>Scientifically and technically responsible</b> Lars Ahlin	
<b>Report title (In translation)</b> Cross-layer Design in Communications Systems – a Survey		
<b>Abstract</b> <p>Recently, cross-layer design has received significant interest in the communications research community. In cross-layer design, functions in several layers of a reference model are optimized simultaneously with respect to a critical dimensioning system resource, e.g. network capacity or battery life-time. Properly used, cross-layer design can give significant performance gains, while incorrectly used; it can lead to an unintentional reduction in modularity.</p> <p>We treat different aspects of cross-layer design and its impact on design of efficient communication systems. We report ongoing research efforts in cross-layer design, and discuss different definitions and interpretations of cross-layer design.</p> <p>We propose a definition of cross-layer design as follows:  <i>Cross-layer design is protocol design by deviation from a particular reference model, through extra information flow or in other ways, with the purpose to optimize the performance with respect to a specified critical resource for a well delimited system.</i></p> <p>A new reference model that considers radio communication properties and the need for flexible radio signal processing while providing sufficient structure to support modularity is needed for wireless communications.</p> <p>Finally, we give examples of areas where cross-layer design is of interest for military communications and point out new possibilities for tactical radio networks and sensor networks.</p>		
<b>Keywords</b> Cross-Layer Design, Communication, Research areas		
<b>Further bibliographic information</b>	<b>Language</b> Swedish	
<b>ISSN</b> 1650-1942	<b>Pages</b> 44 p.	
	<b>Price acc. to pricelist</b>	



# Innehållsförteckning

Innehållsförteckning .....	5
Akronymlista .....	6
1 Inledning .....	7
2 Lagerindeld design – Referensmodeller .....	9
3 Motivation för XL .....	11
3.1 Fördelar .....	12
3.2 Nackdelar .....	12
4 ”Definition” av XL .....	13
4.1 XL som brott mot referensmodellerna .....	13
4.2 XL som informationsflöde .....	13
4.3 XL som synsätt .....	13
5 Karaktärisering av XL .....	15
5.1 Tidsaspekter på XL .....	15
5.2 Kontextaspekter på XL .....	15
6 Exempel på XL .....	17
7 Arkitekturer för XL .....	21
8 Forskningsfrågor .....	23
8.1 Tillämpningar .....	23
8.2 Forskningsområden .....	23
8.2.1 Kanalnära XL .....	23
8.2.2 Arkitektur .....	25
8.2.3 XL-förslag och samexistens .....	25
8.2.4 Intersystemfrågor .....	26
9 Pågående aktiviteter på FOI72 .....	27
10 Områden av intresse för FOI/FM/FMV .....	29
11 Projektförslag .....	31
12 Diskussion och slutsatser .....	33
Referenser .....	35
Appendix A: Referensmodeller .....	39
OSI-referensmodellen .....	39
TCP/IP-referensmodellen .....	40
Appendix B: Detaljerade beskrivningar av vissa områden .....	43
Användaraspekter .....	43
Traffic Management .....	43
Mobility Management .....	44
Protokollfrågor .....	45
Säkerhet .....	45
Interoperabilitet .....	45
Länk-MAC .....	45

## Akronymlista

BGP	Border Gateway Protocol
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
DSA	Dynamic Spectrum Access, Dynamisk Spektrumaccess
FM	Försvarsmakten
FMIP	Försvarsmaktens IP-nät
FMV	Försvarets materielverk
FOI	Totalförsvarets forskningsinstitut
FSR	Fisheye State Routing
FTN	Försvarets Telenät
GPRS	General Packet Radio Service
GTRS	Gemensamt Taktiskt Radiosystem
IP	Internet Protocol
IPSec	Secure Internet Protocol
IPv6	Internet Protocol version 6
ISO	International Organization for Standardization
IT	Informationsteknologi
ITU	International Telecommunication Union
JTRS	Joint Tactical Radio System
MAC	Medium Access Control
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplex
OSI	Open Systems Interconnect
OSPF	Open Shortest Path First
QoS	Quality of Service
RBA	Role-Base Architecture
SCA	Software Communication Architecture
SDR	Software-Defined Radio
SNR	Signal-to-Noise Ratio
TCP	Transfer Control Protocol
TCP/IP	Transfer Control Protocol/Internet Protocol
TDMA	Time Division Multiple Access
TM	Traffic Management
XL	Cross-Layer design

# 1 Inledning

I denna rapport diskuteras olika aspekter av så kallad ”cross-layer design” och vad det innebär för att skapa effektiva kommunikationssystem. I rapporten behandlas uteslutande trådlösa kommunikationssystem.

I tidiga kommunikationssystem var hårdvaran huvudsaken och om någon mjukvara ingick var den mest en efterkonstruktion [Tan, s.26]. Systemen var inte lageruppdelade utan allt utvecklades på nytt varje gång. Fördelen med sådan utveckling är att hela systemet kan optimeras samtidigt. Nackdelen är att systemen blev ”stuprörssystem”.

Allteftersom systemen blev mer komplexa och det ställdes krav på längre livslängd ökade kraven på att strukturera uppbyggnaden av systemen. Strukturerad uppbyggnad är nödvändigt för att få överblick över komplexa system, få en modular uppbyggnad, kunna utveckla delar parallellt, och modifiera delar utan att hela systemet behöver göras om från början.

För att reducera komplexiteten är kommunikationssystem organiserade i lagerindelade protokollstackar. Lagren kan vara uppbyggda i hårdvara eller mjukvara, men idag är största delen av protokollstackarna implementerade i mjukvara.

Lagerindeld design, i idealfallet med noggrant beskrivna funktioner och gränssnitt, strukturerar uppbyggnaden av system, och ger överblickbar uppbyggnad och modularitet. Nackdelar med strikt lagerindelning är ineffektivt resursutnyttjande och risk för ökad overhead om funktioner dupliceras i flera lager.

De senaste åren har så kallad lageröverskridande design (på engelska ”cross-layer design”, i denna rapport förkortat XL) rönt starkt intresse inom kommunikationsforskningen. En stark drivkraft för XL är just att komma till rätta med ineffektivt resursutnyttjande. En tillämpning som ofta omnämns i litteraturen är batteridrivna sensornät där XL kan reducera energiåtgången och därigenom öka livslängden. I mobila radionät kan XL öka den andel av kommunikationskapaciteten som kan användas för användartjänster, därigenom göra systemet ”effektivare” för användare. Rätt använt kan XL leda till stora förbättringar genom att systemet optimeras mot en önskad egenskap, exempelvis störskydd, säkerhet, eller korta fördröjningar, utöver ovannämnda batterilivslängd och användarkapacitet. Felaktigt utförd kan XL medföra en oavsiktlig begränsning i modulariteten.

Det kan förefalla som det finns en inbyggd motsättning mellan effektivt resursutnyttjande och struktur/modularitet. Finns det något sätt att öka effektiviteten i ett kommunikationssystem och samtidigt behålla modulariteten? I föreliggande rapport kommer vi att diskutera lageröverskridande design (XL) baserat på studier av den vetenskapliga litteraturen, vidga begreppet och beskriva vad vi menar med XL, dess för- och nackdelar, samt ge några exempel på XL. Vi menar att det är viktigt att ta fasta på det förhållningssätt som termen cross-layer design, eller lageröverskridande design, i sig indikerar – det gäller att göra vinster genom samordning över lagergränser, inte att helt ta bort lagren.



De tillämpningar vi beaktat i huvudsak i arbetet är taktiska ad hoc<sup>1</sup> radionät (GTRS/JTRS-liknande) och sensornät. Dessa har olika uppgifter, användningssätt och förväntade livslängder, och ställer därigenom olika krav på kommunikation och XL.

Utifrån beskrivningen av XL och de tänkta tillämpningarna identifierar vi forskningsområden där betydande vinster kan göras med XL, antingen i form av kapacitet i nät eller energiåtgång. Dessutom identifierar vi områden som är relevanta för försvarssektorn (FM, FMV, FOI), att bevaka och vidareutveckla, och dels identifiera forskningsområden som är militärspecifika där FOI har en unik roll att fylla i det att utvecklingen inte drivs av civila aktörer.

Syftet med arbetet har inte varit att göra en fullständig genomgång av forskningslitteraturen, utan det har varit viktigare att skapa ett underlag för vidare diskussioner och arbete. Föreliggande rapport är resultatet av en aktivitet inom FoT-projekten *Telekommunikationer för strid i urban miljö (TURBAN)* och *Tjänstekvalitet i ad hoc-nät (TAN)*.

I avsnitt 2 gör vi en kort genomgång av lagerindeldad struktur och i avsnitt 3 motiverar vi varför XL är intressant. I avsnitt 4 – 6 diskuterar vi en ”definition” av XL, olika sätt att karaktärisera XL, och ger några exempel. Avsnitt 7 beskriver möjliga arkitekturer för XL. Vi beskriver forskningsfrågor, pågående aktiviteter och områden av intresse för FOI/FM/FMV i avsnitt 8 – 10. I avsnitt 11 ger vi några projektförslag och vi presenterar våra slutsatser i avsnitt 12. I appendix A beskriver och diskuterar vi OSI- och TCP/IP-referensmodellerna, och i appendix B gör vi detaljerade diskussioner av tekniska aspekter i några tillämpningar.

---

<sup>1</sup> Med ad hoc-nät menar vi ej förplanerade, självkonfigurerande flerhoppsnät utan fast infrastruktur.

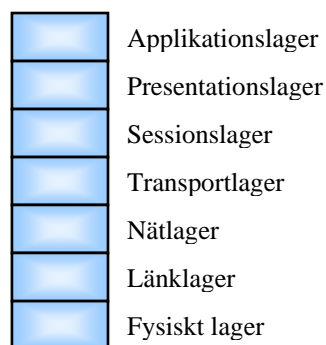
## 2 Lagerindelad design – Referensmodeller

För att kunna hantera komplexiteten i ett modernt kommunikationssystem använder man en struktur med ett antal *lager*. Ett lager hos sändaren kommunicerar med motsvarande lager hos mottagaren enligt ett visst *protokoll*, en viss uppsättning regler. Ett underliggande lager erbjuder en uppsättning *tjänster* åt ovanliggande lager för att möjliggöra kommunikation enligt protokollet. Kommunikationen mellan lager sker genom ett *gränssnitt*. En fundamental egenskap är att hur tjänsterna är implementerade är gömt för ovanliggande lager. Antalet lager samt vilka protokoll och tjänster som finns i ett system styrs av en *referensmodell*.

Det finns ett antal standardiserade protokollstackar med tillhörande referensmodeller. Den idag dominerande protokollstacken är TCP/IP-stacken. Den växte fram genom successiv utveckling av praktiskt fungerande protokoll. Den tillhörande referensmodellen, TCP/IP-referensmodellen, har konstruerats i efterhand och beskriver naturligtvis TCP/IP-stackens funktioner på olika nivåer mycket väl. Dock passar den inte för att beskriva andra protokollstackar särskilt väl.

En annan och mycket välrefererad referensmodell är OSI-referensmodellen som togs fram oberoende av existerande protokoll. OSI-referensmodellen har fördelar ur teoretisk synvinkel – den klarar ut väsentliga begrepp som tjänst och protokoll – men till OSI-modellens nackdelar hör en olycklig, godtycklig indelning av lager där vissa lager är överfulla och andra tomma, och den är mycket komplex. Det har lett till att nästan inga<sup>2</sup> väl fungerande, spridda protokoll har byggts utifrån OSI-modellen, men den kan ändå tjäna ett syfte som just referensmodell. En hybridmodell med fem lager, OSI-modellen där sessions- och presentations-lagren har utelämnats används inte sällan för att beskriva arkitekturen [Tan, s 49].

En schematisk bild av OSI-referensmodellens lager ges i figur 1. En mer detaljerad beskrivning och diskussion av OSI- och TCP/IP-referensmodellerna finns i appendix A.



Figur 1: De sju lagren i OSI-referensmodellen.

Fördelar med lagerindelad struktur är att man får överblick över komplexa system genom att detaljer döljs<sup>3</sup>, och att modulariteten medger att olika delar kan bytas ut

<sup>2</sup> X.400 och ATM är protokoll som kommit ur OSI-domänen, men deras marknadsandelar ökar inte idag.

<sup>3</sup> Jämför med abstrakta datatyper och datainkapsling i objektorienterad programmering.

oberoende av varandra. Indelningen i lager ligger till stor del bakom Internets framgång och spridning [KaK]. Nackdelar med lagerindelningen är att mängden programvara som exekveras kan öka, och i OSI-referensmodellen dupliceras funktioner som adressering, flödeskontroll och felrättning på olika lager [Tan, s 47]. Detta leder till ineffektivitet i exempelvis mobila ad hoc-nät och reducerad batterilivslängd i sensornät.

### 3 Motivation för XL

Varför vill man frånga den lagerindelade strukturen? Den har trots allt utvecklats genom beprövad erfarenhet och fungerar väl, vilket Internet torde vara ett bevis för. Strukturen i referensmodellerna och protokollstackarna är utvecklade för fasta kommunikationsnät med mycket hög kapacitet och då har inte den stora andelen overhead i datapaketen någon större betydelse. För andra tillämpningar, exempelvis trådlösa nät, innebär en andel stor overhead en oacceptabelt stor inskränkning i kommunikationssystemets effektivitet.

En tillämpning som ofta nämns i litteraturen är batteridrivna sensornät som kommunicerar trådlöst. Här kan en okritisk tillämpning av standardprotokoll såsom TCP/IP leda till onödigt energiuttag och därmed förkortad livslängd för enskilda batterier och nätet som helhet. Genom XL vill man minimera energiåtgången i nätet som helhet (inte enbart i enskilda noder) och därigenom maximera livslängden.

Strikt lagerindelade protokollstackar är inte flexibla nog för att hantera mobila ad hoc-nät [GoW]. I ett taktiskt mobilt flerhopsradionät kan mer än hälften av trafiken utgöras av overheadtrafik för routing, access, etc. Om man kan reducera overheadtrafiken i nätet frigörs kapacitet till nyttotrafik vilket antingen kan användas till bättre kvalitet i användartjänster eller till att öka antalet möjliga användare. Protokollstackar som är avsedda för fasta förbindelser lämpar sig inte nödvändigtvis för radionät eftersom radiolänkar inte har samma karaktäristik som fasta förbindelser. Genom XL kan man optimera (delar av) protokollstacken för att utnyttja radiokanalen så effektivt som möjligt.

I tillämpningen sensornät kan man förenklat säga att det finns en tjänst<sup>4</sup> i nätet och den är känd vid utveckling av systemet. Sensornät är inte sällan avsedda för engångsbruk – nätet sprids och används till det slutar fungera varefter det lämnas åt sitt öde. Det är därför motiverat att bortse från modulariteten och använda långtgående XL för att öka sensornätets livslängd.

I tillämpningen taktiska radionät förhåller det sig litet annorlunda. Antalet tjänster är stort och kan förändras med tiden. Taktiska radiosystem har också en avsevärt längre livslängd, och i GTRS/JTRS-liknande, SDR-baserade system där flexibiliteten är en mycket viktig egenskap måste varje förändring av modulariteten noga övervägas. Dock är XL starkt motiverat för att öka utnyttjandet av radiomediet och öka effektiviteten. Här bör man se XL som introduktion av ett extra informationsflöde för att kunna använda bättre/adaptiva tekniker.

---

<sup>4</sup> Vi betraktar insamling, bearbetning i sensornoden och transmission i nätet som en tjänst.

### 3.1 Fördelar

XL används för att uppnå någon typ av vinst, förbättra något mått på systemprestanda. Som exempel kan nämnas:

- ökad batterilivslängd
- ökad nätlivslängd
- ökad kapacitet på länkar eller i nät
- ökade räckvidder
- minskade fördröjningar
- ökat störskydd
- ökad IT-säkerhet

IT-säkerhet brukar kallas för en ”emerging property”, en framväxande egenskap, med vilket man menar att det är en egenskap man får genom noggrann design på alla nivåer i ett system. XL kan tolkas som just strävan efter en ”emerging property”, att genom genomtänkt design få en egenskap som är viktig för den aktuella tillämpningen.

### 3.2 Nackdelar

Bland nackdelarna med XL nämns ofta

- reducerad eller förlorad modularitet
- ökad komplexitet (det som var ett kriterium eller en parameter på ett lager blir nu en angelägenhet för två eller flera lager)

Eftersom modularitet och kontrollerad komplexitet är viktigt i system med lång livslängd måste man göra en påtaglig vinst med XL för att det skall vara värt att bryta strukturen.

## 4 "Definition" av XL

Att definiera betydelsen av ett ord eller en term låter sig inte göras enkelt – i ett levande språk ändrar sig ords betydelse och användning hela tiden. Detta till trots försöker vi karaktärisera vad som menas med "cross-layer design" (XL). I litteraturen och diskussioner inom det här arbetet har i huvudsak tre betydelsekategorier utkristalliserat sig; XL som brott mot referensmodellen, XL som informationsflöde och XL som synsätt.

### 4.1 XL som brott mot referensmodellerna

Med utgångspunkt i referensmodellerna blir en rättfram definition av XL som följer:

*"Design av kommunikationssystem genom att bryta mot eller bortse ifrån lagerindelningen i en specifik referensmodell" [SrM].*

Detta är en generell definition som omfattar allt som inte strikt följer referensmodellen. Definitionen beskriver vad man gör, bryter mot lagerindelningen, men inte varför. En omedelbar kritik mot definitionen är att den beror på vilken referensmodell man utgår ifrån – det som är XL utifrån OSI-modellen behöver inte vara XL i relation till TCP/IP-modellen.

Eftersom definitionen enligt ovan är mycket vid är följande definition en begränsning. Man kan också ifrågasätta nyttan av en så vid definition.

### 4.2 XL som informationsflöde

Referensmodellerna säger att ovanliggande lager använder underliggande lagertjänster via ett gränssnitt, men definierar inte gränssnitten. Information kan alltså utbytas fritt mellan protokoll/funktioner i intilliggande lager utan att det är XL. Man kan då definiera XL som:

*Lagerstrukturen i referensmodellen behålls, men man tillåter att information utbyts mellan lager som inte är intilliggande för att uppnå vinster i någon mening.*

Ovanstående definition är en begränsning jämfört med den första definitionen. Lagerstrukturen, och den därmed följande modulariteten, behålls, men genom att tillåta utökad informationsflöde kan tjänster dra nytta av information som inte tillhandahålls via gränssnitten mellan lager. XL kan betraktas som regler för utökad informationsflöde mellan olika lager i en protokollstack.

### 4.3 XL som synsätt

I de två föregående definitionerna utgår vi från tekniska aspekter, nämligen lagerstrukturen, och frångår den i större eller mindre utsträckning. Om man i stället utgår från varför man överväger XL, den användar- eller applikationsnytta XL medför kan vi göra följande definition:

*Att ur användar- och applikationsperspektiv gemensamt optimera kommunikationen i hela systemet (på alla lager).*

Användar- och applikationsperspektiv kan tolkas som att en viss resurs är kritisk för systemets användbarhet. Exempelvis är batterilivslängd avgörande för hur användbara trådlösa system är. Fördelen med denna definition är dess fokus på varför man överväger XL. Nackdelar är att modulariteten riskeras genom gemensam optimering, och det är inte säkert att gemensam optimering ens är möjligt. Det är dessutom en mycket vid definition.

I avsnittet diskussion och sammanfattning återkommer vi till definitionen av XL.

## 5 Karaktärisering av XL

I sin vidaste bemärkelse är XL allt som inte strikt följer en viss referensmodell. För att lite närmare beskriva XL kan vi karaktärisera XL utifrån ett antal olika kategorier. Två kategorier som förekommer ofta i diskussioner är tid och kontext. Vi kan naturligtvis tänka oss ett stort antal andra kategorier. Idealiskt vore om de inte påverkar varandra utan att varje tillämnning av XL kan beskrivas i varje kategori oberoende av de andra.

### 5.1 Tidsaspekter på XL

Beroende på hur XL beror av tiden delar vi in XL i tre kategorier; passiv, statisk och dynamisk XL.

Vid passiv XL undersöker vi hur olika lager i ett system (i en protokollstack) påverkar varandra. Hur fungerar olika protokoll tillsammans med varandra i en specifik tillämpning? Klarar de tekniska krav och användarkrav? I detta fall är XL en utvärdering av ett system utan ansats att påverka eller förändra systemet.

Vid statisk XL tar man hänsyn till olika systemdelars/lagers påverkan på varandra vid systemimplementeringen och väljer komponenter/protokoll etc. så att negativ påverkan minimeras eller elimineras [ScS]. På varje lager kan man välja mellan ett antal alternativ och varje kombination ger upphov till ett system med vissa egenskaper, ett visst värde av något kvalitetsmått. XL blir då ett multidimensionellt optimeringsproblem med begränsningar, att välja den kombination som maximerar kvalitetsmålet under eventuella givna begränsningar<sup>5</sup>. Under drift sker inget informationsutbyte mellan olika lager utöver vad som medges i referensmodellen.

Vid dynamisk, eller adaptiv, XL sker ett informationsutbyte i realtid mellan olika lager utöver vad som medges i referensmodellen. Protokoll på olika lager interagerar för att maximera prestanda med avseende på något kvalitetsmått. Alternativt kan lager vara sammanslagna för att kunna optimera prestanda i realtid. Observera att informationsutbyte mellan närliggande lager inte är XL i OSI-referensmodell-mening.

### 5.2 Kontextaspekter på XL

Här delar vi in XL i intra- och intersystem-XL<sup>6</sup>. Intrasystem-XL är XL inom ett system, XL mellan olika lager i referensmodellens protokollstack, t ex mellan länk- och nätlagren. Intersystem-XL är mellan olika system.

Mycket av den XL som avhandlas i litteraturen rör intrasystem-XL, exempelvis [ScS, SrM, KaK] och referenser däri. Intrasystem-XL avgränsar omfattningen till

---

<sup>5</sup> Exempelvis kan man använda total nätkapacitet som kvalitetsmått. Man kan tänka sig att en viss kombination av protokoll ger högst total nätkapacitet men att den kombinationen överskrider den maximala acceptabla fördröjningen. Som XL designer får man då välja en suboptimal kombination ur nätkapacitetshänseende för att inte överskrida acceptabel fördröjning.

<sup>6</sup> Det finns oss veterligen ingen namnkonvention så vi kan även tänka oss intern och extern XL, alternativt småskalig och storskalig XL



ett system och vid utveckling av systemet kan utvecklaren kontrollera vad som sker inom protokollstacken och behålla översikt över systemet. I många fall kan avsevärda tekniska prestandavinster (kapacitet, batterilivslängd, etc.) göras med intrasystem-XL.

En förfining av intrasystem-XL är att karaktärisera XL baserat på hur omfattande den är, gör vi en total förutsättningslös omdesign av kommunikationssystemet, gör vi en gemensam optimering av flera lager eller lägger vi till ett informationsflöde?

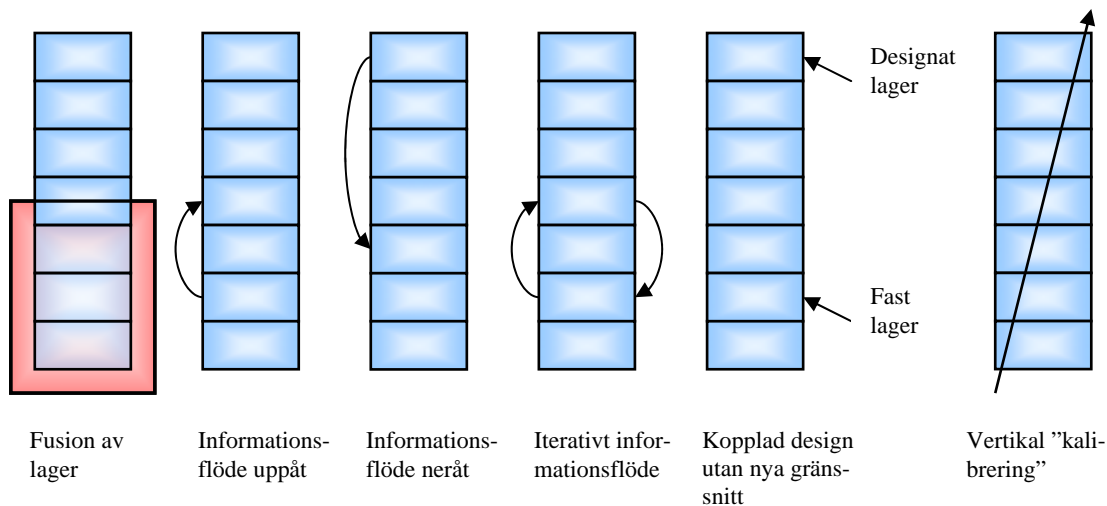
I intersystem-XL är samspelet mellan olika system i fokus<sup>7</sup>, exempelvis sammankopplingen av flera system till system av system. Intersystem-XL drivs av den användarcentrerade definitionen av XL, att maximera användarnyttan av en tjänst som levereras av flera system. Eftersom intersystem-XL involverar flera system begränsas möjligheten till gemensam optimering, troligen får man fokusera på passiv och statisk XL.

---

<sup>7</sup> I stället för "cross-layer" (XL) borde vi kanske kalla det "cross system" (XS)?

## 6 Exempel på XL

När vi nu har etablerat en grundläggande nomenklatur kan vi närmare diskutera och exemplifiera olika typer av XL. Figur 2, inspirerad av [SrM], illustrerar de olika "definitionerna" av XL; att bortse från lagerindelningen genom gemensam optimering av flera lager, informationsflöde mellan lager och användarcentrerat perspektiv.



Figur 2: Olika tolkningar av lageröverskridande design.

Fusion av två eller flera lager till ett är ett uppenbart exempel på XL. Man kan exempelvis tänka sig att fysiska lagret, länklagret och nätlaget slås samman för att effektivisera kommunikationen i ett sensornät med avseende på exempelvis data-takt [MoM].

Informationsutbyten mellan olika lager i protokollstacken tillhör alla kategorin dynamisk, eller adaptiv, XL. Informationen som utbyts används i realtid för att påverka kommunikationsegenskaperna.

Ett exempel på informationsflöde uppåt i protokollstacken är om routingen tar hänsyn till momentant tillgänglig data-takt på radiolänkar med variabel data-takt. Här väljs vägen mellan ursprungs- och mottagarnod beroende på vilken väg som erbjuder högst momentan data-takt. Antingen kan valet göras beroende på rådata-takten över länkarna längs vägen eller beroende på vilken väg som har mest ledig kapacitet. I båda fallen måste information skickas från länklagret till nätlaget. I det senare fallet måste även information från transport- och/eller applikationslagret skickas till nätlaget, d v s ett informationsflöde neråt i protokollstacken. Routing som tar hänsyn till varierande data-takt ger högre kapacitet, särskilt för fördröjningskänslig trafik, men kräver noggrann information om momentan data-takt för att fungera bra [FNT].

Iterativt informationsutbyte får vi till exempel om länklagret informerar applikationslagret om momentant och långsiktigt tillgänglig kapacitet och applikationslagret i sin tur meddelar kapacitetsbehovet. Applikationslagret kan använda informationen för QoS-ändamål och länklagret kan, om tillgänglig kapacitet

överskrider behovet, minska uteffekt och därigenom minska interferensnivån för andra användare och, i vissa tillämpningar, upptäcktsrisken.

Ett exempel på XL mellan applikation och routing är att integrera en positionstjänst med routingprotokollet Fisheye State Routing (FSR). Positionstjänsten ställer mycket höga krav på datatakt [Skö] och FSR använder position (avstånd) för trafikhanteringen [JPS] med följderna att overheadtrafiken ökar. Analys visar att vi får effektivare kommunikation genom att samordna dessa informationsflöden [PJS].

Kopplad XL utan nya gränssnitt tillhör kategorin statisk XL. Ett exempel är källkodning som tar hänsyn till kanalens felkaraktäristik (error resilient source coding)<sup>8</sup>. En källkodningsalgoritm kan exempelvis utformas så att ingen katastrofal felspridning sker vid de vanligaste kanalstörningarna, viktig information om komprimerat data skyddas mer än mindre viktig. Ingen information utväxlas mellan lager under drift, utan XL sker vid utveckling av algoritmerna.

Om källkodningsalgoritmen istället tar hänsyn till momentan datatakt får vi adaptiv XL. Till exempel kan en videokompressionsalgoritm komprimera mindre, ge bättre bildkvalitet, när den momentana datatakten är hög, och komprimera mer, ge sämre bildkvalitet eller ingen bild alls, vid låg momentan datatakt. I det här exemplet skickas information från länklagret till applikationslagret, d v s tvärs genom hela protokollstacken.

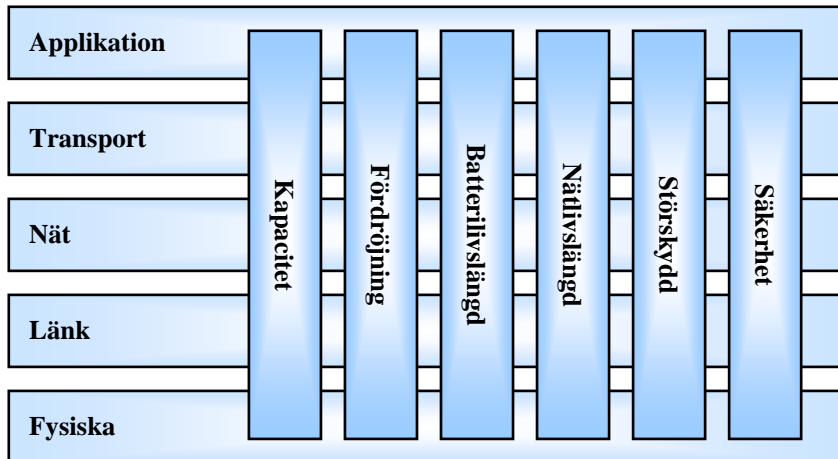
Något som i OSI-referensmodellen inte är XL är informationsutbyte och adaptation mellan länk- och MAC-protokoll. Dessa ligger i OSI-modellen i samma lager, och hur de utformas är alltså en ”inre angelägenhet”.

Vertikal kalibrering<sup>9</sup> är ett annat namn på statisk XL. Utifrån en viss önskad egenskap gör man först en analys av vad egenskapen innebär på olika protokollnivåer och hur olika protokoll/algoritmer på olika nivåer påverkar varandra med avseende på egenskapen i fråga. Man väljer sedan en kombination av protokoll som ger önskade egenskaper. Vertikal kalibrering kan illustreras med hjälp av en egenskapsmatrix, se figur 3.

---

<sup>8</sup> I någon mening tar alla kompressionsalgoritmer hänsyn till kanalens felkaraktäristik som ofta antas vara gaussiskt brus.

<sup>9</sup> Eftersom protokollen/algoritmerna är givna och inte kan påverkas utan det vi kan påverka är valet av dem används termen ”kalibrering” i stället för ”optimering”.



Figur 3: Illustration av hur olika egenskaper påverkar design på olika lager. Här använder vi en femlager hybridmodell [Tan, s 49].

I figuren har vi angivit ett antal egenskaper som kan vara intressanta i ett ad hoc-nät. Egenskapernas skärningar i de olika lagren illustrerar att egenskapen i fråga är en "emerging property" av hur protokollen/algorithmerna på de olika lagren samverkar. Egenskapsmatrisen illustrerar en vertikal koppling mellan lager.

En naturlig fråga är vilken egenskap man skall optimera efter i olika tillämpningar. I fallet sensornät är batteri- eller nätivslängder starka kandidater, men i fallet taktiska kommunikationsnät är det inte helt självklart vilken eller vilka egenskaper som dominerar.

Ett exempel på statisk XL är om vi undersöker hur olika tjänster med olika krav på egenskaper fungerar ihop. En korsreferenstabell kan visa konflikter mellan algoritmer med olika egenskaper på olika lager. Tabellen nedan illustrerar en tänkt sådan korsreferenstabell för algoritmer på tre olika lager med avseende på en tänkt egenskap. På lager 1 och 2 utvärderas två metoder och på lager 3 utvärderas tre metoder.

		Lager 1		Lager 2		Lager 3		
		Metod 1	Metod 2	Metod 1	Metod 2	Metod 1	Metod 2	Metod 3
Lager 1	Metod 1	—	☺	☺	☺	☺	☹	☺
	Metod 2	☺	—	☺	☺	☺	☺	☺
Lager 2	Metod 1	☺	☺	—	☺	☺	☹	☺
	Metod 2	☺	☺	☺	—	☺	☺	☺
Lager 3	Metod 1	☺	☺	☺	☺	—	☺	☺
	Metod 2	☹	☺	☺	☹	☺	—	☹
	Metod 3	☺	☺	☺	☺	☺	☹	—

Tabell 1: En tänkt korsreferenstabell för statisk XL.

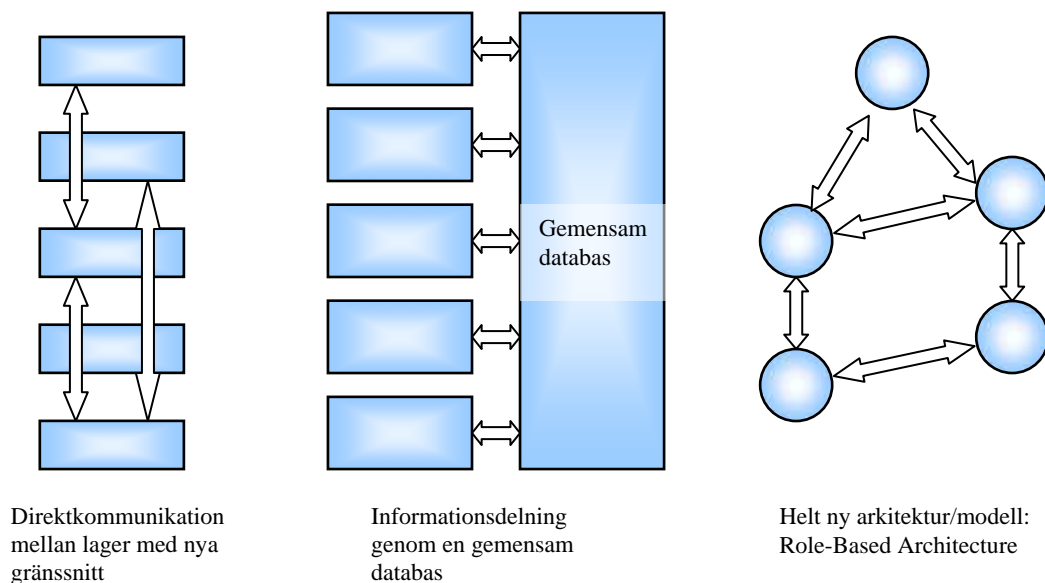


## 7 Arkitekturer för XL

För att implementera XL och möjliggöra ny funktionalitet måste arkitekturen modifieras. I figur 4 illustreras tre möjliga arkitekturer för XL inom protokollstackarna.

I fallet med informationsutbyte mellan två icke intelligande lager kan man introducera nya gränssnitt för informationsflöde direkt mellan de berörda lagren. Nackdelen är att för varje nytt informationsflöde måste nya gränssnitt introduceras vilket försvårar gradvis introduktion av nya informationsflöden och försvårar underhåll av arkitekturen.

Ett alternativ som erbjuder ökad flexibilitet är att introducera en informationsdimension för att *kunna* använda adaptiva tekniker. Utöver den normala kommunikationen mellan intelligande lager görs information från alla lager tillgänglig i en gemensam databas med gränssnitt till alla lager. Protokoll som har förmåga att utnyttja extrainformation kan nyttja all information från alla lager som har lagrats i databasen. Standardprotokoll som inte använder eller genererar extrainformation kommunicerar med intelligande lager genom de standardiserade gränssnitt som beskrivs i respektive referensmodell.



Figur 4: Nya arkitekturer för XL.

En helt ny arkitektur är vad som ibland refereras till som Role-Based Architecture (RBA) [BFH]. I denna finns ingen hierarkisk ordning mellan funktionerna<sup>10</sup> i lagren utan alla funktioner är tillgängliga för alla övriga efter behov. Det ger stor flexibilitet, både vid design och i realtid, men kan kräva helt nya systemimplementeringar.

<sup>10</sup> Vi använder termen funktioner i stället för lager eftersom det är motsägelsefullt att säga lager i en struktur som saknar lager.

Det är uppenbart att flexibiliteten kommer med ett pris i form av potentiellt kraftigt förändrade system. Detta pekar på vikten av att analysera konsekvenserna av ny arkitektur för kommunikationssystemet.

## 8 Forskningsfrågor

Inom vilka områden bedrivs då forskning kring XL? Vi kan dela in forskningen dels efter tillämpningsområde och dels efter tekniskt område. Tillämpningarna kan grovt delas in i tre huvudområden; sensornät, mobila (taktiska) kommunikationsnät och mobiltelefonisystem. De tekniska områdena finner vi som forskningsfrågor i gränsländerna mellan olika lager i protokollstacken.

Även om det finns ett stort antal XL-förslag i den vetenskapliga litteraturen är det inte klart vilka som är viktigast och mest relevanta. För att kunna identifiera de viktigaste förslagen måste effekten av XL utvärderas genom en grundlig analys av prestandaförbättringar vägt mot ökade ”kostnader” i form av ökad komplexitet, minskad modularitet, etc. Leder den föreslagna lageröverskridande designen till någon nytta för användaren och systemet?

### 8.1 Tillämpningar

I sensornät är energin en begränsad resurs, och det är därför naturligt att göra kommunikationssystemet så energisnålt som möjligt [GoW]. Sensornät är en drivande applikation för forskningen kring XL och forskningen bedrivs inom en rik flora av frågeställningar kring livslängd, nätkapacitet, effektivt resursutnyttjande etc.

Sensornät antas ofta vara ad hoc-nät, och många frågeställningar är relevanta även för taktiska radionät. Forskningen kring XL för taktiska nät rör mycket arkitekturfrågor, exempelvis om hur man skall kunna dra nytta av XL men ändå behålla den modularitet som lagerindelad arkitektur ger [CMT, ZTS].

I mobiltelefonisystem som är cellbaserade fleranvändarsystem är vanligen endast en radiolänk involverad. XL-forskningen här fokuserar mycket på tjänstekrav och blandningar av olika tjänstekrav, TCP/IP över trådlösa länkar och de speciella arkitekturfrågor som uppstår när man vill modifiera standardiserade system [SRK, CRR].

### 8.2 Forskningsområden

#### 8.2.1 Kanalnära XL

Det sker omfattande forskning inom XL som rör kopplingen till det fysiska lagret. Kanalkunskap i länklagret (vilket inkluderar MAC) medger opportunistisk användning av kanalen och förbättrar prestanda [BDM och referenser däri]. Dessutom interagerar funktioner i nätlagret och länklagret i ad hoc-nät vilket motiverar att även nätlagret inkluderas i XL [BDM]. Vidare kan ett informationsutbyte upp till transportlagret förbättra prestanda [SRK]. I litteraturen ges många förslag där man, genom att samtidigt betrakta flera lager i kommunikationssystemet som en helhet, åstadkommer förbättringar i fråga om energiförbrukning, fördröjning, säkerhet etcetera.



I förlängningen väcker kanalnära XL frågan om det fysiska lagrets roll i ett radiokommunikationsnät. I trådbaserade<sup>11</sup> nät har det fysiska lagrets roll varit förhållandevis undanskymd – att sända och ta emot paket när högre lager så har krävt. Framsteg i signalbehandling möjliggör att fysiska lagret spelar en större roll i trådlösa nät. Frågan är vilken roll det fysiska lagret *skall* spela i ett trådlöst nät. Detta är relevant för XL därför att, för det första, lagerindelad arkitektur likt OSI-referensmodellen tillåter inte mycket mer för det fysiska lagret än att fungera som en bit-tunnel, och för det andra, förbättringar i det fysiska lagret måste balanseras med motsvarande förändringar i högre lager. XL baserat på avancerad signalbehandling på det fysiska lagret är ett intressant forskningsområde för framtiden.

En annan aspekt på det fysiska lagret är att i trådbundna nät sker kommunikationen från punkt till punkt och nätet är en samling väldefinierade punkt-till-punkt-förbindelser. Så är inte fallet i radiokommunikationsnät eftersom radio genom sin natur är rundstrålade. Det finns ingen lika självklar kommunikationslänk<sup>12</sup> i trådlösa nätverk, och frågan är om det är motiverat att försöka skapa punkt-till-punkt-länkar i ett trådlöst nät. I stället för att se den rundstrålade egenskapen som ett problem kan man utnyttja den egenskapen för att skapa nya kommunikationsmetoder för trådlösa nätverk, exempelvis för samverkan mellan noder [ZhV]. Det fysiska lagret kan även spela en större roll vid multicast och broadcast – i stället för att sända separata strömmar/paket till alla mottagare kan flera mottagare täckas vid en sändning. Detta kräver dock nya protokoll som kan hantera olika trafiktyper.

Att använda den rundstrålade egenskapen för multicast och broadcast ryms inte inom den lagerindelade arkitekturen och kräver således ofrånkomligen en viss grad av brott mot referensmodellen, och är därigenom XL. Ett sätt att utnyttja denna nya möjlighet inom XL för trådlösa nät är genom nya sändningsmetoder. En rundstrålade sändare kan samtidigt nå flera mottagare med potentiellt olika kanalkvalitet. Genom att sändaren sänder till den mottagare som har momentant bäst kanal kan den totala informationsöverföringen i nätet maximeras [BBG, BLB].

Stora informationsmängder kommer att hanteras i ad hoc-nätet och det är därför troligt att databasreplikering kan generera betydande trafik. Genom effektiv mellanlagring av informationen kan trafikmängden minskas [NSC, NSCb] och genom att använda multicast och broadcast kan sändningarna göras effektivare. Detta är ett område där XL kan ge betydande vinster i form av minskad trafiklast i nätet.

#### 8.2.1.1 Dynamisk spektrumaccess

En speciell aspekt av länknära XL är dynamisk spektrumaccess (DSA), även kallat opportunistisk spektrumaccess (OSA). Syftet med DSA är att maximera det totala utnyttjandet av spektrum genom att använda avancerad signalbehandling för att kunna använda momentant utnyttjade frekvenser [BQZ, och referenser däri]. En nyckelkomponent är ett MAC-protokoll som momentant kan estimerar signal-

---

<sup>11</sup> Inkluderar alla typer av nät som använder kablar eller optiska fibrer.

<sup>12</sup> Med "länk" menar vi här en förbindelse mellan två noder i ett kommunikationsnätverk. Radiolänkar i bemärkelsen (fasta) installationer med antenner med mycket kraftig riktverkan i båda ändar ger en uttalad punkt-till-punkt-förbindelse.

miljön och därefter anpassa sändning i tid och frekvens. Mjukvarudefinierad radio (Software Defined Radio, SDR) är en viktig möjliggörare för DSA.

I litteraturen rapporteras om lageröverskridande angreppssätt för att finna optimala MAC-protokoll som stödjer DSA i flerhopps ad hoc-nät [ZTS, ZTSb].

### 8.2.2 Arkitektur

En fördel med den lagerindelade arkitekturen är att den åstadkommer väldefinierade standardiserade gränser och gränssnitt mellan moduler (protokoll-lagren) i ett system. När vi frångår den ”klassiska” lagerindelade arkitekturen på olika sätt ställs vi inför utmaningen att hitta en ny referensarkitektur. Skall vi dela in systemet i moduler? I så fall, var drar vi gränserna mellan de olika modulerna? Hur skall de nya gränserna se ut? För att ta sig an den här utmaningen krävs att prestandaaspekter och implementationsaspekter vävs samman i större utsträckning än vad som sker i litteraturen idag. Fundamentalt bestämmer organisationen av moduler (lager och annat) och gränssnitten mellan dem hur effektivt information kan delas mellan moduler och till vilken kostnad i form av overhead och fördröjning. Detta i sin tur bestämmer hur effektivt ett XL-förslag som förlitar sig på informationsdelning kan bli. Därför måste förslagsställare som föreslår XL som beror på informationsflöden mellan lager eller dynamisk vertikal kalibrering börja fundera på hur fördröjningar i informationshämtning/uppdatering påverkar protokollens prestanda. De måste även kvantifiera vilken overhead som krävs för deras XL-förslag.

I stället för den traditionella lagerindelade strukturen föreslås en ny, ”rollbaserad” arkitektur (RBA) för kommunikation [BFH]. Författarna påtalar ett antal nackdelar med lagerstrukturen för Internet och undersöker de generella egenskaper hos rollbaserad arkitektur. Det är inte klart att RBA är en intressant arkitektur, men den visar hur motsatsen till strikt lagerindelning skulle kunna implementeras.

Ur de olika arkitekturförslagen växer behovet att analysera konsekvenserna av arkitekturen, och därefter föreslå en lösning som dels ger goda kommunikationsprestanda och dels inte är för komplicerad att implementera och vidmakthålla.

### 8.2.3 XL-förslag och samexistens

En viktig fråga som måste besvaras är hur olika XL-förslag samexisterar. Låt oss till exempel anta att MAC-lagret i en stack låter datatakten bero på variationer hos kanalen. Frågan är då om vidare adaptation av ramlängden kan hjälpa länklagret ytterligare? Om dessutom transportlagret utövar övergripande reglering genom att försöka kontrollera länklagerparametrarna, hur kommer den regleringen att interagera med MAC-lagrets adaptationsloop? Frågan om samexistens av olika XL-förslag är viktig när det kommer till att avgöra om vissa XL-förslag kan försvåra vidare utveckling. Antag att ett XL-förslag gemensamt optimerar det fysiska lagret och länklagret med avseende på ett visst prestandamått. Om detta förslag används, kan då andra förslag som har andra XL-kopplingar, eller inga kopplingar alls, tas i bruk senare? Dessa korsberoenden är problem som återinförs i och med XL och förutom att presentera nya XL-förslag måste man nu även klargöra vilka andra XL-tekniker som kan och inte kan samexistera med det aktuella förslaget [KaK].

### 8.2.3.1 När skall en specifik XL-metod användas

Förhållandena i ett trådlöst nätverk varierar vanligtvis med tiden. En stark motivation för XL är att få protokollstacken att reagera på variationer i det underliggande nätet så att en optimal operationspunkt alltid bibehålls [SRK]. Strävan efter en sådan optimal operationspunkt ger upphov till två utmaningar. För det första måste man fastställa under vilka förhållanden som den föreslagna XL-metoden verkligen ger prestandaförbättringar. För det andra måste effektiva mekanismer för att snabbt och korrekt bedöma nätförhållandena byggas in i protokollstacken och den overhead som skapas måste tas med i beräkningarna. Det sistnämnda berör även frågan om arkitektur och gränssnitt mellan moduler.

I kommunikationsnät är modularitet, utvecklingstid, underhåll och livslängd viktiga faktorer som måste vägas mot ökad prestanda och reducerad overhead. Kan de förstnämnda egenskaperna kvantifieras för att kunna vägas mot de tekniska egenskaperna?

Lagergränserna är i sig inte självklara och kan ändras om en ny referensmodell tas fram för trådlösa ad hoc-nät.

I [KaK] presenteras ett exempel som illustrerar hur en XL-implementation som gör en iterativ optimering av trafikflöde och effekt leder till prestandaförluster under vissa patologiska nätförhållanden. Exemplet i [KaK] understryker behovet av att fastställa under vilka förhållanden en XL-metod skall användas och under vilka förhållanden den inte skall användas.

### 8.2.4 Intersystemfrågor

Intersystemfrågorna, det vill säga kopplingen mellan olika system, är inte så rikt behandlade i litteraturen. Varje fall av systemsammankoppling är i någon mening unikt och det blir därför svårare att ställa välformulerade frågor och göra generaliseringar. Några intersystemfrågor som dock berörs är kopplingen mellan mobila och fasta nät samt mobilitetshantering.

Forskningen kring kopplingen fasta och mobila nät är ett område som troligen kommer att öka i omfattning när mobila terminaler (mobiltelefoner) får en viss ad hoc-funktionalitet. Genom lokal ad hoc-nätbildning mellan närbelägna terminaler kan exempelvis kvaliteten hos en videoöverföring över GPRS förbättras [KaL, KEL]. Man kan även tänka sig att andra tillämpningar, exempelvis positionsbaserade tjänster, kan förbättras via lokal ad hoc-nätbildning, särskilt inomhus.

Ett annat systemöverskridande område med koppling till arkitekturfrågor är integrationen av kommunikationssystem och ledningssystem. I mjukvarudefinierad radio finns många av de programkomponenter som finns i ledningssystem och det är därför onödigt att duplicera dessa. En lageröverskridande design mellan dessa system har potential att samordna mjukvaran, vilket antingen kan ge mindre, effektivare mjukvara eller en kontrollerad redundans.

## 9 Aktiviteter på FOI Informationsöverföring

Traditionellt bedriver kompetensgrupperna på FOI Informationsöverföring långsiktig, tillämpad forskning inom lager i kommunikationsprotokollstacken. I teorin skall projekt lösa en uppgift med tydliga (egenskaps-) mål och utnyttja kompetenser från olika kompetensgrupper och därigenom vara lageröverskridande till sin natur. I praktiken har dock många av projekten varit fokuserade på frågeställningar inom ett specifikt lager. Från och med 2006 finns dock ett klart uttryckt mål att arbeta lageröverskridande inom projekten.

I planen för projektet *Tjänstekvalitet i Ad hoc-nät* står bland annat att man skall studera cross-layer design mellan högre lager för att undersöka hur tjänstekvaliteten påverkas av den mer övergripande trafikhanteringen i ett ad hoc-nät och att man skall studera cross-layer design mellan lägre lager för att studera interaktionen mellan accessprotokollet och nodens adaptationsegenskaper och hur länkadaption hos noderna ska kunna utnyttjas effektivt i ad hoc-nätet.

Inom projektet *Telekommunikationer för strid i urban miljö* sker en vidareutveckling av den OFDM-demonstrator som togs fram i projektet *Adaptiv radionod* [AJL]. I den vidareutvecklingen är interaktionen mellan länk- och MAC-protokoll en viktig aspekt.



## 10 Områden av intresse för FOI/FM/FMV

Mycket av det som nämnts i avsnittet forskningsområden är av intresse för FOI/FM/FMV. Utöver detta kan nämnas specifika arkitekturfrågor för GTRS, vågformsutveckling, XL inom ramen för SCA samt intersystemfrågor.

Arkitekturen i GTRS lär vara väl fastställd. Det torde dock vara intressant att göra en analys av systemarkitekturen och se vilka möjligheter till XL som erbjuds. Vilka protokoll och vilka lager behövs och berörs av XL, och vilka är möjliga att påverka?

Det är troligt att XL är en viktig del i framtida bredbandiga vågformer eftersom dessa ställer höga krav på effektivitet i systemet. Att medverka i vågformsutvecklingen och påverka kopplingen mellan vågform och applikation är ett mycket intressant område.

Generellt ger SDR stora möjligheter till XL. Den mest spridda öppna SDR-standarderna är SCA och den används i GTRS. Det är av stort intresse att utreda de möjligheter till XL och eventuella begränsningar av XL som SCA ger eftersom detta har en omedelbar koppling till vilken frihet SCA ger att använda XL för att realisera effektiva bredbandiga vågformer.

En stor intersystemfråga är inkopplingen av mobila ad hoc-nät i fasta nät. Ett mobilt nät är bitvis transient till sitt beteende, det kommer och går, och detta leder till utmaningar inom adressering och QoS. Kopplingen av mobila nät mot FMIP/FTN fungerar inte tillfredsställande idag och är ett problem som måste lösas [Win]. Detta är en militärspecifik fråga där den kommersiella världen idag inte erbjuder några fungerande lösningar.

Traditionellt analyseras störningsproblem på enskild länknivå men störnings- och telekonfliktfrågor bör behandlas på systemnivå. I takt med att störningars påverkan på systemprestanda högre nivåer börjar analyseras [SLS, LSS] kan det bli aktuellt att använda störningsmått från högre nivåer, d v s att använda någon form av mått på tjänstetillgänglighet och tjänstekvalitet i stället för bit- och paketfshalter.



## 11 Projektförslag

Vi ger här några uppslag till möjliga projekt av XL-karaktär.

Kvaliteten hos användartjänster beror bland annat på paket- och bitfelshalter, fördröjning och paketförluster. Hur effektiva system för inkrementell redundans och omsändningar som lämpar sig för flerhoppkommunikation skall utformas är inte utrett i litteraturen. Låga paket- och bitfelshalter är väsentligt för att garantera tjänstekvalitet och vi föreslår därför ett projekt med syftet att designa effektiva system för inkrementell redundans och omsändningar.

GTRS Demo erbjuder ett mobilt ad hoc-nät för taktisk kommunikation. Generellt för ad hoc-nät gäller att en betydande del av tillgänglig kapacitet i nätet används för nätintern signalering, exempelvis för routing och accessprotokoll. Hur är situationen specifikt i GTRS Demo? Hur mycket kapacitet finns i nätet? Hur stor del av tillgänglig kapacitet kommer användarna till godo i form av olika tjänster? Vi föreslår ett projekt där man först bestämmer metoder för att mäta totalt tillgänglig kapacitet och kapacitet tillgänglig för användartjänster, sedan genomför sådana mätningar i samband med demonstrationstillfälle och utvärderar ”effektiviteten” av den existerande protokollstrukturen i GTRS Demo.

En tanke bakom mjukvarudefinierad radio är att kunna uppgradera och vidareutveckla radiofunktioner utan att behöva byta hårdvara. GTRS Demo levereras med en befintlig vågform som ger en viss funktionalitet. Inom ramen för vidareutveckling av funktionalitet och utveckling av avancerade vågformer föreslår vi en förstudie kring vilka vinster cross-layer (lageröverskridande) design för GTRS Demo kan ge. Det är troligt att man genom att göra avsteg från den gängse lagerindelade strukturen kan öka kapaciteten i radionätet. För att identifiera möjligheter till prestandaförbättringar i framtida versioner av GTRS föreslår vi att man bestämmer hur Rockwell-Collins GTRS Demos-protokollstack ser ut och mappar den till OSI-referensmodellen. Utifrån detta utreds vilka förbättringar och prestandavinsterna som är möjliga med cross-layer design. Det är också väsentligt att bestämma inom vilka avgränsningar som skall göras, d v s hur stor del av systemet som är föremål för cross-layer design.

Databasreplikering kommer troligen att bli en kapacitetskrävande tjänst i ett mobilt ad hoc-nät. Vi föreslår därför att utveckla protokoll som stöder multicast/broadcast och effektiv cache för databasreplikering. I [PJS] visades analytiskt att vi får effektivare kommunikation genom att samordna informationsflödena i en positionstjänst och Fisheye State Routing. Genom det analytiska förfarandet förbises många praktiska och arkitekturrelaterade problem kring informationsflödet. Det vore därför intressant att implementera hela protokollstacken med informationsutbyte för att identifiera möjligheter och problem och lösningar.

Säkerhet i ad hoc-nät är ett ständigt närvarande problem. En av de lösningar som föreslås för Internet är IPsec. Det är dock inte klart hur IPsec fungerar i ad hoc-nätsmiljö, och hur det påverkar QoS, varför vi föreslår att detta utreds skyndsamt.

Inom området för telekonflikter föreslår vi att man fortsätter arbetet att analysera störningars inverkan på system- och tjänsteprestanda och föreslår ett nytt mått på telekonflikter och störningar där måttet är relaterat till användarens nytta av systemet snarare än detaljerade tekniska parametrar som bitfelshalter.



I radiokommunikation har det fysiska lagret andra egenskaper än i trådbundna nät. I stället för att se dessa egenskaper som problem bör man utreda vilka möjligheter de ger. Där är troligt att det går att reducera trafikmängder i nätet genom att utnyttja den rundstrålande egenskapen bättre vid multicast och broadcast. Vi föreslår en studie som utreder och utvecklar nya protokoll som kan hantera multicast och broadcast, samt föreslår lösningar baserat på nätkodning (network coding) för att minska trafikmängderna vid multicast och broadcast.

En högkapacitetsteknik som utretts för taktiska behov är Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM). För civila tillämpningar har man föreslagit att OFDM kan användas som fleraccesssteknik. Fördelen med OFDM som fleraccess-teknik är att kapaciteten kan fördelas mellan användare efter behov. Vi föreslår en förstudie som undersöker om detta är en möjlig och intressant teknik även för taktiska tillämpningar.

## 12 Diskussion och slutsatser

I litteraturen ”definieras” XL som avvikelser från en välstrukturerad referensmodell därför att en implementering enligt gängs referensmodell är för ineffektiv med avseende på en kritisk, dimensionerande resurs. Denna avvikelse sker till priset av reducerad modularitet. Vinsten som görs genom XL bör därför vara signifikant för att motivera avvikelserna från referensmodellen.

I sensornät prioriteras ofta livslängden och energitillgången (batterikapaciteten) blir då den dimensionerande resursen. Det är därför motiverat att bortse från modulariteten och använda långtgående XL för att öka sensornätets livslängd.

I fasta nät är överföringskapaciteten i länkar och beräkningskraften och energitillgången i noderna så hög att det finns mer att vinna på stark modularitet än eventuella vinster via XL.

Om XL är motiverat beror alltså på tillämpningen. Vi menar att det är viktigt att ta fasta på det förhållningssätt som termen cross-layer design, eller lageröverskridande design, i sig indikerar – det gäller att göra vinster genom samordning över lagergränser, inte att helt ta bort lagren.

I mobila ad hoc radionät är situationen något mer komplicerad. Under förutsättningarna att TCP/IP-protokollstacken används, applikationer förväntas bete sig som i fasta nät, att positionstjänster och andra kommunikationsintensiva tjänster fyller nätet med trafik, etc. blir radiokanalen en dimensionerande resurs och XL kan motiveras från den synvinkeln. I system som GTRS och JTRS är flexibilitet, anpassnings- och utvecklingsbarhet drivande faktorer, vilket talar emot XL eftersom det reducerar modularitet och flexibilitet. Här kan man tänka sig en typ av XL som behåller tydliga lager men medger ett omfattande informationsutbyte dem emellan.

XL medför ofta gemensam optimering av funktioner i olika lager och för att detta skall vara genomförbart måste det system för vilket XL skall tillämpas avgränsas väl. Om inte detta görs reducerar vi flexibiliteten och modulariteten och riskerar oönskade interaktioner mellan olika lager. Vid XL är det viktigt att avgränsa vilket system eller delsystem som är föremål för XL för att begränsa komplexiteten. Exempelvis kan den interna kommunikationen i ett ad hoc-nät vara föremål för XL – man använder inte IPv6 över radiolänkarna utan en protokollstack som är optimerad för låg overhead och effektiv radiokommunikation. I varje nod finns parallellt en TCP/IP-stack som sköter kommunikation mot fasta IP-nät. En fråga som då uppstår är på vilken nivå övergången mellan stackarna kan ske.

Man kan överväga XL när

- det finns en identifierad systemkritisk dimensionerande resurs.
- det går att avgränsa det system som optimeras eftersom modulariteten förloaras.
- man är beredd att genomföra en förutsättningslös optimering av systemet.
- man kan analysera hur den föreslagna XL-lösningen påverkar andra delar av systemet, vidareutveckling och samexistens med andra funktioner.

Systemoptimeringen kräver att man är beredd att ifrågasätta alla tidigare lösningar och kan alltså bli resurskrävande både under utvecklings- och vidmakthållandefas-

ser. Frågan hur man utvärderar effekten av XL jämfört med traditionell design utan att implementera två kompletta system återstår också.

Baserat på resonemanget ovan och för att ta hänsyn till tekniska aspekter och användbarhetsaspekter vill vi föreslå en definition av XL enligt följande:

*Lageröverskridande design är när man avviker från en specifik referensmodell, genom extra informationsflöde eller på annat sätt, i syfte att optimera prestanda med hänsyn till en specificerad kritisk resurs för ett väl avgränsat system.*

Vi konstaterade att i referensmodellerna betraktas det fysiska lagret som en punkt-till-punkt-förbindelse med uppgiften att flytta bitar vid behov. Eftersom referensmodellerna inte kan hantera radions rundstrålande egenskaper är det kanske fundamentalt fel att försöka tillämpa referensmodeller från den trådbundna världen på radio(nät)? Vad vi i så fall behöver är en ny radioreferensmodell som tar hänsyn till utbredningsegenskaper och behov av flexibilitet i radionära signalbehandling men ändå ger tillräcklig struktur för modularitet.

## Referenser

- [AJL] Ahlin, Lars; Johansson, Peter; Linder, Sara; Pääjärvi, Lars; Rantakokko, Jouni; Tullberg, Hugo, "Demonstration av adaptiv radionod", FOI-R--1208--SE, mars 2004, Teknisk rapport.
- [BBG] Bender, Paul; Black, Peter; Grob, Matthew; Padovani, Roberto; Sindhu-shayana, Nagabhushana; Viterbi, Andrew, "CDMA/HDR: A Bandwidth Efficient High Speed Wireless Data Service for Nomadic Users", IEEE Communications Magazine, vol. 38, no. 7, jul 2000, pp. 70 – 77.
- [BDM] Barrett, Chris; Drozda, Martin; Marathe, Achla; Marathe, Madhav V., "Characterizing the Interaction between Routing and MAC Protocols in Ad-Hoc Networks," Proc. ACM Annual Int'l. Symp. Mobile Ad Hoc Net. and Comp., Lausanne, Switzerland, June 2002.
- [BFH] Braden, Robert; Faber, Ted; Handley, Mark, "From Protocol Stack to Protocol Heap– Role-Based Architecture", First workshop on Hot Topics in Networking, 28-29 Oct 2002, Princeton, NJ, USA.
- [BLB] Bhushan, Naga; Lott, Chris; Black, Peter; Attar, Rashid; Yu-Cheun Jou; Fan, Mingxi; Ghosh, Donna; Au, Jean, "CDMA2000 1xEV-DO Revision A: A Physical Layer and MAC Layer Overview", IEEE Communications Magazine, vol. 44, no. 2, pp. 37 – 49, feb 2006.
- [BQZ] Berggren, Fredrik; Queseth, Olav; Zander, Jens; Asp, Börje; Jönsson, Christian; Stenumgaard, Peter; Kviselius, Niklas Z; Thorngren, Bertil; Landmark, Urban; Wessel, Jonas, "Dynamic Spectrum Access, Phase 1: Scenarios and research challenges", KTH TRITA-S3-RST-0407, september 2004, ISSN 1400-9137.
- [CMT] Conti, Marco; Maselli, Gaia; Turi, Giovanni; Giordano, Silvia, "Cross-Layering in Mobile Ad Hoc Network Design", Computer, February 2004 pp. 48 – 51.
- [CRR] Carneiro, Gustavo; Ruela, José; Ricardo, Manuel, "Cross-Layer Design in 4G Wireless Terminals", IEEE Wireless Communications, vol. 11, no. 2, apr 2004, s. 7 – 13.
- [FNT] Farman, Linda; Nilsson, Jan; Tronarp, Otto, "Using variable data rate in mobile ad hoc networks supporting delay sensitive traffic", FOI-R--1725--SE, okt 2005, Teknisk rapport, ISSN 1650-1942.
- [GoW] Goldsmith, Andrea J.; Wicker, Stephen J., "Design Challenges for Energy-Constrained Ad Hoc Wireless Networks", IEEE Wireless Comm., vol. 9, no. 4, 2002, pp. 8 – 27.
- [JPS] Johansson, Erika; Persson, Katarina; Sköld, Mattias; Sterner, Ulf, "Analysis of the fisheye routing technique in highly mobile ad hoc networks", Proc. IEEE Vehicular Technology Conf. (VTC Spring 2004), Milano, May 17-19, 2004.
- [KaK] Kawadia, Vikas; Kumar, P.R., "A Cautionary Perspective on Cross Layer Design", IEEE Wireless Comm, vol. 12, no. 1, feb 2005, s. 3 – 11.

- [KaL] Karlsson, Johannes; Li, Haibo, "P2P video multicast for wireless mobile clients", Proc. Swedish symposium on Image Analysis, 16-17 mar 2006, Umeå, Sweden.
- [KEL] Karlsson, Johannes; Eriksson, Jerry; Li, Haibo, "P2P video multicast for wireless mobile clients", Proc. Fourth Internat. Conf. Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys 2006). 19-22 jun 2006, Uppsala, Sweden.
- [LTW] Lopez Toledo, A; Wang, X, "TCP Performance over Wireless MIMO Channels with ARQ and Packet Combining", IEEE Trans Mobile Computing, vol. 5, no 3, Mar 2005, pp 208 – 223.
- [LSS] Linder, Sara; Stenumgaard, Peter; Sterner, Ulf; Svenmarck, Peter, "Inter-system Interference Risks in the Future Swedish Defence", FOI-R--1405-SE, december 2004, Användarrapport, ISSN 1650-1942.
- [MoM] MobileMan project, "Architecture, Protocols and Services," Deliverable D5; <http://cnd.iit.cnr.it/mobile-MAN>
- [NSC] Nuggehalli, Pavan; Srinivasan, Vikram; Chiasserini, Carla-Fabiana; Rao, Ramesh R., "Energy-Efficient Caching Strategies in Ad Hoc Wireless Networks", Proceedings of MobiHoc 2003, Annapolis, MD, USA, jun 1—3 2003.
- [NSCb] Nuggehalli, Pavan; Srinivasan, Vikram; Chiasserini, Carla-Fabiana; Rao, Ramesh R., "Efficient Cache Placement in Multi-hop Wireless Networks," Accepted for publication in IEEE/ACM Transactions on Networking
- [PJS] Persson, Katarina; Johansson, Erika; Sköld, Mattias; Sterner, Ulf, "Combining distribution of position information with fisheye routing traffic for mobile ad hoc networks", Proc. Radiovetenskap och kommunikation 2005 (RVK 05), jun 14 – 16, 2005, Linköping, Sweden.
- [ScS] Schaar, Mihaela van der; Shankar N, Sai, "Cross-Layer Wireless Multimedia Transmission: Challenges, Principles and New Paradigms", IEEE Wireless Communications, vol. 12, no. , aug 2005, s 50 – 58.
- [Skö] Sköld, Mattias, "Scenariobaserad utvärdering av positionsförmedling i en mekaniserad bataljon", FOI MEMO 4233, dec 2001.
- [SLS] Stenumgaard, Peter; Linder, Sara; Sterner, Ulf; Svenmarck, Peter; Fors, Karina, "Methods for intersystem-interference analyses in dynamic wireless communication networks", FOI-R--1868--SE, december 2005, Metodrapport, ISSN 1650-1942.
- [SRK] Shakkottai, Sanjay; Rappaport, Theodore S.; Karlsson, Peter C., "Cross-Layer Designs for Wireless Networks", IEEE Communications Magazine, vol. 41, no. 10, okt 2003, s 74 – 80.
- [SrM] Srivastava, Vineet; Motani, Mehul, "Cross-Layer Design: A Survey and the Road Ahead", IEEE Communications Magazine, vol. , no. 12, dec 2005, s. 112 – 119.

- [SWT] Stenumgaard, Peter; Wenngren, Gunnar; Tullberg, Hugo; Nilsson, Jan; Grönkvist, Jimmi; Cronström, Per; Lindström, Jörgen; Hallberg, Jonas; Hallberg, Niklas; Grahn, Per; Andersson, Richard, "Tjänstebegreppets användning inom olika tillämpningsområden", FOI-R--1211--SE, februari 2004, Användarrapport, ISSN 1650-1942.
- [Tan] Tanenbaum, Andrew S., "Computer Networks", fjärde utgåvan, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA, 2003.
- [Win] Winberg, Ola, presentation under FOI/FMV teknksamordningsdagar 2006.
- [ZhV] Zhao, B. and Valenti, Matthew C., "Practical Relay Networks: A Generalization of Hybrid-ARQ," IEEE JSAC, vol. 23, no. 1, Jan. 2005, pp. 7 – 18.
- [ZTS] Zhao, Qing; Tong, Lang; Swami, Ananthram, "A Cross-Layer Approach to Cognitive MAC for Spectrum Agility", Conference Record of the Thirty-Ninth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 2005, okt 28 - nov 1, 2005, pp. 200 – 204.
- [ZTSb] Zhao, Qing; Tong, Lang; Swami, Ananthram, "Decentralized Cognitive MAC for Dynamic Spectrum Access", First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. (DySPAN 2005), 8-11 Nov. 2005.



## Appendix A: Referensmodeller

I detta appendix beskriver vi två nätverksarkitekturer, OSI-referensmodellen och TCP/IP-referensmodellen. Observera att detta är *referensmodeller*, inte praktiska protokollimplementationer. OSI-modellen är väldigt generell och har attraktiva teoretiska egenskaper och används därför ofta som referens. De tillhörande protokollen används å andra sidan mycket sparsamt. För TCP/IP-modellen å andra sidan är det tvärt om – dess protokoll är idag allmänrådande men modellen i sig är mindre användbar.

### OSI-referensmodellen

Den mest refererade referensmodellen för kommunikation är ISOs Open Systems Interconnection Reference Model (OSI-referensmodellen, eller kortare OSI-modellen) där ”open systems” refererar till att den berör system som är öppna för kommunikation med andra system. OSI-modellen har sju lager och visas i figur A1. Principerna för att det blev just sju lager kan sammanfattas enligt följande [Tan, s 38]:

1. Ett nytt lager skall skapas när en ny abstraktionsnivå behövs.
2. Varje lager skall utföra en väldefinierad funktion.
3. Varje lagers funktion skall väljas med syfte att definiera internationellt standardiserade protokoll.
4. Lagergränserna skall välja så att informationsflödet över gränserna minimeras.
5. Antalet lager skall vara stort nog så att inte distinkta funktioner tvingas in i samma lager och litet nog för att arkitekturen inte skall bli otymplig.

Ur XL-synpunkt är punkt 4 ovan intressant eftersom informationsflöde mellan lager är centralt i många XL-förslag.

OSI-modellen utvecklades utan några specifika protokoll i åtanke. Detta gjorde att modellen blev väldigt generell, men de som designade den hade inte så stor praktisk erfarenhet så modellen blev något opraktisk<sup>13</sup>. OSI-modellens främsta förtjänst är att den klart gör skillnad mellan tre fundamentala koncept: tjänst, gränssnitt och protokoll. Tjänster är de funktioner som underliggande lager erbjuder direkt överliggande lager. Gränssnittet definierar informationsflödet mellan lager – det beskriver hur man får tillgång till tjänsten och vilka resultat man kan förvänta sig, dock inget om hur lagret fungerar inuti. Protokollet definierar kommunikationen mellan två lager på samma nivå – det är en uppsättning regler om format och innebörd av de meddelanden som utbyts mellan två lager på samma nivå. Ett protokoll kan bytas ut så länge gränssnitten inte ändras.

Även om OSI-modellen i huvudsak var tänkt för datakommunikation så används den idag för att beskriva hur även mera klassisk telekommunikation fungerar. Vi har dock argumenterat för att detta kanske inte är helt idealiskt i radionät eftersom OSI-modellen inte hanterar multicast/broadcast.

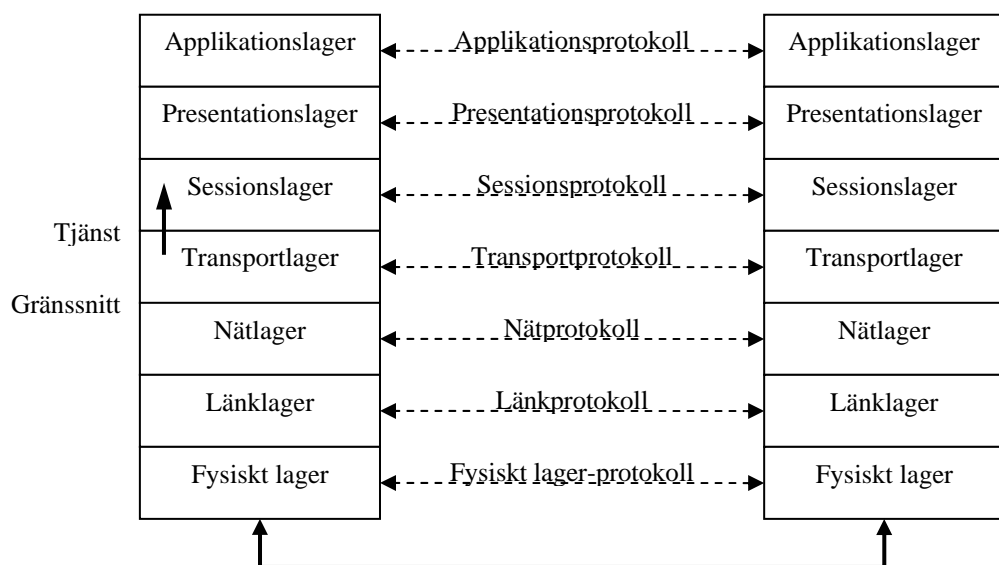
---

<sup>13</sup> Lagerindelningen i OSI-modellen är inte optimal, vissa lager är överfulla (länklagret) och andra nästan tomma (presentations- och sessions-lagren).



Observera att OSI-modellen i sig inte är en nätverksarkitektur eftersom den inte specificerar vilka tjänster och protokoll som skall användas i varje lager – den beskriver bara vad varje lager skall göra. Dock har ISO standardiserat protokoll för varje lager även om dessa inte ingår i själva referensmodellen.

I praktiken används varken den exakta lagerindelningen eller de protokoll som definierats i något system idag [SWT, kap 9.2]. OSI-modellens protokoll blev överkörda av Internetutvecklingen, där TCP/IP-stacken används. OSI-modellen är dock väldigt generell och dess egenskaper i varje lager är fortfarande mycket viktiga.



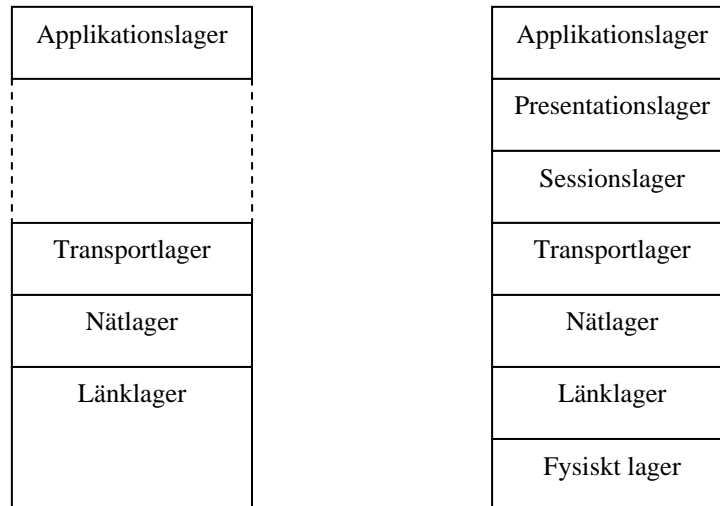
Figur A1: Figuren visar de sju lagren i OSI-referensmodellen och indikerar protokoll mellan lager på samma nivå, en tjänst från ett lager till överliggande lager samt gränssnittet mellan två lager.

## TCP/IP-referensmodellen

TCP/IP-referensmodellen togs fram för att beskriva TCP/IP-stacken, de protokoll som används för kommunikation på Internet (TCP/IP står för Transmission Control Protocol/Internet Protocol). Eftersom TCP/IP-referensmodellen är en efterhandskonstruktion för att beskriva TCP/IP-protokollstacken beskriver den naturligtvis den stacken utmärkt, men det är desto svårare att använda den till andra protokollstrukturer.

TCP/IP-modellen har bara fyra lager i motsats mot OSIs sju, se figur A2. OSI-modellens presentations- och sessionslager som är ganska tomma är inte inkluderade i TCP/IP-modellen. Länklagret i TCP/IP-modellen omfattar allt under nätlagret. Specifikationen av länklagret är inte särdeles utförlig, den säger bara att IP-paket skall kunna skickas och tas emot, vilket egentligen inte beskriver ett lager utan ett gränssnitt [Tan, s 48].

TCP/IP-modellen hade inte OSI-modellens klara uppdelning mellan tjänst och protokoll, även om senare varianter har blivit mer OSI-liknande i detta hänseende. Som konsekvens är OSI-modellens protokoll bättre gömda och enklare att byta ut än TCP/IP-modellens.



*Figur A2: TCP/IP-modellens fyra lager jämfört med OSI-modellens sju lager. I TCP/IP-modellen saknas OSI-modellens presentations- och sessionslager och länklagret omfattar OSI-modellens länk- och fysiska lager.*



## Appendix B: Detaljerade beskrivningar av vissa områden

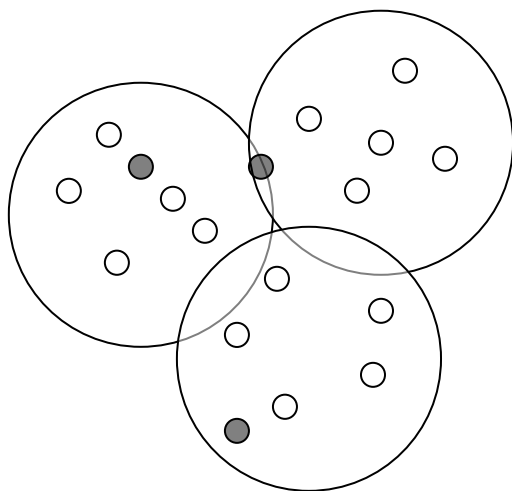
I arbetet med den föreliggande rapporten diskuterades olika aspekter av radio-kommunikation och ad hoc-nät, somliga mycket övergripande och andra mycket detaljerat. I detta appendix har de diskussionerna sammanställts och inkluderas i rapporten för fullständighets skull. Appendixet skall ses som ett diskussionsunderlag inför fortsatt arbete och inte som färdiga resultat.

### Användaraspekter

Operatörsaspekter, som operatörens tilltro till systemet/tjänsten, är mycket viktiga och måste formuleras så att de kan vägas in i en övergripande bedömning av systemet. För detta behövs en modell av användaren i systemet. Användartjänsten ställer krav på kapacitet, felhalter, fördröjningar, timing jitter etc. Vilka funktioner på olika lager måste anpassas för att stödja olika tjänster? Användartjänster och de underliggande lagren ställer krav och motkrav på varandra, vilket kräver XL. Det kan vara tvunget att designa tjänsten/applikationen utifrån radiosystemet genom att ta hänsyn till temporala aspekter, d v s att överföringskvaliteten varierar.

### Traffic Management

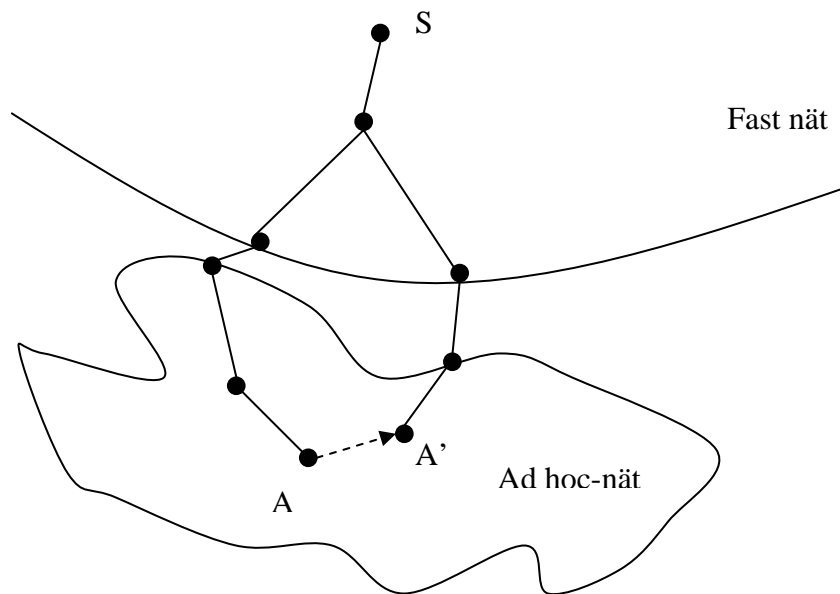
Trafikhantering (Traffic Management, TM) i ad hoc-nät rör frågor som admission control, policy control, prioriteringar, rättvisa (fairness). Den övergripande frågan är hur trafiken hanteras i nätet och hur detta relaterar till och påverkar tjänstekvalitet (Quality of Service, QoS). Hur skall QoS lösas, framför allt för realtidstjänster? Ett alternativ är att sätta upp koppel, vilket är en kretskopplad lösning. En paketbaserad lösning är att lösa QoS genom hantering av köer med olika prioritet. En fråga som uppstår är hur man hanterar kretskoppling och paketförmedling i samma nät. TM sker ofta i gateways eller i flaskhalsar. I figur A3 visas ett klustrat nät.



Figur A3: Ett klustrat nät där klusterhuvuden indikeras i svart, övriga noder i vitt.

Några frågor som uppstår i klustrade nät är hur klustren skall konfigureras internt, vad känner klusterhuvudet till och känner klusterhuvudet till alla vägar? Om vi antar att klusterhuvudena har komplett information om nätet i sitt kluster kan en del frågor kring TM förenklas genom klustring. Klusterhuvudet utgör brygga till klusterhuvuden i andra kluster, och trafik mellan två noder i olika kluster routas genom klusterhuvuden. Platt routing, oklustrade nät, ger därför ”optimalare” vägar genom nätet. En viktig aspekt på distribuerad design är att alla noder **kan** göra alla saker, men att inte alla noder **gör** allt samtidigt.

## Mobility Management



Figur A4: Illustration av hur mobilitet hanteras i gränslandet mellan fasta och mobila nät. Trafik går från S till A, A rör sig sedan till A'. Hur skall det fasta nätet hantera att trafiken nu skall gå via en annan gateway?

I figur A4 illustrerar vi några frågor kring mobility management. Vi antar att trafik går från en sändare S till en mottagare A. Om A sedan rör sig till A', hur skall då det fasta nätet hantera att trafiken nu skall gå via en annan gateway? I ett annat fall antar vi att ad hoc-nätet fragmenteras och att båda fragmenten har kontakt med det fasta nätet. All trafik mellan fragmenten måste då gå via det fasta nätet, vilket ställer krav på nätstyrningen.

Det finns ett antal principiella sätt att lösa mobility management:

- 1) Fast IP-adress och tunnling
- 2) Byt IP-adress vid förflyttning

Frågan är vilket som är mest lämpat för taktiska ad hoc-nät och andra militära tillämpningar.

Relaterat till Mobility Management är frågor om hur nätet skapas, exempelvis:

- Hur skall man hitta vägar i nätet?
- Hur skall man hitta tjänster i nätet?
- Hur hittar man noder i ett mobilt nät?
- Hur fort måste set-up gå för olika tjänster?

## Protokollfrågor

Vilket/vilka protokoll använder man i ad hoc-nät? IP ger förhållandevis stor overhead och IPv6 har ännu större adressrymd och därmed overhead. Särskilt påtagligt blir det om nyttolasten är kraftigt källkodad som exempelvis komprimerat tal. Här uppstår frågan om IP kontra kretskoppling för små paket.

## Säkerhet

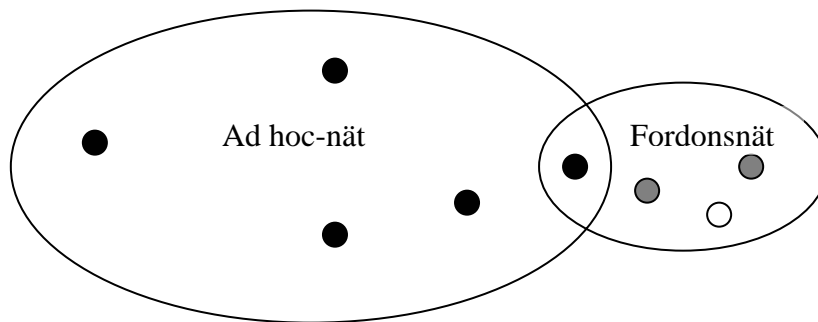
Hur påverkar IP och IPsec möjligheterna till XL?

## Interoperabilitet

Hur hittar man en mobil nod i ett ad hoc-nät? Finns det en motsvarighet till Home Location Register (HLR)? Hur utformas gateways mellan fasta IP-nätet och mobila nät? Olika nät kan använda olika protokoll, och BGP användas mellan näten.

Skalbarhet viktigt inom ad hoc-nät. Hur skall detta hanteras?

Hand-over mellan fragment diskuteras inom GTRS.



Figur A4: Figuren visa gränsen mellan ett taktiskt ad hoc-nät och ett fordonsnät. Fordonet är förbundet med det taktiska nätet via en GTRS-nod, och inom fordonet används OSPF.

Uppgift: Utvärdera hur BGP, OSPF fungerar i radionät. Hur skall OSPF prata med underliggande lager? Troligtvis fungerar inte OSPF-protokollet tillfredsställande i mobila nät.

Det behövs en protokollsvit som får ett mobilt ad hoc-nät att se ut som ett fast nät.

Vad skall GTRS användas till? Vilka särlösningar finns?

## Länk-MAC

Nedre lager i en protokollstack skall ge stabil och predikterbar förbindelse och krav från applikationerna (användartjänsterna) påverkar underliggande lager.

I adaptiva system finns troligen olika tidsskala för adaptation på olika lager; länken adapterar snabbt till variationer i kanalförhållanden, MAC har längre tidsskala för att inte ändra schema i onödan, och routing kanske ytterligare längre tidsskala.

Det torde vara nödvändigt att högre lager har längre tidsskalor för att undvika oscillerande beteende om lager adapterar "i motfas". Mängden overhead-trafik ökar också om MAC och routing uppdateras för ofta.

Är stabilitet och predikterbarhet viktigare för användaren än egenskaperna (överföringshastighet, fördröjning, etc) i sig? Är låg överföringshastighet med låg varians bättre än högre överföringshastighet med hög varians? Ja, för TCP-trafik är det bättre att ha en pålitlig, stabil kanal med lägre överföringshastighet jämfört med en högre överföringshastighet som inte är lika pålitlig, särskilt vid låga SNR [LTW]. Det är inte orimligt att tro att detta gäller även för andra typer av trafik.

Hur påverkar funktioner som källkodning, korta länkar med hög kapacitet (1/R-routing), kodning och modulation, MIMO-system et c de övriga lagren i stacken och hur skall vinsterna på lägre nivåer nyttiggöras högre upp?

Multicast och broadcast leder till att noder ibland skall skicka information vidare och ibland inte. Hur skall XL utformas för att stödja detta?

Finns det någon minsta odelbara storhet i ad hoc-nätet? IP-paket är inte en odelbar storhet, ty de kan fragmenteras. IP paketstorlek kan bli central – hur skall vi göra i ad hoc-nätet?

MAC-funktioner, exempelvis länk- eller nod-tilldelning i TDMA, påverkar radionära signalbehandling, bland annat hur gruppantenner kan användas.

CSMA fungerar dåligt med små paket eftersom RTS/CTS-förfarandet leder till mycket overhead. Här kan man antingen aggregera små paket<sup>14</sup> vilket leder till ökad fördröjning. Här uppstår XL-frågan om den ökade fördröjningen är acceptabel eller om applikationen inte behöver komprimera så hårt (i fallet ljud). Å andra sidan är det enklare att hantera variabel datatakt med CSMA än med TDMA. I TDMA finns en given tidlucka och för att utnyttja den effektivt vid variabel datatakt måste meddelandestorleken variera. Länktilldelning, nodtilldelning, blandtilldelning (noddeltilldelning kan sända opportunistiskt), schemulering.

ITU rekommenderar en maximal fördröjning för tal på 150 ms end-to-end, vilket ställer krav på XL mellan användarapplikation och MAC. Å andra sidan har militära användare god signaldisciplin, använder ”kom” för att signalera meddelandeslut, vilket gör att man kan tänka sig att släppa på fördröjningskravet.

I MAC-protokollet påverkar tidluckeplaceringen hur stor fördröjning användartjänsten upplever. Mac-protokollet måste också ta hänsyn till radionära signalbehandling, MIMO, lobformning, OFDM och adaptation för att maximera utnyttjandet av kanalresurserna. Hur kan nätet utnyttja det faktum att länken adapterar? MAC-OFDM, dela tid/frekvens-mönstret mellan olika användare, signalering, timing advance.

Även om länk och MAC båda ligger i samma lager i OSI-modellen finns det en distinktion när vi går från länk till MAC – MAC blandar in nätaspekter.

---

<sup>14</sup> Det finns talkodare som endast genererar ett mycket litet antal bitar per tidsintervall, vanligen 20 ms.

