

FFI RAPPORT

WIRELESS SENSOR NETWORKS - Trådløse sensor nettverk

Hanssen Leif

FFI/RAPPORT-2006/04014

**WIRELESS SENSOR NETWORKS - Trådløse sensor
nettverk**

Hanssen Leif

FFI/RAPPORT-2006/04014

FORSVARETS FORSKNINGSINSTITUTT
Norwegian Defence Research Establishment
Postboks 25, 2027 Kjeller, Norge

P O BOX 25
 NO-2027 KJELLER, NORWAY
REPORT DOCUMENTATION PAGE

SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE
 (when data entered)

| | | |
|---|---|--------------------------|
| 1) PUBL/REPORT NUMBER FFI/RAPPORT-2006/04014 | 2) SECURITY CLASSIFICATION UNCLASSIFIED | 3) NUMBER OF PAGES 24 |
| 1a) PROJECT REFERENCE FFI-II/869/913 | 2a) DECLASSIFICATION/DOWNGRADING SCHEDULE - | |
| 4) TITLE WIRELESS SENSOR NETWORKS - Trådløse sensor nettverk WIRELESS SENSOR NETWORKS | | |
| 5) NAMES OF AUTHOR(S) IN FULL (surname first) Hanssen Leif | | |
| 6) DISTRIBUTION STATEMENT Approved for public release. Distribution unlimited. (Offentlig tilgjengelig) | | |
| 7) INDEXING TERMS IN ENGLISH: | | |
| a) <u>Wireless Sensor Networks</u> | IN NORWEGIAN: | |
| b) <u>Short range radio</u> | a) <u>Trådløse sensorsystem</u> | |
| c) <u>Ad hoc Network</u> | b) <u>Kortholdsradio</u> | |
| d) <u>Intrusion detection</u> | c) <u>Ad hoc nettverk</u> | |
| e) <u>Area surveillance</u> | d) <u>Deteksjon av inntrenger</u> | |
| | e) <u>Områdeovervåkning</u> | |
| THESAURUS REFERENCE: | | |
| 8) ABSTRACT This report gives a brief overview of Wireless Sensor Networks and the status of this technology. WSN is a new and promising technology that shows a great potential for the armed forces. Only a limited effort in the NbF-Grid project was put in this activity, and the goal was to make a snapshot of the WSN technology to find how mature it was. This was done by making a demonstration of a wireless sensor network with 55 nodes. To do this, methods for networking with routing was implemented. A graphical interface that controlled the network and viewed the measurement results was also developed. The experiment showed that a lot of the basic functionality of such networks is available but there still is a lot of research and development to do in the area. We might expect to see the first use of WSN during the next five year period. | | |
| 9) DATE 2006-12-18 | AUTHORIZED BY This page only Vidar S Andersen | POSITION Director |

ISBN 978-82-464-1178-1

UNCLASSIFIED

SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE
 (when data entered)

INNHOLD

| | Side | |
|-------|--|----|
| 1 | NYE TEKNOLOGISKE MULIGHETER | 7 |
| 2 | EN VIKTIG NY TEKNOLOGI | 8 |
| 3 | HVA ER WIRELESS SENSOR NETWORKS? | 9 |
| 3.1 | WSN node | 9 |
| 3.2 | Nettverk | 12 |
| 3.2.1 | Tjenestekvalitet | 14 |
| 3.2.2 | Applikasjonslag | 14 |
| 4 | NETTVERKSTEKNOLOGI PÅ MIKRONIVÅ | 15 |
| 5 | MULIGE ANVENDELSER I FORSVARET | 16 |
| 6 | DEMONSTRASJON, ET PRAKTISK FORSØK | 17 |
| 6.1 | Demonstrasjon 1. Deteksjon og følging av person | 20 |
| 6.2 | Demonstrasjon 2. Deteksjon og følging av flygende objekt | 21 |
| 7 | KONKLUSJON | 22 |
| | Litteratur | 24 |

WIRELESS SENSOR NETWORKS - Trådløse sensor nettverk

1 NYE TEKNOLOGISKE MULIGHETER

Den store motoren i den rivende teknologiske utviklingen vi har sett de siste tiårene er mikroelektronikk. Tempoet i denne utviklingen er beskrevet med Moore's lov som sier at antall transistorer integrert på en enkelt brikke fordobles hver attende måned. Når en slik utvikling fortsetter over en lang tidsperiode blir det veldig store tall av det. Over en periode på 15 år blir det en tusendobling. Det betyr at når man i 1990 snakket om en million transistorer, snakker man om en milliard i 2005 og en billion (10^{12}) i 2020. Dette gir enorme muligheter for ny teknologi med anvendelser som man knapt kan forestille seg i dag. Uten noen sammenligning forøvrig så regner man i dag med at menneskehjernen består av ca 55 milliarder hjerneceller.

Utviklingen innenfor mikroelektronikk har ikke bare hatt betydning for elektronikk som sådan, men har påvirket alle samfunnsområder. Det er umulig å tenke seg et moderne samfunn eller et moderne forsvar uten utstrakt bruk av datateknologi og kommunikasjonsteknologi. I det moderne forsvar ser en at elektronikk har blitt mye viktigere enn stål og krutt. Et nettverksbasert forsvar må bygges på mange billioner transistorer og en forutsetning for å få til dette er at prisen per transistor er lav nok.

Innenfor mikroelektronikk har flere produksjonsteknologier vært utprøvd. Men det er CMOS som etter hvert har blitt dominerende. CMOS ble den vanligste teknologien fra tidlig på åttitallet. Årsaken til dens popularitet var to viktige egenskaper, lav produksjonspris og lavt effektforbruk. Tidlig på åttitallet var typisk ledningsbredde i CMOS rundt 5 mikrometer. Denne er nå redusert til 60-90 nanometer. Dette har gjort at flere transistorer kan pakkes inn på samme areal, med en ytterligere reduksjon i pris og effektforbruk som resultat. Men med svært liten linjebredde har CMOS fått en ny og viktig egenskap, høyfrekvensegenskaper. Det vil si at CMOS er blitt anvendelig for frekvenser i GHz området.

Innen forskning og utvikling i mikroelektronikk de siste 15-20 årene har det vært et sterkt fokus på CMOS for analoge og radio anvendelser. Da CMOS i utgangspunktet har veldig gode egenskaper når det gjelder digitale funksjoner betyr det at med integrasjon av logikk, analog elektronikk og kommunikasjonsradioer kan man snakke om komplett systemer på en brikke (System on a Chip, SoC).

Når prisen for en million transistorer blir lavere enn prisen for en hamburger åpner det seg helt nye teknologiske muligheter. Trådløse sensornettverk, Wireless Sensor Network (WSN) er en slik ny teknologisk mulighet.

2 EN VIKTIG NY TEKNOLOGI

Trådløse sensornettverk vil gi store muligheter for registrering og overvåkning innenfor mange vitale områder som industriproduksjon, sikkerhet og miljøovervåkning. Men det er forsvarsindustrien og forskningsinstitutter og universiteter som jobber for de forskjellige lands forsvar som har vært pådrivere i den første fasen av utviklingen. Årsaken til dette er at det er forsvaret som har det mest umiddelbare behovet. Derfor har en teknologi, som på mange måter er en generisk nettverksteknologi, fått et veldig anvendelsesorientert navn, Wireless Sensor Networks.

Analysebyråer som overvåker den teknologiske utviklingen påstår at WSN vil være en av de mest betydningsfulle nye teknologier. Bladet Business Week (www.businessweek.com) har rangert WSN blant de 21 viktigste teknologiene for dette århundret. I en oversikt i Technology Review over 10 kommende teknologier som vil forandre verden ble WSN nevnt som en av de mest lovende. Markedspotensialet er også betydelig. I følge KeepMedia (www.keepmedia.com) ble over 1 million sensornoder satt ut i 2005. Markedsanalyse selskapet On World (www.onworld.com) har estimert at 168 millioner sensornoder vil være deployert innen 2010 og at markedet da vil være verd nærmere 6 milliarder dollar. ABI Research (www.abiresearch.com) ga i april 2006 ut en rapport om WSN kalt "A Fragmented Market With Great Potential", der de sier at gjennombruddet for WSN i markedet forventes å komme i 2007. Allerede i dag kan en se tegn til vekst i fragmenter av markedet. Men fremdeles er det utviklingsarbeid som gjenstår før felles standarder er ferdige.

Et tegn på at markedet begynner å røre på seg er at flere store aktører og leverandører går inn og satser på markedet. Texas Instruments har pekt ut WSN som er satsningsområde og har utviklet mange kretser for slike anvendelser. En annen stor elektronikkleverandør, Intel, har lagt ned betydelig forskning innenfor dette feltet. I en presentasjon av forskning hos Intel "Instrumenting the world. An introduction to Wireless Sensor Networks", kommer de med følgende kraftsalve: "As sensor network technology emerges from research laboratories, the ability to instrument the world is likely to transform every facet of our lives". (1)

Det vil alltid være en stor usikkerhet med hensyn på slike tall når en skal forsøke å se langt inn i framtiden, men det er liten grunn til å tvile på at de har rett når de påstår at WSN vil være en av de viktigste teknologiene i det neste tiåret. Det er heller ingen tvil om at WSN har stor anvendelse i det sivile markedet. Dette er en fordel for Forsvaret da det sivile markedet vil betale for mye av utviklingen av den grunnleggende teknologien. Forsvarets oppgave vil være å monitorere denne utviklingen og sørge for at de tilpasninger som trengs for militære anvendelser skjer. Dette må ikke misforstås slik at dette blir en enkel oppgave for Forsvaret da det er de militære anvendelsene som er mest avanserte og krevende og som vil være med å flytte grensene for teknologien.

3 HVA ER WIRELESS SENSOR NETWORKS?

WSN er ikke som en kunne tro, sensorer tilkoblet et datanettverk, men en helt ny måte å tenke sensorer på. Intel har i sin presentasjon av sin forskning på området formulert dette slik: ”Applying advanced networking technology to mass-produced wireless sensors yields a new kind of instrument. The network literally becomes the sensor”. Det betyr at selve datanettverket blir sensoren og at nettverksteknologien blir en hovedsak. Linken mellom nodene består av moderne radiokretser utviklet for ISM-båndene. Dette er et utviklingsløp som går uavhengig av WSN. Tilsvarende er det for sensor- og detektor-elementer. Utviklingen innenfor WSN vil da være bestemt av den regnekapasiteten som finnes i nodene og de algoritmer som utvikles for håndtering, styring og kontroll av nettverk.

Trådløse sensornettverk har i prinsipp mye til felles med vanlige trådløse datanettverk og kunne dermed ha brukt algoritmer derfra. Men da regnekraften er betydelig mindre må det utvikles egne og mindre ressurskrevende algoritmer for sensornettverk. Disse må da bli mindre generelle enn vanlige datanettverk og spesielt tilpasset det trafikkmønsteret som er på sensornettverk.

Wireless Sensor Networks har sitt navn fra den første anvendelsen av denne teknologien utviklet av militæret, overvåking av slagmark (Battlefield Monitoring). Under dette arbeidet har det blitt utviklet en teknologi som har en mye bredere anvendelse. Derfor kan navnet Wireless Sensor Networks være noe misvisende for denne teknologien.

3.1 WSN node

For at et WSN skal kunne gi en interessant ytelse og fungere for praktiske formål må den enkelte node kunne oppfylle en del betingelser med hensyn på ytelse.

- Lav pris
- Lite volum, lav vekt
- Lavt effektforbruk
- Regnekraft
- Radiorekkevidde
- Datarate
- Sensorer, detektorer

Siden det er underforstått at antallet noder i nettverket er stort betyr pris per node mye. I enkelte tidlige omtaler av WSN brukes et mål på 1\$ per node. Dette er svært lavt og kanskje både urealistisk og unødvendig lavt. For integrerte kretser som mikrokontrollere er det en tendens til at prisen flater ut ved 3-5\$. I stedet for å presse prisen ytterligere økes ytelsen på prosessoren. Det samme gjelder ikke for radiokretser. Når radiospesifikasjonen er nådd vil videre utvikling være rettet mot lavere pris og bedre ytelse med hensyn på effektforbruk. Hvis en sier en cirka pris på 1\$ for batterier, 3\$ for mikrokontrolleren, 3\$ for radioen og 3\$ for sensoren vil totalprisen for noden bli 10\$. Dette er en akseptabel pris for å bygge et nettverk med et høyt

antall noder. Det vil da være utviklingen i markedet som avgjør hvilket nivå nodeprisen stabiliserer seg på. Denne utviklingen er ikke kommet i gang i 2006/2007. Det er også altfor tidlig å si eksakt hvilken funksjonalitet som vil ligge i den enkelte node. I ZigBee (2) er det for eksempel definert to typer noder, FFD (Full Functional Device) og RFD (Reduced Functional Device) der RFD er tenkt å ha en redusert rolle i nettverket. Det er ennå ikke bevist at det er noe marked for RFD-noder. Den tekniske forskjellen på de to typer noder er på mikrokontrolleren. RFD-noder kan klare seg med en enklere mikrokontroller. Det kan være at det totalt sett vil være billigere å operere med bare en type node.

Volum og vekt er mindre kritiske parametere. Det er kun for rent praktiske formål at dette har betydning. Det er enklere å håndtere et stort antall noder hvis hver node er lett og liten. Hvis et stort antall noder skal slippes fra fly eller helikopter kan volum og vekt være begrensende for antall noder som kan tas med i et enkelt slipp.

Effektforbruk er en av de mest kritiske parametrene hvor det foreløpig gjenstår mest arbeid før effektforbruket er nede på et tilstrekkelig lavt nivå. I mange anvendelser skal det ikke være noe vedlikehold av den enkelte node etter at den er sluppet. Det betyr at noden slippes med en begrenset mengde energi og når denne er brukt opp, er noden død og kan regnes som søppel. Det betyr at levetiden på noden er direkte avhengig av effektforbruket. En veldig vanlig batteriutrustning for en node i dag er to AA eller to AAA batterier. Dette er billige batterier med veldig god tilgjengelighet. Med de radioløsninger som er tilgjengelig i dag vil et slikt batteripar være utbrukt i løpet av få dager. Det er hvis noden er aktiv hele tiden. For å øke levetiden på noden må det implementeres diverse sovemodi. Den funksjonen som drar mest energi er radioen. Ved å deaktivere radioen reduseres strømforbruket med over 90%. Men da vil også noden være ute av nettverket. Ved i tillegg å deaktivere mikrokontrolleren slik at kun sanntidsklokka (RTC, Real Time Clock) er aktiv kan det totale effektforbruket reduseres med over 99%. Noden vil i denne modus heller ikke kunne gjøre målinger eller beregninger. Den vil kun vite tiden slik at den kan aktivisere seg selv ved et gitt tidspunkt. For at et nettverk skal kunne fungere tilfredsstillende med utstrakt bruk av sovemodus må nodene tidssynkroniseres slik at de kan sove og være aktiv på samme tidspunkt. De fleste metoder for å redusere effektforbruk, det vil si øke levetiden på nettverket er basert på tidssynkronisering og sovemodus.

Regnekraft er avgjørende for når WSN får sin store utbredelse. Høy regnekraft er nødvendig for å utføre all den funksjonalitet som ligger i et nettverk. Dessuten må noden kunne gjøre fysiske målinger med tilstrekkelig nøyaktighet. Regnekraft er en parameter som tiden vil løse ved hjelp av Moors's lov. Regnekraft i WSN vil alltid utføres av en mikrokontroller. Dette er en enklere mikroprosessor med innebygd programmerbar input/output. For anvendelse i WSN er effektforbruk viktig. Det begrenser bruken til de mikrokontrollere hvor lavt effektforbruk er prioritert. Det utelukker de kraftigste mikrokontrollerne som brukes i PDA og mobiltelefoner. Likevel finnes det mikrokontrollere i 2006 med en regnekraft tilsvarende første generasjon PCer og med et strømforbruk i størrelsesorden 1mA. Under regnekraft kan en også ta med datakonvertering (A/D og D/A) og hukommelse. De fleste mikrokontrollere har i dag innebygd

A/D og D/A konvertere på 10-12 bit med en samplingsfrekvens på over 100kHz. Dette er tilstrekkelig for mange sensorer og detektorer slik at det ikke trengs eksterne datakonverter. Den innebygde hukommelsen i mikrokontrolleren som typisk er noen få kB kan i noen tilfeller være for begrenset. Dette vil i praksis aldri være noe problem. Ekstern hukommelse er veldig billig og enkelt å koble opp mot mikrokontrolleren.

Med den regnekraften som er tilgjengelig i dag (2006) er det mulig å gjøre enkel signalbehandling på målte data. Men regnekraften er ikke tilstrekkelig til å gjøre avanserte analyser som for eksempel gjenkjenning. I noen publikasjoner opererer de med tenkte tilfeller der en node gjør lydopptak og analyserer dette og finner hvilken type kjøretøy det er. Meldingen som sendes fra noden sier at det er registrert et kjøretøy av bestemt type ved et gitt tidspunkt. Den lokale regnekraften vil være begrensende for nøyaktigheten på dette.

Ved spredning av nodene vil det være et kompromiss mellom nodeavstand og radiorekkevidde. Det er viktig at nodene når hverandre men det er ikke ønskelig at en enkelt node får for mange nabonoder. Dette er vanskelig å styre i praksis da radiorekkevidden er veldig avhengig av terrenget der noden faller. Typisk rekkevidde på de radioene som er aktuelle i slike nettverk er 10-100m. Variasjonen og usikkerheten ved slipp fra lufta er så stor at en i prinsipp har minimal styring med dette. Ulempen med veldig stor tetthet er at dataraten blir kraftig redusert hvis mange radioer må dele på en frekvens. Hvis radiorekkevidden er mye mindre enn rekkevidden på sensoren vil det også bli stor redundans i måldataene. En måte å regulere dette på er å la noen noder i nettverket gå i langvarig dvale. Disse vil da legges i dyp søvn inntil noen av nabonodene har brukt opp sine batterier. De vil da kunne vekkes opp og overta rollen til sine døende naboer.

For en enkelt radiolink vil dataraten variere fra 250kbps for 2,4GHz radioer til 20kbps for 868MHz radier. Hvis det er mange noder innenfor en radiorekkevidde må denne dataraten deles på disse. Med CSMA-CA er det ikke mulig å utnytte hele kapasiteten. For et nettverk vil det også brukes en del av dataraten til å administrere nettverket. Det betyr at for en radiolink på kun 20kbps vil det kun være mulig å kjøre et nettverk med helt korte og sjeldne meldinger. For 250kbps er det betydelig bedre. Men for å finne eksakt hva en kan forvente av nyttetraffic over et større nettverk må det kjøres beregninger og simuleringer. Det er ikke gjort under de korte tidsrammene som denne aktiviteten har hatt i NbF-Grid prosjektet.

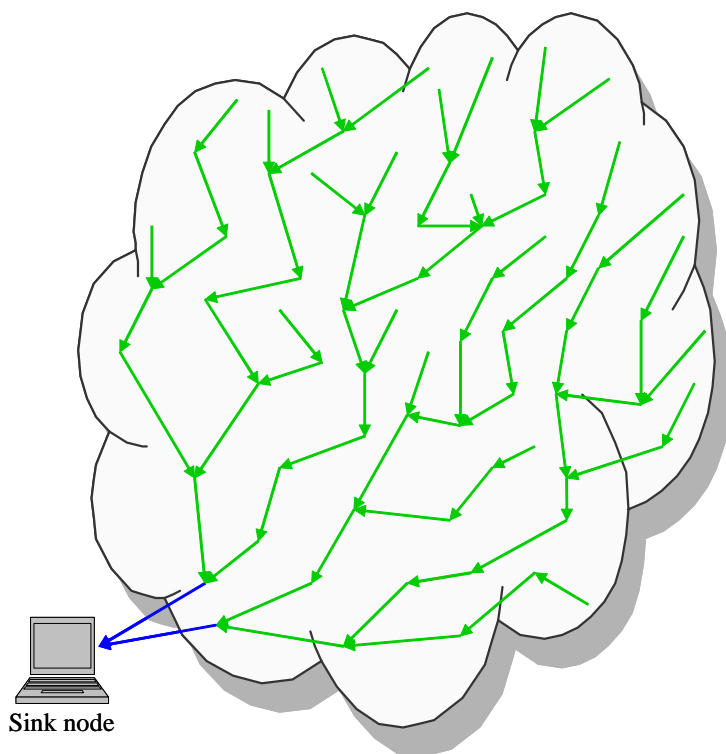
Utviklingen av nye sensorer og detektorer er et løp som går helt uavhengig av WSN. Med nanoteknologi og MEMS er dette et område hvor en forventer at det vil komme mange nye muligheter i årene som kommer. Dette vil være gunstig for WSN der kravene til størrelse og effektforbruk er strenge. For eksempel innenfor deteksjon av gasser finnes det i dag en del sensorer som er basert på bruk av varmeelement som varmer opp gasser til flere hundre grader. Dette er altfor effektkrevenende til å brukes i WSN.

Spredningsavstanden mellom nodene vil være avhengig av hvilket fysisk fenomen som skal måles. Dette blir et kompromiss i forhold til radiorekkevidde. Med hensyn på radiorekkevidde

er det ønskelig at nodene plasseres så nærme hverandre at alle kan tilknyttes nettverket, men samtidig at de ikke kommer så nærme at de reduserer dataraten i nettverket for mye. Tilsvarende er det for sensorer. En ønsker at nodene plasseres nære nok til at en får med alle frekvenser over arealet som måles, samtidig som mengden redundant informasjon holdes lavt. Dette vil være spesielt vanskelig å oppnå for de nettverk som har flere forskjellige typer sensorer.

3.2 Nettverk

Nettverket i WSN er veldig forskjellig fra vanlig datanettverk basert på IP. En OSI liknende lagdelingen er naturlig å bruke da fysisk lag og data link lag kan ha mye til felles med for eksempel IEEE 802.11. Men det brukes ikke en TCP/IP tankegang for ruting og transport i WSN. Årsaken er at den grunnleggende strukturen i stor grad er gitt av anvendelsen. Dette er vist i Figur 3.1. Trafikkflyten blir en form for omvendt multicasting ved at dataene går fra alle sensornodene mot en node i kanten av nettverket kalt sink node.



Figur 3.1 Sensornettverk med sinknode

Det er ikke lagt opp til at det skal være punkt-til-punkt trafikk mellom vilkårlige noder i nettverket. Da er det heller ingen grunn til å legge inn funksjonalitet som gjør dette mulig. Det har vært en del forslag til algoritmer som er enkle å implementere og som skal løse dette. Men det som regnes som et paradigmeskifte med hensyn på metoder for ruting er metoden kalt "Directed Diffusion" (3)(4). Siden denne regnes som grunnleggende for WSN og den gir et veldig godt bilde av problemstillingen i forbindelse med ruting i WSN vil den bli presentert nærmere her.

Trafikken i et slikt nettverk består av meldinger. Det er lite snakk om å sette opp kontinuerlige dataflyter eller datastreaming av for eksempel audio eller videosignaler. Det er to meldingstyper som brukes. Interessemeldinger brukes for å bestille målinger, og målingsmeldinger brukes for å rapportere målinger. De to meldingstypene går hver sin retning i nettverket. Interessemålinger går fra sink og utover, mens målemeldinger går innover til sink noden. Det er sink noden som er initiativtaker for målinger. Den starter med å sende ut en interessemelding som spesifiserer hvilken type målinger den ønsker, hvor ofte og hvor lenge den ønsker målinger. Den enkelte node som mottar en slik melding må respondere til meldingen ved å utføre måling, men også videresende interessemeldingen inn i nettverket. Når interessemeldingen spres i nettverket vet den enkelte node kun hvilken node den har fått meldingen fra. Den vet ikke den totale veien tilbake til sink noden. Men det trenger den heller ikke vite. Når en node mottar en interessemelding setter den opp en peker til den noden den har fått interessemeldingen fra. Dette blir en gradient mot sinken som sier hvilken retning målingene skal sendes. Den enkelte node kan da starte målinger og sende disse dit gradienten peker, i retning sink noden. Målingen av samme type som den mottar fra nabonodene sendes videre til sink noden. Det kan ligge en svakhet i denne metoden. Veien for målingsmeldingen mot sink noden kan bli langt fra optimal. For å spare batterier, minimalisere effektforbruk, er det ønskelig å minimalisere antall hopp fra målenoden til sink noden. Med en enkel spredning av interessemeldinger er det ingen mekanisme for å minimalisere veilengde eller for å unngå løkker i veien til sink noden. I (4) foreslås dette løst med en metode kalt *Reinforcement*, forsterkning. Slik algoritmen er beskrevet ovenfor vil alle stier til sink lages, uansett kostnad og inkludert løkker. Reinforcement brukes for å gi de forskjellige stiene forskjellige prioriteringer slik at mest mulig trafikk kommer fram med minst mulig overhead. Reinforcement kontrolleres fra sinken ved at den først sender en interessemelding med et intervall som er sjeldnere enn det ønskede, og at den siden gjentar den samme interessemeldingen, men med kortere intervall. Hver node som mottar en interessemelding med kortere intervall bruker datacachen for å bestemme hvilken av nodene som er neste hopp som skal forsterkes, og videresender interessemeldingen bare til den. Kriterier som kan brukes for å prioritere nodene er f eks hvilken node som oftest er den første som sender en melding. Timeout nevnes som en måte å få de uaktuelle veiene til å dø. Et alternativ ville vært å sende melding med lengre intervall til nodene som er mindre aktuelle. Artikkelen er ikke helt klar på hvordan interessemeldingene sendes, men broadcasting gir ikke mulighet for å spesifisere hvilke noder meldingene skal sende mot eller garantere at de når fram. Ulempen med unicasting er at det ikke gir mulighet for å oppdage nye noder, og at det må sendes mange flere meldinger. Dermed må den ha en annen måte å oppdage naboer på. En mulighet for forbedring som nevnes i artikkelen er å bruke noen av de mellomliggende nodene istedenfor bare sinken til å generere interessemeldinger for å få til automatisk reparering av nettverket.

Det som gjør Directed Diffusion spesielt interessant er en standard tenkemåte for strukturen i WSN. Det er en node utenfor selve nettverket, sink, som styrer selve måleprosessen ved å starte og avslutte målingen. Det er to typer meldinger og ruting gjøres ved å følge gradienter. Det er ikke mulig å sende meldinger fra punkt til punkt i nettverket og det er heller ingen definisjon av stier for ruting gjennom nettverket.

De resultater som er publisert om Directed Diffusion baserer seg på simuleringer og ikke praktiske implementasjoner i store nettverk.

3.2.1 Tjenestekvalitet

Tjenestekvalitet er blitt et veldig viktig tema i vanlige datanettverk. Bakgrunnen for dette er en antakelse om at datamengden en ønsker å sende over nettverket er større enn kapasiteten i det. Ved å differensiere på viktig og mindre viktig trafikk kan en sikre at viktig trafikk i større grad kommer fram. Med begrenset kapasitet hvor en andel pakkene i nettet går tapt vil implementasjon av tjenestekvalitet sikre at det er de pakkene i trafikken med lavest prioritet som går tapt.

I WSN er ikke tjenestekvalitet et sentralt tema ennå. Årsaken er at nettene er homogene. Det er ikke noe å differensiere på. I prinsipp kunne nettet respondere på et oppdrag fra sink noden ved å nekte å utføre det hvis det ikke er tilstrekkelig kapasitet til stede. Men siden initiativet til målingen ligger i sink noden må den også ha som begrensning at den ikke bestiller oppdrag fra nettverket som overbelaster det. Det betyr i praksis at den ikke kan bestille måleoppdrag som skal rapportere målinger for ofte. Hvis målinger må utføres ofte må sink noden begrense trafikken ved å bestille målinger fra et begrenset område i nettverket. Dette er det tatt høyde for i de fleste systemene som er foreslått.

3.2.2 Applikasjonslag

Hvis en bruker vanlig OSI lagdeling i WSN vil applikasjonslaget kun bestå av selve måleprosessen. Den andre viktige funksjonen i noden, relèing av pakker fra andre noder mot sink noden ligger i rute eller transportlaget. Med økende regnekapasitet kan oppgavene for noden bli flere. Det betyr at pakker som kommer inn til noden går opp til applikasjonslaget for analyse. Denne analysen kan være en form for datafusjon ved at noden bestemmer om den innkomne målingen tilfører ny informasjon til måleoppdraget. Et viktig resultat av en slik funksjon er en kraftig reduksjon av trafikken i nettet. Enten kan denne analysen ligge i veien mot sink node, ved at alle målinger oppstrøms på vei mot sink noden analyseres. Eventuelt kan enkelte noder få en koordinator rolle ved at de samler målinger fra de nærmeste naboene, analyserer disse og sender resultatet til sink noden. Dette er interessante problemstillinger som en kan forvente vil bli diskutert i de nærmeste årene. Men per i dag er ikke de grunnleggende problemstillingene rundt organisering av nettverk, ruting og transport løst, slik at det er vanskelig å vite hvor mye regne- og radio-kapasitet det er ledig til andre ting.

4 NETTVERKSTEKNOLOGI PÅ MIKRONIVÅ

I de siste ti årene har det vært en sterk utvikling på radiokretser for ISM-båndene. Det er 432MHz, 868/928MHz og i de siste årene også 2450MHz. I utgangspunktet er dette kretser som er tenkt for en enkel radiolink. Men med integrasjon av mikrokontroller på kretsene har disse fått utvidet bruksområde og utgjør i dag kjernen i WSN og den nye nettverksteknologien som i større grad er rettet mot det sivile markedet. Det er nå kommet en ny standard IEEE 802.15.4 for fysisk lag og data link laget. Det er også lagd et konsortium, ZigBee, som definerer en felles standard løsning for rutelaget. Dette er nettverksteknologi som er rettet mot andre typer anvendelser enn WSN opprinnelig var tiltenkt. Derfor er også strukturen forskjellig. I ZigBee er det ingen sink node da nettet egentlig ikke trenger noen vei ut av nettet. Slike nett opererer på egenhånd. Det betyr at en node i nettet må tildeles rollen som koordinator, en slags sjef, som tar initiativ til fordeling av ressurser på radiosiden. De vanligste topologiene er stjernetopologi, der all trafikk må innom koordinatoren, eller punkt-til-punkt topologi. IEEE 802.15.4 baserer seg på en superramme struktur, der koordinatoren sender ut en beacon i enden av ramma som de andre nodene kan synkronisere seg etter. Superamma er delt opp i 16 tidsslotter hvor de radioene som hører hverandre bruker CSMA-CA til å tilkjempe seg bruk av de 11 første slottene. De 5 siste kan koordinatoren tildele den enkelte node av. På den måten kan det bygges inn tjenestekvalitet i nettet. En fast tildeling av tidsslotter vil gi en garanti med hensyn på tidsforsinkelse da pakker ikke blir liggende i kø i en ubestemt tid i de enkelte nodene. For å sikre båndbredde må flere tidsslotter i en superramme tildeles samme node.

ZigBee retter seg i hovedsak mot styring av omgivelser i private hjem og i industrien. I markedsføringen av teknologien brukes ofte uttrykket ”Smarte omgivelser” eller ”Intelligente omgivelser”. Med det menes at når alle enheter med innebygd elektronikk i omgivelsen kan kommunisere seg i mellom vil omgivelsen kunne tilpasse seg menneskene i større grad enn omvendt, slik det er i dag. Et eksempel på dette er styring av varme og ventilasjon i en bolig. Her vil boligen tilpasse seg bruken, slik at dette er optimalt i forhold til hvem som er tilstede.

Wibree (www.wibree.com) er en ny standard under etablering med et spesielt fokus på ekstremt lavt effektforbruk. Dette er en teknologi som sikter mot et spesielt segment i markedet der enhetene som skal kobles opp via radio bruker minimale batterier, knappeceller. Wibree er heller ikke en nettverksteknologi men i større grad tenkt som en radiolink fra den batteridrevne enheten til en sentral. Dette er en teknologi som likner på Bluetooth men som er enklere og har mye lavere effektforbruk. Et typisk eksempel for anvendelse er idrettshjelpemidler som pulsklokke med radiooverføring fra hjertefrekvensmåler til armbandsur, og fra fartsmåler i skoen til armbandsur. Rekkevidden for Wibree er 0-10m og båndbredden er 1Mbps. Wibree er ikke tiltenkt bruk som streaming av data men korte meldinger. Det betyr at Wibree vil fungere som et supplement til Bluetooth og øke anvendelsen av kortholds piconett.

Både ZigBee og Wibree har egenskaper som kan gjøre dem interessante for Forsvaret.

5 MULIGE ANVENDELSER AV WSN I FORSVARET

WSN har sin opprinnelse i forsøk på å lage små, enkle og billige sensorer som skulle kobles sammen trådløst for overvåkning av slagmark eller militære leire. Dette er også den mest åpenbare anvendelsen. Det finnes i dag en del kommeriselle systemer for slik overvåkning. Eksempler på dette er UGS (Unattended Ground Sensors). Selv om disse er trådløse er det tvilsomt om en kan bruke WSN betegnelsen på dem. Noen av dem baserer seg på tidlige versjoner av ISM-radiokretser, mens andre bruker egenutviklede proprietære radioløsninger eller de radioløsningene som politi, brannvesen og ambulanser har brukt. De ser heller ikke ut til å bruke avanserte nettverksløsninger, men kun enkle radiohopp inn til en sentral. Men siden WSN har sitt utspring i UGS er det ikke unaturlig å forvente at neste generasjon UGS vil være WSN basert og med utvidede sensor muligheter. Med bedre nettverksteknologi vil det også kunne lages bedre situasjonsbilder over det overvåkede området. Et eksempel på dette er deteksjon av gass. Med et bilde som viser hvor gassen kommer inn og hvordan den utbreder seg kan en evakuere området på en bedre måte. Andre fordeler med WSN er lavere pris, lavere volum og lavere effektforbruk. Dessuten vil deployering være enklere da nettene er selvkonfigurerende.

Miner har tradisjonelt vært en mye brukt metode for å sikre en leir i et fiendtlig område. Dette er en metode med en høy politisk kostnad. En elektronisk erstatning vil ikke bare ha mindre menneskelige kostnader men også bedre funksjonalitet. En WSN-basert mineløsning er billigere og mer fleksibel ved at den enkelt kan fjernes når leiren forlates. En slik løsning er heller ikke detekterbar av en eventuell inntrenger. For en løsning basert på IEEE 802.15.4 radiokretser for 2,4GHz som bruker Direct Sequence Spread Spectrum vil det være svært vanskelig å avlytte radiokommunikasjonen i nettverket. Med den spredekoden som er definert i standarden vil kun avanserte inntrengere være i stand til dette. Med en proprietær spredekode og med et kryptert nett vil det være tilnærmet umulig å avlytte selv for den mest avanserte inntrenger, av type spesialstyrke. Selv den mest avanserte inntrengeren (spesialstyrker) vil være detektert uten at han selv er klar over det.

Et selvkonfigurerende nettverk som består av veldig små og lette enheter kan veldig enkelt etableres i et område som en ønsker å kartlegge. Deployeringen kan skje enten ved at nodene skytes inn i et område eller de slippes fra fly eller helikopter. Dette kan være små områder hvor en er usikker på om det er forsvarlig å sende inn personell. Nodene slippes i området, en sink node settes opp i kanten av området og sender interessemeldinger. Nettverket etableres og rapporterer målinger til sink noden. Området kan da kartlegges med hensyn på parametere gitt av hvilke sensorer nodene har. Med billige noder kan disse forlates som søppel når oppdraget er utført.

Nettverksteknologi på mikronivå som ZigBee gir mange nye muligheter. Et eksempel kan være en node i bevegelse som for eksempel en soldat. Denne vil ha en link tilbake til hovedkvarteret basert på tradisjonelle systemer. Samtidig vil soldaten bære med seg et sub-nett basert på ZigBee. Dette sub-nettet er koblet til linken hjemover, slik at alle enheter som han har med seg

er tilgjengelig fra hovedkvarteret. Typiske enheter som er tilknyttet via ZigBee eventuelt Wibree er våpensystem, sensorer/detektorer for analyse av omgivelser, sensorer/detektorer for analyse av fysiologiske tilstander hos soldaten samt system for posisjon/lokalisering for eksempel basert på GPS. Det betyr at en fra kommandosentralen har full oversikt over tilstanden til soldaten, hvor han befinner seg og i hvilken situasjon han befinner seg. Med god oversikt over området kan det gjøres en bedre risikovurdering slik at en soldat kan trekkes ut av et område hvis han ikke er utstyrt eller ikke er i en tilstand hvor han kan utføre sine oppgaver. Fordelene med slike selvkonfigurerende nettverk er at de kan etableres meget hurtig og at enheter kan legges inn og trekkes ut av nettverket uten at brukeren trenger å gjøre noe. Hvis en soldat skal ut på et oppdrag plukker han bare med seg de enheter han trenger uten å tenke på nettverket. Den samme tankegangen kan også brukes i større enheter som kjøretøy.

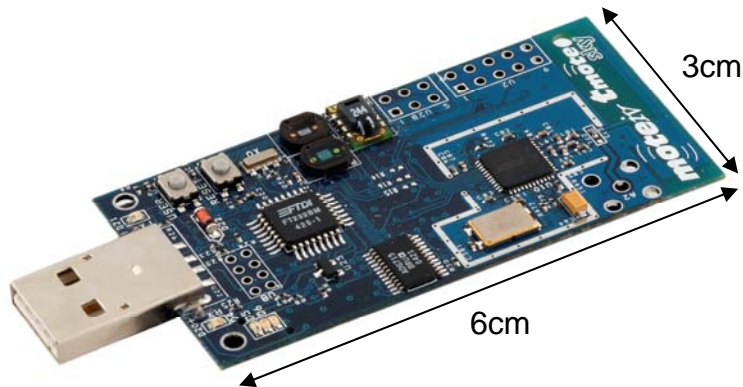
6 DEMONSTRASJON, ET PRAKTISK FORSØK

Sent høsten 2005 ble det bestemt at det skulle gjøres et forsøk på å bygge opp et lite sensornettverk og kjøre en demonstrasjon for noen nøkkelpersoner fra Forsvaret. Formålet med dette var todelt. For det første ønsket vi å se på modenheten av denne teknologien, hva som var mulig å få til og hvor store ressurser det ville kreve. For det andre ønsket vi å gi et bilde av hva denne teknologien kunne brukes til i Forsvaret. Et halvt års arbeidsinnsats ble satt av til dette, slik at demonstrasjon ble satt på timeplanen til slutten av mai 2006. Cirka et årsverk fra prosjekt 869 NbF-Grid ble avsatt til demonstrasjonen. I tillegg ble en person engasjert for å jobbe med implementasjon av programvare på selve noden. Og en hovedoppgave ble satt ut til Høyskolen i Oslo for utvikling av programvare for sink noden.

Wireless Sensor Networks finnes ikke som et kommersielt produkt. Mesteparten av det arbeidet som foregår innenfor området skjer på universiteter og forskningsmiljøer. Men det er en del firmaer som har utviklet og selger WSN-noder som kan brukes til test og eksperimentering. Vi valgte en node tMote Sky, Figur 6.1, fra firmaet MoteIV (www.moteiv.com). Dette er firma som har sitt utspring fra Berkley universitetet og WSN miljøet der. Begrunnelsen for valget var at dette er en meget moderne node som baserer seg på siste type IEEE 802.15.4 radiokretser fra ChipCon (www.chipcon.com) og ny mikrokontrollerfamilie fra Texas Instruments (www.ti.com) MSP430 som kombinerer høy ytelse med lavt effektforbruk. Noden har tre innebygde sensorer, temperatur, luftfuktighet og lyssensor. Nodene leveres med et utviklingsmiljø for programvareutvikling basert på operativsystemet tinyOS og programmeringsspråket nesC. Operativsystemet tinyOS (www.tinyos.net) er et open-source OS spesielt utviklet for WSN der det er lagt spesiell vekt minimalisering av kodestørrelse. Fordelen med OS kontra koding direkte, slik det ofte er vanlig i mikrokontroller baserte systemer, er at en er mer uavhengig av hardwareplattform. Med et godt implementert OS skal det være enkelt å bytte hardware eller mikrokontroller.

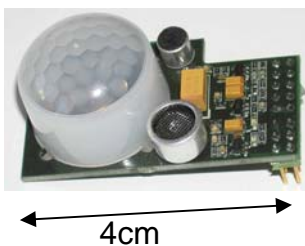
Programmeringsspråket nesC (<http://nescc.sourceforge.net>) er et moderne komponentbasert

språk som er en utvidelse av C spesielt utviklet for å inkorporere tinyOS (10). Programmer bygges opp av komponenter som kobles sammen ("wired"). Oppførselen til komponentene beskrives gjennom et sett av grensesnitt. Et grensesnitt vil enten tilbys funksjonalitet ut til andre brukere av komponenten eller innover til komponenten for at den skal kunne utføre en oppgave. Dette er veldig standard måte å gjøre ting på i komponentbaserte programmer. Kommandoer går innover eller nedover mot hardwaren, mens hendelser går utover eller oppover i programmet. Under utviklingen av tinyOS og nesC har det vært satt et mål på størrelse på hukommelsen som dette skal fungere for på 8kB for programmet og 512B RAM. Dette er veldig lavt og de fleste mikrokontrollere kan tilby betydelig mer hukommelse enn dette.



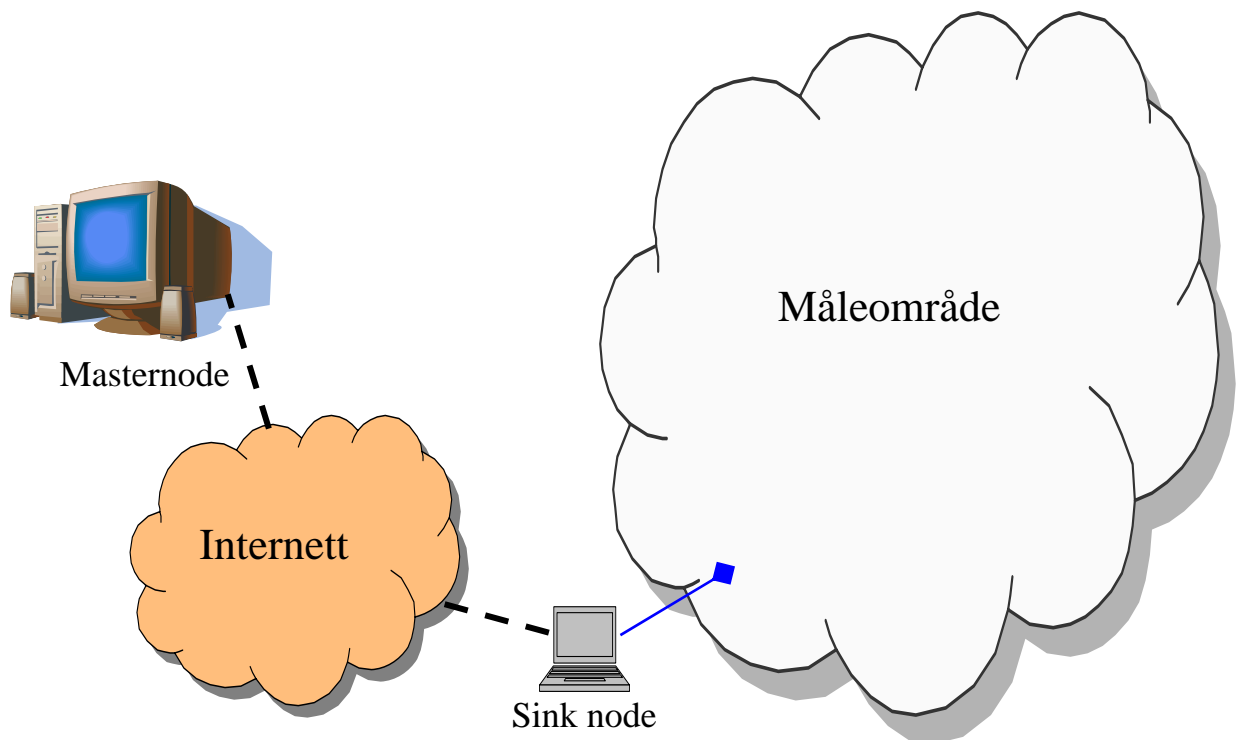
Figur 6.1 Sensornode

Noen av de viktigste nøkkeldata for noden er 250kbps datarate over radioen. Radiofrekvensen er 2,4GHz og maksimal sendeeffekt er 1mW. Rekkevidden på en slik radio vil være over 125m under gunstige forhold og ned under 10m under ugunstige forhold. Mikrokontrolleren har 10kB RAM og 48 kB Flash. I tillegg er det 1MB flash hukommelse på noden. Noden har innebygd tre sensorer som ikke egner seg spesielt godt til å demonstrere dynamiske hendelser i sanntid. Men mikrokontrolleren har innebygd en 12 bits ADC som kan lese av 8 forskjellige pinner via en analog multiplekser. Da denne er tilgjengelig via egne pinner på printkortet lagde vi et ekstra kort med tre sensorer som ble montert på hver node. Det var en mikrofon, en ultralydmottaker og en IR-basert bevegelsesdetektor. Lydnivå ble beregnet ved å beregne RMS-verdi for 64 sampler og deretter beregne gjennomsnittverdi for 32 slike bolker. En tilsvarende prosedyre ble brukt for ultralyd, men der var samplingsfrekvensen høyere. Bevegelsesdeteksjon er vanskeligere. Nivået ut fra detektoren ble samlet og samplingssekvensen ble derivert og kjørt gjennom en terskling. Dette for å unngå for stor følsomhet på detektoren.



Figur 6.2 Sensor påbygningskort

Da det ikke finnes noen ferdige standarder for ruting i slike systemer ble det utviklet en egen versjon basert på ideene om Directed Diffusion. Det som er publisert om Directed Diffusion er presentasjon av konsept, en del teoretiske betraktninger og noen simuleringer. Det fantes ikke ferdige implementasjoner, og for å gjøre demonstrasjonen måtte vi utvikle vår egen versjon. For etablering av nettverket ble det brukt en algoritme basert på flooding. Sink noden sender ut en broadcast av en *interestmelding* med en egen ID og en parameter som teller antall hopp. Alle noder som mottar denne meldingen sjekker om de allerede har mottatt meldingen eller om den har en kortere vei til sinknoden, det vil si færre antall hopp. Hvis meldingen er ny eller har en kortere vei vil noden sende meldingen videre som broadcast. I noden vil det være en peker (gradient) tilbake til den noden som meldingen er mottatt fra. Den enkelte node vet ikke veien tilbake til sinknoden, men bare retningen. Nettverket etableres ved hjelp av *interest* meldinger som spres gjennom nettet med broadcast og setter opp gradienter tilbake til sinknoden som gir veien som målemeldinger skal rutes. Den enkelte node vil da utføre de målinger i det antall og med det tidsintervall som er gitt i *interest* meldingen. Disse målemeldingene sendes til den noden som gradienten peker på med unicast. Her brukes acknowledge for å bekrefte at målemeldinger er kommet fram. Noden forsøker inntil tre ganger å sende meldingen før den gir opp. Siden nettverket settes opp ved hjelp av broadcast er det ingen mulighet for å sikre at meldinger kommer fram. Men i de testene som ble gjort med inntil 55 noder erfarte vi aldri at noder ikke ble etablert i nettverket.



Figur 6.3 Oppkobling

I måleoppstillingen, Figur 6.3, er sinknoden plassert i kanten av måleområdet. Sinknoden er en PC med en sensornode tilkoblet, og har kobling videre inn til Internett. Her er det tegnet

Internett, men det kan like gjerne være en radiolinje over til Masternoden. Sinknoden fungerer bare som en port (gateway) mellom sensornettverket og Internett. På masternoden kjøres et program med et grafisk grensesnitt som viser plasseringen av nodene og måleverdiene på den enkelte node. Dette kan like gjerne kjøres på sinknoden, men med Internett kan masternoden plasseres hvor som helst. Det er ingen strenge krav til båndbredde mellom sink noden og masternoden. Flaskehalsen her vil som oftest være det siste radiohoppet inn til den sensornoden som er tilknyttet sinknoden.

Programvaren på Masternode er utviklet av en gruppe på tre studenter ved Høyskolen i Oslo. De fikk i oppgave å lage et grafisk grensesnitt for å sende bestillinger av målinger til nettverket og å gjøre en visualisering av målingene som nettverket rapporterer tilbake. Dette er gjort ved at posisjonen til den enkelte sensornode blir x og y dimensjonen i det grafiske bildet. Z dimensjonen, som er målt verdi visualiseres med bruk av farge. Blå betyr lav målt verdi, mens økende verdi er angitt ved at fargen går over i grønn, gul og mot rød. Fordelingen av måleverdi mellom nodene er beregnet ved at måleverdien i et punkt er vektet med avstanden til punktet. Måleverdien i et punkt i det grafiske bildet er summen av vektene fra nodene rundt punktet.

6.1 Demonstrasjon 1. Deteksjon og følging av person



Figur 6.4 Deteksjon og følging av person

I første demonstrasjon ble 25 noder plassert rundt omkring i en plasthall, før en soldat ble sendt inn. Målet med forsøket var å registrere soldaten og bevegelsen hans. Fra Masternoden ble det bestilt en måling av bevegelsesdetektor per sekund. Med så få noder og med så kort avstand mellom dem ble det mange enkelt hopp til sinknoden. Belastningen på nettverket er likevel lav. Typisk meldingslengde er 100b, og med 25 noder som sender en melding per sekund blir det

bare 2500bps. Den radioløsningen som er brukt har en datarate på 250kbps. Med mange radioer på luften samtidig er det ikke mulig å utnytte denne kapasiteten 100 prosent. Med CSMA-CA kan utnyttelsesgraden ligge på cirka 40 prosent. Det betyr at med en måling per sekund og bare 25 noder, er bare 2,5 prosent av dataraten på det trådløse nettverket benyttet.

Forsøket viste at med den nodetettheten som ble brukt, mindre enn 10 meter mellom hver node, var det ingen problemer å følge soldatens bevegelse i plasthallen meter for meter. Et slikt sensornettverk vil kunne gi en meget nøyaktig bilde av antall personer i området, posisjonen til disse og hvordan de beveger seg. Som man også ser av fotografiet fra plasthallen er det helt umulig å se de små sensornodene som er lagt tilfeldig utover. På grunn av den lille størrelsen på nodene vil de også være vanskelig å se for fiendtlig personell som beveger seg inn i det overvåkede området.

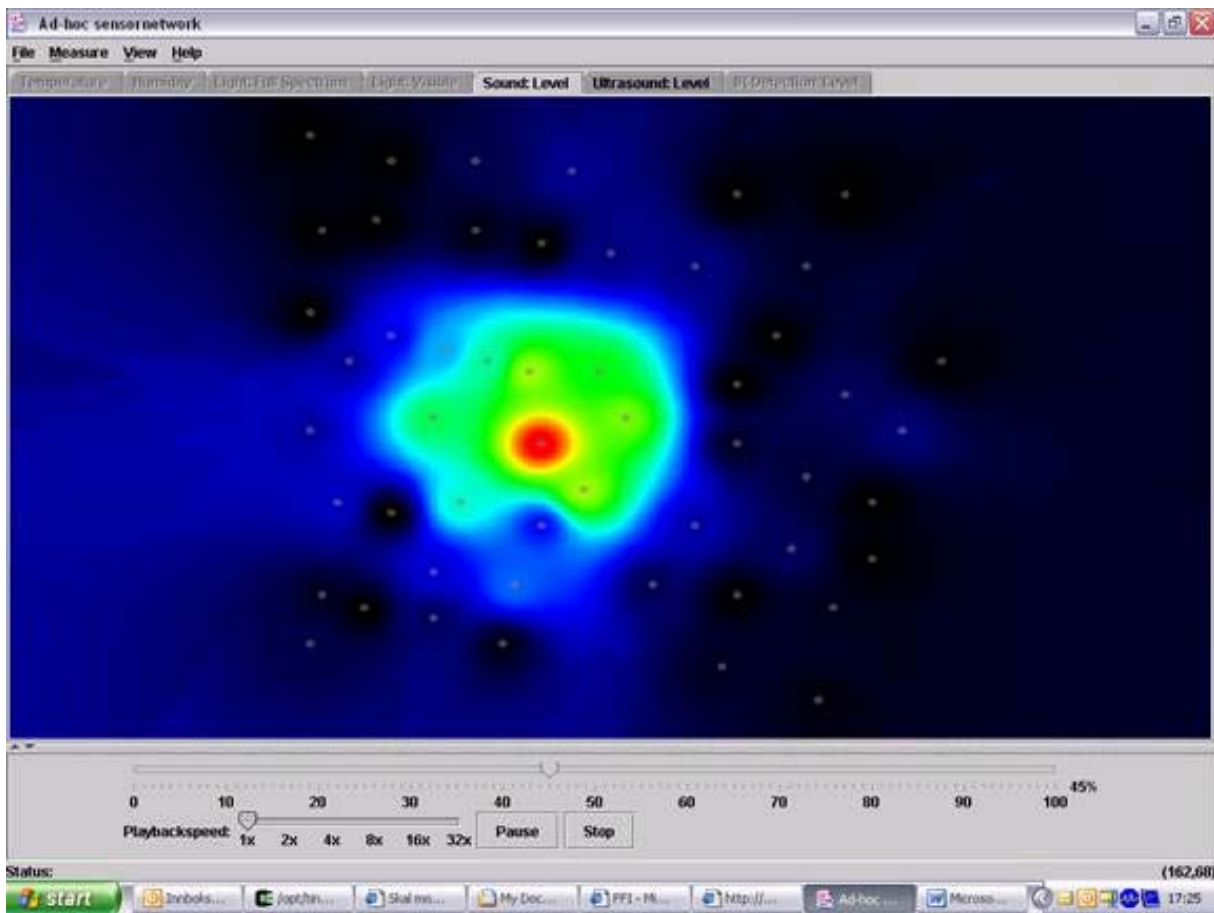
6.2 Demonstrasjon 2. Deteksjon og følgning av flygende objekt



Figur 6.5 Målfølgning av flygende objekt med analyse av lydnivå

Det andre forsøket ble gjort utendørs ved at 55 sensornoder ble plassert utover et jorde innenfor gjerdet på FFI. Avstanden mellom nodene var 10-15 meter med et totalt areal på området på cirka 8000 m². I demonstrasjonen var det ønskelig at nodene skulle være synlige og at de skulle være lett å finne igjen når forsøket var over, derfor ble de plassert på små pinner ca 15cm over bakken. Sinknoden ble plassert i utkanten av testområdet med Ethernet kobling til Masternoden som stod inne på Battle Lab på FFI. Fra Masternode ble det bestilt to målinger per sekund av effektivt lydnivå fra hver node. Selv med 55 noder hvor veldig mange er innenfor radiorekkevidde av hverandre, og med to målinger per sekund ligger trafikkmengden godt innenfor grensen for radioene.

Objektet som skulle følges var et modellhelikopter. Dette ble operert av en profesjonell modellhelikopterflyger. Med to målinger per sekund fra hver node var det ingen problemer å følge helikopteret selv ved hurtige manøvrer. Et modellhelikopter er et av de mest krevende objekter å følge da det har høy akselerasjon, høy hastighet og beveger seg i tre dimensjoner. I Figur 6.6 er vist skjermbildet fra Masternoden. Her vises lydnivået i området. Intens rødfarge betyr at helikopteret er forholdsvis lavt over den noden. De lyse prikkene er andre noder i området. Som en ser av figuren er lydnivået lavere i noder som er lengre ut til siden i forhold til posisjonen til helikopteret.



Figur 6.6 Skjermbilde Masternode

7 KONKLUSJON

I forskningsmiljøet brukes ofte uttrykket teknologisk revolusjon om den underliggende teknologien som WSN baserer seg på. Elektronikk utviklet for mobiltelefoni og tankegang fra nettverk slås sammen til en ny teknologi som gir nettverksteknologi på mikronivå. Det betyr at alle enheter som inneholder elektronikk kan kobles til et nettverk. Revolusjon er et kraftig uttrykk som ofte misbrukes. Men, etter det lille arbeidet som er gjort på FFI, ser vi tydelig at dette er en teknologi som vil få veldig stor betydning. Foreløpig er det vanskelig å si hvor den vil få sin anvendelse. I sivil sektor ser en at flere store internasjonale aktører som for eksempel

Texas Instruments, posisjonerer seg for dette markedet som forventes å bli svært stort. I militær sammenheng er det enda uklart i hvilke områder anvendelsen av denne teknologien vil få størst betydning. Men siden WSN er den anvendelsen som har vært drivkraften for den underliggende teknologien og regnes som en typisk militær eller sikkerhetsanvendelse er det nærliggende å regne forsvaret som en viktig bruker.

I prosjekt 869 NbF-Grid, har det vært gjort en stikkprøve av WSN-teknologien. Det har vært lagt inn en veldig liten innsats der formålet har vært å gjøre en enkel test av modenheten av teknologien. Gjennom det praktiske forsøket har vi vært nødt til å finne hvor langt forskningen er kommet og hvor langt det eventuelt er kommet med kommersialisering. Som konklusjon ser vi at WSN er i ferd med å komme over den første terskelen, der spørsmålet er hvorvidt dette er en teknologi som har framtiden for seg og som virkelig vil ta av.

Et området med egen standard (IEEE 802.15.4) og stor brukergruppe (ZigBee) retter seg mot sivile anvendelser som styring av lys, varme og inn klima i private hjem. Dette har for tiden stor oppmerksomhet og de som satser innenfor ZigBee er svært optimistiske. Likevel finnes det betydelig skepsis. I slutten av 90åra var det en tilsvarende satsning rundt et liknende konsept kalt HomeRF, som hadde som mål og gjøre trådløs styring og kontroll av lys, varme og inn klima. Det tok aldri av og brukergruppen for HomeRF er nå lagt ned. Det kan være flere årsaker til dette. Det kan være at det ikke finnes noe egentlig marked for slike konsepter. Det kan også være at tiden ikke var moden. At teknologien ikke var moden. De kretsene som HomeRF var basert på var radiokretser for lave ISM bånd på 433MHz og det var ikke god tilgang på høy regnekraft. IEEE 802.15.4 og ZigBee er betydelige framskritt når det gjelder elektronikk. Radiokretsene er bedre og det er tilstrekkelig regnekraft i hver node til å legge inn avansert nettverksteknologi. Det er derfor større sannsynlighet for at ZigBee skal lykkes selv og HomeRF ikke ble noen suksess. Men likevel gjenstår det å se at det finnes et reelt marked for denne teknologien. Beviset på dette bør komme i løpet av de nærmeste årene.

Innenfor WSN legges det ned betydelig forskning. Det er fremdeles store uløste problemer som krever stor forskningsinnsats i flere år framover. Dette gjelder spesielt innenfor nettverksteknologi. Hvis effektforbruket skal komme så langt ned at en node kan klare seg i mange måneder på enkle batterier må det utvikles metoder som benytter sovemodi. Nye og optimaliserte rutingsalgoritmer for lavt effektforbruk må også utvikles. Men det er ikke usannsynlig at det vil komme gjennombrudd innenfor dette de nærmeste årene.

Totalt sett ser det ut som om de som spår at "alt vil komme på nett", sannsynligvis vil få rett. Den teknologiske utviklingen vil gjøre dette mulig til en akseptabel kostnad. Forskningen de nærmeste tre til fem årene bør gi et klarere svar på dette.

Litteratur

- (1) www.intel.com (2004): Instrumenting the world.
- (2) www.zigbee.org, ZigBee Specification
- (3) Intanagonwiwat I, Govindan R, Estrin D (2000): Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks ,MobiCom 2000, Boston, Aug.
- (4) Intanagonwiwat I, Govindan R, Estrin D, Heidemann J, Silva F (2003): Directed Diffusion for Wireless Sensor Networking, *IEEE/ACM Transactions on Networking* **11**, 1.
- (5) Duresi A, Paruchuri V, Lyengar S, Kannan R (2005): Optimized Broadcast Protocol for Sensor Networks, *IEEE Transactions on Computers* **54**, 8, Aug.
- (6) Wei-Peng Chen, Jennifer Hou, Lui Sha, Caccamo M (2005): A Distributed Energy-aware Utility-based Approach for Data Transport in Wireless Sensor Networks ,MilCom, Atlantic City, Oct.
- (7) Polastre J, Hui J, Levis P, Zhao J, Culler D, Schenker S, Stoica I (2005): A Unifying Link Abstraction for Wireless Sensor Networks ,SenSys, USA, Nov.
- (8) Akkaya K, Younis M (2005): A survey on routing protocols for wireless sensor networks ,Ad Hoc Networks.
- (9) Chieh-Yih Wan, Campbell T, Krishnamurthy L (April 2005): Pump-Slowly, Fetch-Quick (PSFQ): A Reliable Transport Protocol for Sensor Networks, *IEEE Journal on Selected Areas in Communication* **23**, 4, 862-872.
- (10) Gay D, Levis P, von Behren R, Welsh M, Brewer E, Culler D (2003): The nesC Language: A Holistic Approach to Networked Embedded Systems, *Proceedings of Programming Language Design and Implementation* **June**.
- (11) Zheng J, Lee M J (Sept 2004): A Comprehensive Performance Study of IEEE 802.15.4, IEEE Press.
- (12) Demirkol I, Ersoy C, Alagoz F (2005): MAC Protocols for Wireless Sensor Networks: a Survey, *IEEE Communications Magazine*.