

Drahtlose Sensornetze: Zusammenfassung

Alexander Osiik

alexander.osiik@student.uni-luebeck.de

Drahtlose Sensornetze (SS 2019)

Institute of Computer Engineering, University of Lübeck

29. Januar 2020

1 Einführung

1.1 Sensorknoten?

- sind autonome Miniaturcomputer
- können:
 - über Sensoren Wahrnehmen
 - über Prozessoren verarbeiten
 - über Funk kommunizieren

1.2 Sensornetz?

- drahtloses Netz aus vielen Sensorknoten
- weiträumig, langlebig
- erlaubt detaillierte Umweltbeobachtung

1.3 Anwendungen?

- kann als wissenschaftliches Instrument benutzt werden
 - Beobachtung von Tieren, Pflanzen, Umwelphänomene
- Industrie
 - Kontrolle von Infrastruktureinrichtungen
 - Energiemanagement
- Gesundheitswesen
 - drahtlose Intensivstationene
 - medizinische Forschung
- Militär / Polizei
 - Erkennung “feindlicher” Aktivitäten

1.4 Vorlesung

Es soll Überblick zu Grundlegenden und einigen weiterführenden Aspekten drahtloser Sensornetze verschaffen werden.

Es ist ein multidisziplinäres Gebiet:

- Verteilte Systeme
- Informationssysteme
- Computer Systeme
- Eingebettete Systeme
- Ambient Computing
- Verteilte Algorithmen

1.5 5G

Handy verbindet sich mit Base Station Subsystem, dieses verbindet sich mit dem Network Switching System

- Enhanced Mobile Breitband: Bisher wurden Frequenzen 1-6Gz genutzt. 5G nutzt nun bis 100GHz
- Ultra reliable und geringe Latenzen
- höhere Datenraten und mehr Frequenzen bei verringertem Energieverbrauch

1.5.1 Kanalbündelung und Small Cells

Kanalbündelung ist eine Bündelung der genutzten Funkfrequenzbereiche eines Netzbetreibers (Kanäle in einem Frequenzblock). Dies erlaubt es, Datenrate pro Nutzer zu erhöhen.

Small Cell ist die Mobilfunkzelle mit geringer Sendeleistung, dementsprechend kleinem Versorgungsbereich. Der Radius liegt bei etwa 150m, die Sendeleistung ist gering

1.5.2 MIMO: Massive Multiple Input Multiple Output

Mehrantennensystem, das die zeitliche und räumliche Dimension nutzt.

Durch Space-Time-Coding wird die Zuverlässigkeit und Daterate gestigert (redundante Datenpakete)

1.5.3 Versteigerung

Man erhöht den Kaufpreis und spekuliert auf das Ausscheiden eines weiteren Anbieters. Falls der Anbieter spät ausscheidet, ist die investierte Summe im Endeffekt um ein vielfaches höher

1.6 Betrachtete Netze

die hier betrachteten Netze agieren anders, als z.B. 5G

- Kommunikation geschieht nicht über Handy Netz
- Die Netzstruktur ist dezentral und selbst-organisiert
- hohe Energieeffizienz enorm wichtig für Sensorknoten -> Lange Lebenszeit
- Alles für die wissenschaftliche Messung / Überwachung

2 Anwendungen

Viele durch Sensornetze erreichte Optimierungen für das alltägliche Leben denkbar:

- Neues Wissen ermöglichen
- Sicherheit erweitern
- Ressourcenmanagement
- Prävention von Fehlverhalten usw.

In folgende Kategorien kann unterteilt werden

- Wissenschaftliches Instrument (“Macroscopic”)
 - Tiere, Pflanzen, Umweltphänomene
- Industrielle Anwendungen
 - Infrastruktureinrichtungen (Pipelines, Maschinen)
 - Energiemanagement
- Landwirtschaft
 - Pflanzen (Wachstum, Reife, Bodenqualität)
 - Tiere (Krankheiten, Fruchtbarkeit, virtuelle Zäune)
- Gesundheitswesen (“Body Sensor Networks”)
 - drahtlose Intensivstation
 - Verhaltensauffälligkeiten alter Menschen
 - Lifestyle
- Militär / Polizei
 - Erkennung, Klassifizierung, Lokalisierung des “Bösen”

2.1 Mikroklima

Betrachtet wurden Redwoodbäume an der Küste Kaliforniens. Zur Motivation zählte die starke Variation und Dynamik klimatischer Bedingungen im Baum; kleine Wetterfronten bewegen sich entlang des Stamms.

2.1.1 System Überblick

Aufbau

- Sampling alle 5min
- 40-50 Knoten pro Baum
- Multi Hop Netz
- Messung von Temperatur, Feuchte, Sonneneinstrahlung

Knoten: Mote

Netz: TinyDB Sensor Netzwerk, Verbund über TASK Gateway, Funk über GPRS Modem

2.1.2 Fazit

Beobachtung: Trotz geringer Datenrate gab es einen hohen Datenverlust: 60% oder mehr

Ergebnis waren Zeitreihen pro Knoten, die gesamte Lebensdauer betrug 1,5 Monate. Pro Baum wurden 50 Knoten verwendet. Das Netz war **multihop**, **homogen** und **statisch**

2.2 Brutverhalten

Man möchte ein Modell für Brutpräferenzen des Wellenläufers erstellen. Dabei betrachtet man

- Nestbelegung
- Klimatische Bedingungen in Höhlen
- Umweltbedingungen

Die Beobachtung **muss** dezent erfolgen, da eine Abschreckung der Vögel blöd wäre.

2.2.1 Architektur

- Mehrere verbundene Sensor Knoten bilden ein Sensor Patch
- Über Gateway sind diese mit einem Transit Netzwerk verbunden
- über Basestation mit dem Internet, worüber dann abgelesen werden kann
- **Wetter-**(Feuchte, Sonne, Druck) und **Nestsensoren**(Feuchte, Temperatur, Näherung)

2.2.2 Fazit

Die Infrastruktur für Kalibrierung war sehr komplex. Zudem gab es Schäden durch fehlerhafte Verpackungen, da Batterien ausliefen und den Knoten korrodierten. **Datenrate** und **Ergebnis** waren ähnlich wie oben erwähnt, das Netz war diesmal jedoch **heterogen**(Wetter und Nest + Gateways).

Große Herausforderung war die **Kalibrierung** und **Verpackung**.

2.3 Cane Toad Überwachung

Kröten wurden nach Australien importiert, um Schädlinge beim Zuckerrohranbau zu regulieren. Ohne Feinde führte das zu einer starken Ausbreitung. Ein weit verstreutes **Sensornetz** zur Überwachung der Ausbreitung war gewünscht.

- Die Erkennung der Kröten geschah anhand der Quak-Laute: Dauer, Häufigkeit, Frequenz...
- Das akustische Signal wurde aufgezeichnet, mit Forward Fourier Transformation umgewandelt. Daraus bestimmte man dominante Frequenzanteile, die mit C4.5 Algorithmus (**Entscheidungsbaum**) klassifiziert worden sind

Herausforderung: Akustische Aufnahme mit 10KHz, hohe Ressourcenanforderungen durch **Signalverarbeitung** und **Maschinelles Lernen**

2.3.1 Architektur

Zweischichtiges Netz aus **Motes** und **Stargates**:

- Motes nehmen akustische Signale auf, führen Kompression durch (auf ca. 30%), und schicken sie an Stargate per **Round-Robin-Schedule**
- Stargate klassifiziert auf den Signalen, **Voting Process** entscheidet darüber, ob weiter zum Server durchgelassen wird

2.3.2 Fazit

Separat lag die Korrektheit bei 100%, bei 6 Kröten gleichzeitig lag die Implementierung 50% richtig (\approx Münzwurf). Latenz betrug 45sec, bei Kröten aber verkraftbar.

2.4 Vulkane

Es sollen die vulkanische Aktivität beobachtet werden. Ein Sensornetz soll als Ersatz für bisherige Messstationen in unerschlossenen Gebieten dienen. Messung von:

- Seismischen Schwingungen breiten sich über Boden aus (am Fuß)
- Infraschall (< 50 Hz) breitet sich über Luft aus (am Schlot) \implies früher!

2.4.1 Architektur

Früher: Große Box, viele Kabel, zentrale Stromverteilung, Single Point of Failure

- Microphone Motes zum EmpfängerMote verbunden (Freewave Modem)
- Knoten sampeln und schicken kontinuierlich
- Modem schickt Signale an das 9km entfernte Observatorium

2.4.2 Fazit

Infraschall ist guter Indikator für Eruptionen.

Im Vergleich war die neue Architektur ähnlich gut wie die alte. Es gab eine mittlere Datenrate, Ergebnis waren **Zeitreihen** und **Ereigniserkennung**. Eine Sterntopologie lag vor, heterogenes Netz.

2.5 Gletscher

Man will ein besseres Verständnis der Dynamik im Gletscherinneren und Untergrund erlangen. Es soll ein **Bewegungsmodell** für Gletscher entwickelt werden, und die **Auswirkungen der globalen Erwärmung** analysiert werden.

2.5.1 Architektur

Bisher: Bohren und Proben mit Bohrloch-Kameras

Jetzt: Knoten auf verschiedenen Tiefen des Gletschers. Diese senden an eine auf dem Gletscher befindliche Basisstation (auf Batterie und Solar), die das Signal dann an die Referenzstation liefert.

Proben

- PIC Mikrokontroller mit PLastikmanter
- Funkmodul für niedrige Frequenzen
- weitere Sensoren (Orientierung, Druck, Temp)
- Referenzstation war Linux Server

2.5.2 Fazit

Resultate waren Zeitreihen pro Knoten und deren Positionen (Verschiebung des Gletschers). Das Netz hatte eine Sterntopologie, war **heterogen** und **mobil**.

2.6 Lokalisierung von Schüssen

Ein Sensornetz zur Lokalisierung von Heckenschützen, Banden- und Straßekriminalität. Erkannt werden sollte die Druckwelle der Gewehrmündung.

Sensorknoten war MICA2, Berkeley Mode, erweitert um **Mikrofon** und **Verstärker**.

Teilaufgaben

- Erkennung der Druckwelle
- Zeitsynchronisation und Lokalisierung
- Senden an Basisstation, von wo aus die Abschussposition bestimmt wird

Signal wird kodiert. Ob das Muster passt wird anhand eines Zustandsautomaten bestimmt, Zuverlässigkeit 90%.

2.6.1 Positionsbestimmung

Bei Schuss gibt es Nachrichten von vielen Knoten: Position p_i , Zeit t_i . Es gibt aber auch Fehlinformation durch Echos, falsche Erkennung etc.

Herangehensweise war eine a priori gesetzte Einschränkung des Suchraumes.

Konsistenzfunktion: Maß der Übereinstimmung der Hypothese (p, t) mit tatsächlich gemessenen Werten

$$C_\tau(p, t) = \text{COUNT}_i(|t_i(p, t) - t_i| \leq \tau)$$

Die **Suche des Maximums** erfolgte durch eine **Bisektion** des Lösungsraumes.

2.6.2 Fazit

Mittlerer 2D Fehler lag bei 0,57m, 3D Fehler bei 0,98m.

Die Datenrate war hoch, als Resultat hatte man eine Lokalisierung. Das Netz war **homogen** und **multi-hop**. Zeitsynchronisation von vielen Nodes und fehlerbehaftete Messdaten waren eine Herausforderung.

2.7 Funktionalität und Herausforderung

Zur Funktionalität zählen:

- kontinuierliche Datenströme (kein failure)
- Erkennung von Ereignissen
- Klassifizierung von Ereignissen
- Lokalisierung

Als Herausforderung gelten:

- Energieeffizienz
- beschränkte Ressourcen
- Robustheit und Zuverlässigkeit
- Autonomie, Kosten, Kalibrierung, Skalierbarkeit

3 Hardware

3.1 Motes

Entwickelt an der UC Berkeley in verschiedenen Ausführungen.

Vorhanden waren:

- CPU, RAM (1-10KHz)
- Kommunikation mit bis zu 500kbps, 10-1000m
- Energieversorgung durch Batterie oder Energy Harvesting

In der Regel gibt es viele Varianten für jede Komponente. Wichtige Kriterien sind jedoch **Lebensdauer**, **Leistungsfähigkeit**, **Robustheit**, **Größe**, **Kosten**. Dies alles hängt natürlich von der Applikation ab.

3.2 Prozessor

Für Prozessoren gibt es verschiedene Alternativen, wie

- Mikrocontroller, I/O Kanäle, Wandler...
- DSP für Signalverarbeitung
- FPGA mit frei programmierbaren logischen Gattern
- ASIC als applikationsspezifischer Chip

3.3 Kommunikation

Generell kann über **Funk**, **Licht**, und **Schall** kommuniziert werden. Wichtig ist die Betrachtung der Eigenschaften:

- welcher Frequenzbereich? Breitband? Mehrere Kanäle?
- Reichweite? Interface? Datenrate?
- Energieverbrauch zum Senden und Lauschen

RFM TR1000 guter Listener, Chipcon CC2420 guter Sender

3.4 Sensoren

Es gibt passive und aktive Sensoren. Aktive Sensoren (Radar, Laser) messen immer **gerichtet**, während passive Sensoren sowohl gerichtet (Licht, Kamera) als auch **omnidirektional** (Temperatur, Feuchtigkeit) sein können.

Des weiteren wird in **analoge** (Spannung) und **digitale** Sensoren unterschieden.

Beispiele:

Beschleunigungssensor (Gyro). Messung der Auslenkung erfolgt piezoelektrisch und kapazitiv.

Kohlendioxid Änderung der Leitfähigkeit durch Freisetzung von Ionen

3.5 Energieversorgung

Hierzu zählen Batterien, Akkumulatoren, Gold-/Supercaps: Kondensatoren mit hoher Kapazität. Anforderung ist dabei eine geringe **Selbstentladung**, **Wiederverwendbarkeit** und **Spannungsstabilität**

3.5.1 Energiegewinnung

Elektrische Energie kann durch Umwandlung anderer Energieformen gewonnen werden.

Beispiele:

- Brennstoffzellen (10-100 mW)
- Solarzellen (10 μ W-15mW)
- Vibrationen (0.1-10.000 μ W)
- Druck (piezo) (330 μ W)
- Radioaktiver Zerfall (150W / g)

Voraussage: Energiedichte wird sich erhöhen, während Kostenreduktion langsam stagniert.

3.5.2 Energieverbrauch

Es gibt einen Trade-Off zwischen **Rechnen** und **Kommunizieren**. 1.000 Recheninstruktion sind in etwa äquivalent zu 1 Byte senden! Es ist also besser, lokal zu Rechnen statt zu kommunizieren. Dennoch: Ein Prozessor hält mit Akku etwa 12 Tage, Flash etwa 3, das ist nicht lange!

Als Lösung wird **Duty-Cycling** vorgeschlagen. Dahinter stehen **lange Schlafphasen**, während der alle Komponenten ausgeschaltet werden. Voraussetzung ist außerdem **schnelles Aufwachen** und **kurze Wachphasen**. Damit wird die Lebenszeit auf 100Tage verlängert!

- Zeit zum Aufwachen betrug dabei in etwa 1-10ms
- Beispiel: Telos T-Mote, ZigBee kompatibel, Erweiterungsstecker

3.6 Miniaturisierung

Vision "SmartDust": Sensorknoten im Format eines Staubkorns. Man hat sich für ein 3D Layout entschieden (lieber hochbauen, statt großflächig planar) mit stapelbaren und flexiblen Platinen. Man wünschte sich ein **System-on-Chip**, alle Funktionen in einem Halbleiterchip.

Problem: WiseNet SoC. Energieverbrauch skaliert nicht! Das Funkmodul hat eine relativ hohe Sendeleistung.

Alternativen zum Funk waren Laser:

- große Distanzen überwindbar
- optische Empfänger sehr einfach und sehr klein

- durch Spiegel (Corner-Cube-Retroreflector) im Dust wurde passive Laserkommunikation ermöglicht
- Smart Dust hatte aktive und passive Transmitter, Batterie am größten!

Die Basistation hat dann durch einen **defokussierten Laser** (Raster Scanning) Daten gesendet. Empfangen wurden diese durch eine Kamera mit **hoher Bildrate**. Empfang **mehrere Knoten gleichzeitig** war möglich (Knoten per Pixel)

⇒ Braucht man das alles?

Was bringt die Zukunft? Wird das Moore'sche Gesetz so weiterlaufen?
Effiziente Funkmodule und neue Energiequellen in Entwicklung!

4 Betriebssysteme

Was ist ein Betriebssystem? Es ist eine Abstraktion des Systems, welches Zugriff auf Systemressourcen vereinfacht. Zur Ressourcenverwaltung gehören **Speicher**, **Prozessor**, **Kommunikation** und **Ein-/Ausgabe**.

Das besondere an Sensornetzen ist, dass nur **wenige Ressourcen** bereitstehen, der **Prozessor primitiv** ist und jeder Node ein **spezielles Anwendungsprofil** hat.

4.1 Nebenläufigkeit

Unter Nebenläufigkeit versteht man die quasiparallele Ausführung mehrerer Aktivitäten. Zum Beispiel Lesen und Empfangen.

Jedes BS hat Prozesse und Threads (Prozesse ohne Adressraum). Probleme sind meist der **konfliktbehaftete Speicherzugriff** und der **Overhead für Prozesswechsel**.

Nebenläufigkeit realisiert durch:

- WHILE-Loop
- Events: asynchrone Ereignisse, Run to completion, auch mehrstufig denkbar
- Zustandsmaschinen

4.1.1 Speicherverwaltung

Der Speicher soll unter den Prozessen effizient aufgeteilt werden. Hierbei ist auf Schutz des Speichers zu achten! (**MUTEX**, **SEMAPHORE**).

Bei drahtlosen Sensornetzen gibt es keine virtuelle Speicherverwaltung, und damit auch kein Schutz! Dies ist jedoch nicht so tragisch, da eigentlich nur ein Prozess ausgeführt wird.

Speicher ist aufgeteilt in **Reserviert** — **Global** — **Frei** — **Stack**

Ein WSN hat keine Festplatten oder Flash, oder ROM, sondern nur einen **Flashspeicher**, typischerweise Random Access

4.2 Kommunikation

Wichtig für WSN ist der Austausch von Nachrichten zwischen Knoten. Dabei möchte man den Overhead minimal halten, und das Kommunikationsmodell ist **Hop-by-Hop**. Es ist lieber, **effizient** zu sein, als zuverlässig.

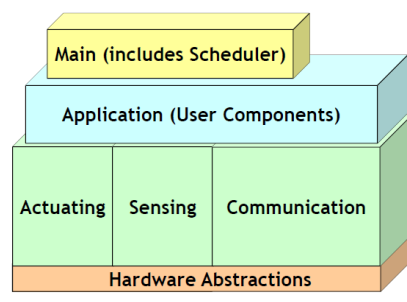
Das Kommunikationsmedium in WSN ist meist Funk. Medienzugriff erfolgt über **MAC**, siehe unbedingt **CSMA/CA**. Das Routing ist oft Baum-basiert (Senke an alle, Knoten an Senke). Die Verwaltung der Nachbarschaft ist schwer, da nicht klar ist, wer der Nachbarknoten ist. Meist wird nach Verbindungsqualität gewertet.

Sonstige Funktionen sind **Hardware-Treiber** (Sensoren, Uhr, I/O), **Energie-management** (Sparmodi, DutyCycling), **Programmierung “over the air”**, **Komponentensystem** (Ersatz für fehlende Prozesse)

4.3 TinyOS

Populäres Betriebssystem der Berkeley Motes:

- Komponenten System
- Events + Scheduler
- Active Messages (“Remote Events”)



Besteht aus **Commands** (=Methoden), **Events** (Ereignisse), **Event-Handler** (kurze Funktion die beim Event abgearbeitet wird), und **Task** (längere, asynchrone Funktion)

- **Methode:** Aufruf CALL
- **Event:** (HW) Interrupt: SIGNAL
- **Tasks:** können alles
- **Scheduler:** FIFO
- Split-Phase-Operation: Event/command postet Task; wenn beendet, signalisiere Event

Zu den Komponenten gehören **Interface**, **Modul** (=Klasse), und **Configuration** (Komposition von Modulen, Anwendung). Darüber hinaus gibt es die Möglichkeit, Event-Handler aus der Ferne zu aktivieren (durch **Active Messages**). Eine AM enthält dabei die ID des Handlers und die Nutzdaten.

4.4 Events: Freund oder Feind?

Threads sind in der Regel bequem, aber oft ineffizient.
Events dagegen sind effizienter als Threads, aber oft umständlich.

Die Problematik bei Events ist, dass die Funktion aufgespalten werden muss.
Dies führt zu

1. globalen Variablen
2. expliziten Zuständen

Verkettung ist durch Aufruf des Events im Event möglich.

4.5 OSM, andere

5 Vernetzung von Sensoren

Es stellt sich die Frage, wie man einen Sensorknoten zum Netz verbindet.

- **1-Hop:** Jeder Knoten kann mit jedem. Ausdehnung durch **Kommunikationsreichweite beschränkt**
- **Stern:** Alle Knoten mit leistungsfähiger Basisstation (zB SmartDust)
- **Cluster:** Sensorknoten kommunizieren **NUR** mit leistungsfähigem Head, Heads kommunizieren untereinander
- **Multi-Hop, Ad-Hoc:** Knoten kommunizieren mit Nachbarn, und nehmen andere als Knoten Router

Jeder Knoten kann zudem eine gewisse Knotenrolle annehmen. Zur Auswahl stehen dabei **Datenquellen** (Sensor), **Aggregatoren** (empfangen von mehreren Knoten, Reduktion), **Router** (leiten weiter) und **Senken** (Datenbank). Die Zuweisung ist dabei oft natürlich und hängt von der Netzstruktur ab.

5.1 Senken

Es sind Sammelstellen für Daten. Diese Stellen jedoch **Engpässe** dar, da Knoten in der Nähe der Senke viele Daten weiterleiten müssen (zB. EG Auswahl im Fahrstuhl).

Als Lösungsmöglichkeiten könnte man die Verwendung mehrerer Senken vorschlagen, oder eine erhöhte **Aggregation** der Daten im Netz.

5.1.1 Sensor Internet

Senken Könnten auch Gateways zum Internet bilden. Dadurch erhält man ein **globales** Sensornetz!

Hierfür sind aber weitere Schritte notwendig. Die Internet- und Web-Integration stellt eine große Herausforderung dar:

- IP im Sensornetz? Oder soll das Protokoll übersetzt werden?
- IP-Adresse pro Knoten oder pro Netz?
- Wie repräsentiert man es als Web-Service?

5.1.2 Sensor-Aktor-Netze

Bei Robotern oder Lampen gibt es neben Sensorknoten zusätzlich noch einen **Aktorknoten**. Diese werden mittels aus Sensordaten gewonnenen Informationen gesteuert. Hierbei gibt es **keine** Senken.

Im allgemeinen unterscheiden sich Netze aus Sensorknoten gerade dadurch. Bei Sensornetzen stehen die **Messdaten** im Vordergrund, nicht die Knoten. Die **Verarbeitung** der Daten geschieht im Netz, nicht an jedem Knoten selbst. Welcher Knoten Daten liefert ist grundsätzlich egal, da jeder Knoten identisch

ist. Hierdurch wird die **Datenbasierte Adressierung** eingeführt: Man spricht mit allen Knoten, auf die eine Eigenschaft/Event zutrifft, nicht deren Adresse.

In WSN werden zudem die Protokollstacks verschmolzen. Dies wird als Hilfsmittel zur Optimierung von Energie- und Ressourcenverbrauch genutzt. Ein **gezielter Austausch** von Informationen wird somit ermöglicht.