Verteilte Sensornetzwerke

Mit Datenaggregation und Sensorfusion

PD Stefan Bosse

Universität Bremen - FB Mathematik und Informatik

Modellierung von Sensornetzwerken (Teil 1)

Um Algorithmen für Sensornetzwerke zu entwickeln und mathematische Korrektheits- und Leistungsnachweise zu liefern, werden Modelle für verschiedene Aspekte von Sensornetzwerken benötigt.

Teil 1: Verbindungsmodelle

Teil 2: Interferenzmodelle

Teil 3: Algorithmen

Überblick

Wichtige Fragestellungen

Wann sind Sensorknoten logisch benachbart?

Wann sind Sensorknoten räumlich benachbart?

Wann sind Sensorknoten kommunikativ benachbart?

Wann sind Sensorwerte von Sensorknoten physikalisch benachbart (korrliert)?

Was stört und beeinflusst Kommunikation

Welche Algorithmen können in Sensornetzwerken eingesetzt werden (z.B. für Routing)?

Ziele

Wir wollen wissen

1. Welche Knoten sind physisch miteinander verbunden - Physikalische Ebene
2. Welche Knoten können miteinander Nachrichten austauschen - Logische Protokollebene
3. Welche Knoten sind topologisch und geometrisch benachbart
4. Wo gibt es Partitionen von Knoten

Überblick

- In diesem Modul geht es um die Modellierung der Verbindungsstrukuren und Eigenschaften in verteilten Sensornetzwerken

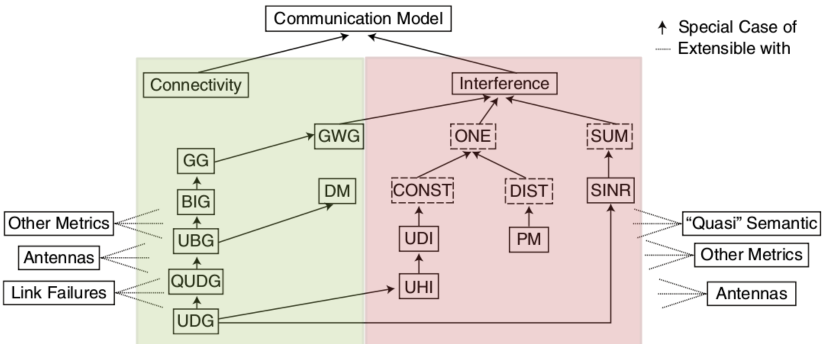


Abb. 1. Überblick über die Verbindungs- und Interferenzmodelle die in diesem Modul eingeführt werden

Sensornetzwerke

- Der Hauptzweck der Bereitstellung von Sensornetzwerken ist die Erfassung physikalischer Daten wie Lichtintensität, Schall oder Temperatur.

- Um die Daten zu aggregieren (z.B. Berechnung der Mindesttemperatur oder dem Durchschnitt usw.), die an den einzelnen Knoten gespeichert sind - und die somit im Raum verteilt sind - werden Protokolle oder Algorithmen benötigt, die angeben, wie diese Operationen ausgeführt werden.

    - Beispielsweise müssen Sensorknoten aufgrund der begrenzten Funkkommunikationsreichweite "multihop" miteinander kommunizieren (z.B. Daten sammeln), d.h., die Nachrichten müssen von Zwischenknoten weitergeleitet werden — und daher muss ein Routing-Algorithmus definiert werden, wie Nachrichten über welche anderen Knoten weitergeleitet werden sollen.

Graphen

> Graphen und Interferenzmodelle sind Grundlage für die Algorithmen

Referenz (alle Abbildungen, überwiegend alle Modelle) und für die Vertiefung dieses Modules:

S. SCHMID and R. WATTENHOFER, “Modeling Sensor Networks,” in Algorithms and Protocols for Wireless Sensor Networks, Springer, 2008.

Graphen

> ⚠ Da die Topologie eines Sensornetzwerks als Graph betrachtet werden kann, sind Verteilte Sensornetzwerke mit der Graphentheorie modellierbar, deren Sensorknoten die Graphenknoten und drahtgebundene oder drahtlose Verbindungen die Kanten darstellen.

- Ein weiterer wichtiger Bestandteil von Sensornetzwerkmodellen ist die Geometrie.
    - Geometrie kommt ins Spiel, da die Verteilung von Sensorknoten im Raum sowie der Ausbreitungsbereich von drahtlosen Verbindungen normalerweise geometrischen Einschränkungen unterliegt.
- Graphen könenn die Kommunikationsstruktur, aber auch Informationsflüsse oder Energieaustausch modellieren!

Graphen

1. UDG: Einheitscheibengraph (ungerichtet, physikalisch basiert)
2. DUDG: Einheitscheibengraph (gerichtet)
3. GG: Generischer Graph
4. QUDG: Quasi-Einheitsscheibengraph
5. BIG: Begrenzter Unabhängigkeitsgraph
6. GQUDG: Generalisierter (Q)UDG
7. UBG: Einheitskugelräume (metrische Räume, rein mathematisch)

Modellierung der Kommunikation

- Eine erste Modellierungsfrage betrifft in erster Linie die Konnektivität von Sensorknoten:
  - Bei einer Reihe von Knoten, die im Raum verteilt sind, müssen wir angeben, welche Knoten eine Übertragung eines anderen Knotens empfangen können.

> Wenn ein Knoten u im Empfangsbereich von v ist, dann sind u und v benachbart (angrenzend).
> Bedeutet dass auch räumliche Nähe? (Beispiel Internet)

- Die Nachbarschaft kann symmetrisch oder asymmetrisch sein:
  - Symmetrisch: Wenn u Nachrichten von v empfangen kann, dann auch v von u! ⇒ ungerichtete Kommunikation (bidirektional)
  - Asymmetrische: Wenn u Nachrichten von v empfangen kann, dann nicht v von u! ⇒ gerichtete Kommunikation (unidirektional)

- Die Konnektivität eines Sensornetzwerks wird durch einen Graphen $G = (V, E)$ beschrieben, wobei V (Eckpunkte) die Menge der Sensorknoten und E (Kanten) die Nachbarschaftsbeziehung zwischen Knoten beschreibt.

- Das heißt, für zwei Knoten $u, v \in V$,$(u, v) \in E$ wenn v ist benachbart zu u.

- In einem ungerichteten Graphen gilt, dass wenn $(u, v) \in E$, dann auch $(v, u) \in E \Rightarrow$ Kanten können eher durch Mengen $\{u, v\} \in E$ als durch Tupel dargestellt werden.

- Graphenmodelle
  - Einheitsscheibengraph (Unit Disk Graph, UDG)
  - Allgemeiner Graph (General graph, GG)
  - Quasi-Einheitsscheibengraph (Quasi Unit Disk Graph, QUDG)
  - Variationen

Kommunikationsgraph

- Ein Kommunikationsknoten kann drei Rollen in einem Sensornetzwerk einnehmen:
  a. Kommunikationsquelle (Sender)
  b. Kommunikationsenke (Empfänger)
  c. Vermittler (Router)
- Es wird angenommen dass benachbarte Knoten eines Verbindungsgraphen G (Konten, zwischen denen eine Verbindung besteht) Nachrichten msg austauschen können.
- Direktes Graphenmodell: Nur Knoten die benachbart sind und zwischen denen eine Verbindung (Kante) existiert können Nachrichten austauschen
- Indirektes Graphenmodell: Nachrichten können durch Routing auch von einer Quelle zu einer Senke übertragen werden wenn es zwischen den Knoten einen Pfad im Graphen gibt

Einheitsscheibengraph UDG

Sei $V \subset \mathbb{R}^2$ eine Menge von Knoten in der zweidimensionalen euklidischen Ebene. Der euklidische Graph $G = (V, E)$ wird als Einheitsscheibengraph bezeichnet, wenn zwei beliebige Knoten genau dann benachbart sind, wenn ihr euklidischer Abstand höchstens 1 beträgt. Die Kanten sind ungerichtet.

- Das bedeutet für beliebige $u, v \in V$ gilt: $\{u, v\} \in E \Leftrightarrow |u, v| \leq 1$.

Der Einheitskreis entspricht nicht der physikalischen Verbindung (Funkwellen). Warum nicht? Betrachte folgendes Beispiel.

> Das UDG-Modell ist idealistisch: In Wirklichkeit ist Funkkommunikation nicht omnidirektional, und selbst kleine Hindernisse wie Pflanzen können die Konnektivität verändern.

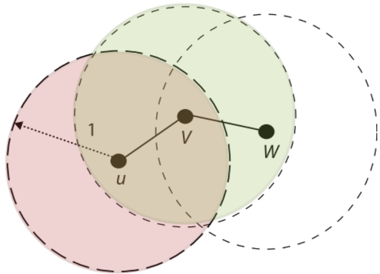


Abb. 2. Unit Disk Graph: Knoten u ist benachbart mit Knoten v (Abstand ≤ 1), aber nicht mit Knoten w (Abstand > 1)

Gerichteter Einheitsscheibengraph DUDG

- Bisher wurde symmetrische (bidirektionale) Verbindung zwischen zwei Knoten u und v angenommen.
  - Durch physikalische Effekte kann teilweise oder vollständig die Verbindung unidirektional sein
  - Beispiele sind Up- und Downlinks von Satelliten und Weltraumraketen (Beim Start einer Rakete gibt es in den ersten Minuten praktisch keinen Downlink)

Der unidirektionale Graph $G = (V, E)$ besteht dann aus gerichteten Kanten $\{u \rightarrow v\} \in E$ oder $(u,v) \in E$

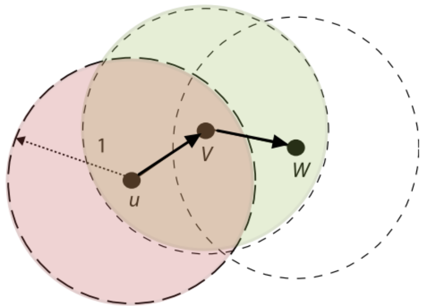


Abb. 3. Directed Unit Disk Graph: Knoten u ist benachbart mit Knoten v (Abstand ≤ 1), aber nicht mit Knoten w (Abstand > 1), und nur unidirektionale Verbindung

Generischer Graph GG

- Das UDG Modell ist nachbarorientiert, bildet aber weder physikalische noch logische Modelle (Internet) ab.
- Das GG Modell ist das Kontrastbeispiel
  - Jeder Knoten u kann mit jedem anderen Knoten v verbunden (benachbart) sein.

> Der Verindungsgraph G ist ungerichtet. Sei $V \subset \mathbb{R}^k$ eine Menge von Knoten in einem k-dimensionalen Raum. Jedes Knotenpaar $\{n_i, n_j\} \in E$ ist möglich mit $i,j \in \{1,2,..,N\}$ und N die Anzahl der Knoten.

- Die Komplexität eines vollständig verbundenen Graphen ist $O(N^2)$

- Während ein UDG zu optimistisch ist, ist das GG oft zu pessimistisch, da die Konnektivität der meisten Netzwerke nicht willkürlich ist, sondern bestimmten geometrischen Einschränkungen unterliegt.

- In einigen Anwendungsszenarien kann es jedoch korrekt sein, entweder auf der UDG oder auf der GG zu arbeiten.

- In der Tat gibt es Algorithmen, die für die UDG entwickelt wurden und auch in allgemeineren Modellen eine gute Leistung erbringen.

  - Darüber hinaus sind einige für das GG entwickelte Algorithmen derzeit auch die effizientesten für UDGs

Verallgemeinerung und Erweiterung

> viele der bisher beschriebenen Modelle können weiter verallgemeinert werden.

- Zum Beispiel können die UDG- und QUDG-Modelle in drei Dimensionen anstatt in der Ebene erweitert werden

- Erweiterung unter Verwendung verschiedener Entfernungsfunktionen (Normen)

Quasi-Einheitsscheibengraph (QUDG)

Die Knoten befinden sich in $\mathbb{R}^2$ an beliebigen Positionen. Alle Knotenpaare mit euklidischem Abstand höchstens ρ für einige gegebene $\rho \in (0, 1]$ sind benachbart. Paare mit einem Abstand größer als 1 befinden sich niemals im Übertragungsbereich des anderen. Schließlich können Paare mit einem Abstand zwischen ρ und 1 benachbart sein oder nicht.

Für $\rho = 1$ ein QUDG ein UDG ist und daher gilt: Ein UDG ist ein Spezialfall eines QUDG.

- Die Grenze des Nachbarschaftsbereichs kann jetzt anisotrop sein (Polygon statt eines Kreise)

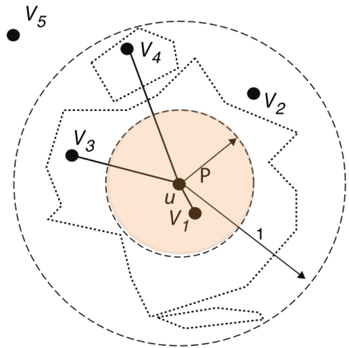


Abb. 4. Quasi Unit disk Graph aus der Perspektive des Knotens u: Der Knoten u grenzt immer an den Knoten $v1$ ($d(u, v_1) \leq \rho$), aber niemals an v_5 ($d(u, v_5) > 1$). Alle anderen Knoten können sich im Übertragungsbereich von u befinden oder nicht. In diesem Beispiel grenzt der Knoten u an v_3 und v_4, jedoch nicht an v_2

QUDG Variationen

> Das vorherige QUDG gibt nicht genau an, was passiert, wenn der Abstand zwischen ρ und 1 liegt. Es gibt mehrere Optionen.

- Man könnte sich beispielsweise vorstellen, dass ein Auswahlprozess wählt, ob sie sich im Übertragungsbereich des anderen befinden oder nicht.
- Alternativ kann es eine gewisse Erfolgswahrscheinlichkeit geben, benachbart zu sein: Die entsprechende Wahrscheinlichkeitsverteilung könnte von der Zeit und/ oder Entfernung abhängen.
    - Zum Beispiel könnte das QUDG verwendet werden, um Rayleigh-Fading zu untersuchen; Das heißt, die Funksignalintensität könnte entsprechend einer Rayleigh-verteilten Zufallsvariablen variieren.
    - Außerdem ist ein probabilistisches Ein / Aus-Modell sinnvoll, bei dem sich der Zustand eines Links in jeder Runde mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit von gut zu schlecht und umgekehrt ändert.

Während das QUDG für Modellknoten attraktiv sein kann, die in Bereichen mit wenigen Hindernissen eingesetzt werden, ist es für innerstädtische oder gebäudeinterne Netzwerke, in denen viele (dynamische) Hindernisse nicht ignoriert werden können, nicht sinnvoll: Da ein Knoten möglicherweise mit einem anderen Knoten kommunizieren kann, der Dutzende von Metern entfernt ist, aber nicht mit einem dritten Knoten, der gleich um die Ecke liegt, wäre ρ nahe 0.

Obwohl Knoten, die sich in der Nähe, aber auf verschiedenen Seiten einer Wand befinden, möglicherweise nicht kommunizieren können, ist ein Knoten typischerweise stark mit den Knoten verbunden, die sich im selben Raum befinden, und daher sind viele Nachbarn eines Knotens selbst direkte Nachbarn. Mit anderen Worten, selbst in Regionen mit vielen Hindernissen ist die Gesamtzahl der Nachbarn eines Knotens, die nicht benachbart sind, wahrscheinlich klein.

Begrenzter Unabhängigkeitsgraph (BIG)

Sei $Y^r(u)$ die Menge aller unabhängiger Knoten, die höchstens r Sprünge vom Knoten u (d.h. Knoten der r-Nachbarschaft von u) im Konnektivitätsdiagramm G entfernt sind.

Somit wird eine Menge S ⊂ V von Knoten als unabhängig bezeichnet, wenn alle Knoten in der Menge paarweise nicht benachbart sind; das heißt, für alle u, v ∈ S gilt {u, v} ∉ E.

Graphh G hat eine begrenzte Unabhängigkeit genau dann, wenn für alle Knoten u ∈ G, |Y(u)| = O (poly (r)) (typischerweise $|Y^r(u)| \in O(r^c)$ für eine kleine Konstante c ≥ 2).

Da die Anzahl der unabhängigen Nachbarn in einer Scheibe mit dem Radius r eines UDG höchstens $O(r^2)$ beträgt, haben wir die folgende Feststellung:

> Das UDG-Modell ist ein Sonderfall des BIG-Modells. In ähnlicher Weise ist, wenn ρ konstant ist, auch ein QUDG ein BIG. BIG bildet die Realität gut ab!

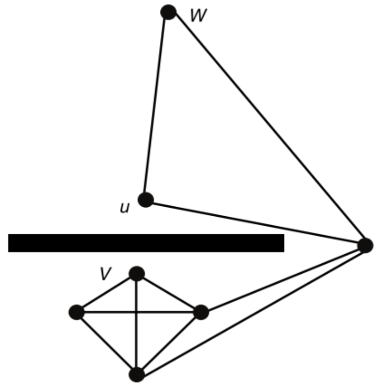


Abb. 5. Knoten u und v sind durch eine Wand getrennt. Knoten auf der gleichen Seite der Wand sind vollständig verbunden. Aufgrund der Wand kann u zwar einen entfernten Knoten w erreichen, den nahen Knoten v jedoch nicht hören. Solche Situationen können durch den BIG, aber nicht durch den UDG oder den QUDG modelliert werden.

Generalisierter (Q)UDG

Eine Erweiterung der UDG- und QUDG-Modelle besteht darin, Knoten in $\mathbb{R}^3$ zu berücksichtigen. Außerdem können die Entfernungen zwischen den Knoten unter Verwendung der Manhattannorm (L1-norm) modelliert werden. In der Manhattan-Norm ist der Abstand zwischen zwei Punkten $u = (x_1, y_1)$ und $v = (x_2, y_2)$ in der Ebene gegeben durch $d(u, v) = |x_2 - x_1| + |y_2 - y_1|$, während in der euklidischen Norm (L2−Norm) der Abstand $d(u, v) = \sqrt{(|x_2 - x_1|^2 + |y_2 - y_1|^2)}$ ist . Alternativ ist auch die Maximalnorm ($\mathbb{L}\infty$ norm) beliebt, wobei $d(u, v) = \max |x_2 - x_1|, |y_2 - y_1|$.

Metrische Räume und Einheitskugelräume (UBG)

Ein metrischer Raum definiert Abstände zwischen allen Knotenpaaren und garantiert gleichzeitig Nicht-Negativität, Identität des Ununterscheidbaren, Symmetrie und Dreiecksungleichheit. Eine Verdoppelungsmetrik ist einfach ein metrischer Raum mit einigen zusätzlichen Einschränkungen

(UBG) Für einen Knoten u sei die Kugel $B_u(r)$ die Menge aller Knoten in einem Abstand von höchstens r von u. Es gilt für alle Knoten u und alle $r \geq 0$, dass die Kugel $B_u(r)$ von einer konstanten Anzahl von Kugeln mit dem Radius $r / 2$ überdeckt werden kann; das heißt, $B_u(r) \subseteq \cup_{i=1 \ldots c} B_{ui}(r / 2)$, wobei u_i beliebige Knoten sind und c eine (normalerweise kleine) Konstante ist. Im UBG-Modell wird angenommen, dass Knoten einen Verdopplungsmetrikraum bilden. Zwei Knoten u und v mit $d(u, v) \leq 1$ sind benachbart, wohingegen alle anderen Knoten nicht sind.

Identität des Ununterscheidbaren

- Dieser Satz zur logischen Identität sagt aus, dass zwei reale Objekte, wenn sie nicht ein und dasselbe sind, sich in mindestens einer beobachtbaren Eigenschaft (Qualität) voneinander unterscheiden müssen.

- Es gibt damit keine zwei qualitativ absolut identischen, aber real verschiedenen Dinge in der realen Wirklichkeit. Für eine genauere Darstellung siehe Identität (Logik).

[Wikipedia]

Metrische Räume und Einheitskugelräume (UBG)

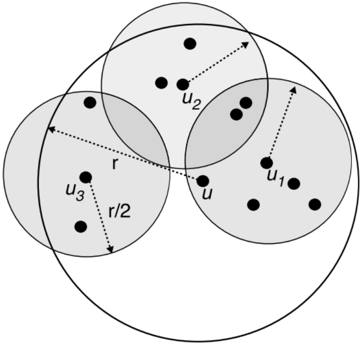


Abb. 6. Die euklidische Ebene bildet eine Verdopplungsmetrik. In diesem Beispiel sind die Knoten in $\mathbb{R}^2$ verteilt, und drei Kugeln mit dem Radius r / 2 reichen aus, um alle Knoten in $B_{\mathrm{u}}(r)$ abzudecken; das heißt, $B_{\mathrm{u}}(r) = B_{\mathrm{u1}}((r / 2) \cup B_{\mathrm{u2}}$ (r / 2) $\cup B_{\mathrm{u3}}(r / 2)$.

- Es ist möglich, einen UDG mit einem UBG zu modellieren, indem die euklidischen Abstände des UDG verwendet werden und die Knotenpaare verbunden werden, die höchstens eine Entfernung von 1 aufweisen. Darüber hinaus kann sogar ein QUDG mit einem UBG modelliert werden.

> Um einen metrischen Raum zu bilden, müssen die Abstände zwischen den Knoten die folgenden Eigenschaften erfüllen: (1) Nicht-Negativität, (2) Identität des Ununterscheidbaren, (3) Symmetrie, und (4) Dreiecks-Ungleichung.

Es gilt:

- Ein UDG ist ein UBG,
- Ein ungerichteter QUDG mit konstanten ρ isz auch ein UBG.
- Ein UBG ist ein BIG

Stern- und Maschennetzwerke

- Spezialform des GG/UDG
- Sternnetzwerk häufig bei Master-Slave Anwendungen vorzufinden (Senornetzwerke)

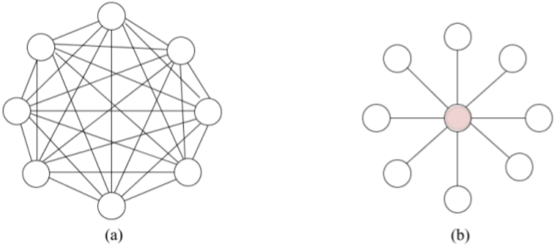


Abb. 7. (Links) GG Maschennetzwerk (Rechts) UDG Sternnetzwerk

Gitternetzwerke

- Weitere Spezialformen des GG/UDG sind Gitternetzwerke in zwei und drei Dimensionen (oder 1D: Kette und Ring).
- Findet man bei fest installierten und eingebetteten Netzwerken

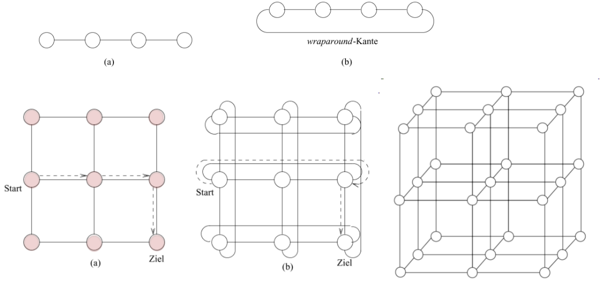
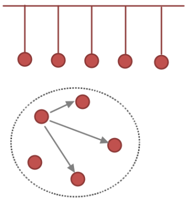


Abb. 8. (Oben) 1D Netzwerk Kette (a) und Ring (b); (Links) 2D Gitternetzwerk mit Nachrichtenvermittlung über Zwischenknoten (Rechts) 3D (Kubus) Gitternetzwerk

Bussysteme

- Ein UDG Modell wo in der logischen Netzwerkstruktur alle Knoten übereinander mit gleichen Kreisradius angeordnet sind
  - Es kann immer nur ein Knoten gleichzeitg senden!
- Zu finden bei eingebetteten Netzwerken



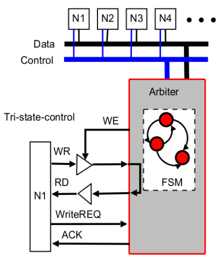


Abb. 9. Bussysteme (Links) Allgemeine Busnetzwerktopologie und Transformation in ein gerichtetes sequenzielles Maschenntzwerk (DGG) (rechts) Mit getrennten Daten- und Steuerungsverbindungen und Vermittler (Arbiter)

Abdeckungsoptimierung und Probleme

> In Sensornetzwerken ist die Frage ob alle Knoten erreichbar sind wichtig für das Systemverhalten des Senornetzwerkes und die Erfüllung der Erfassungsaufgabe.

- Die vollständige Kommunikationsabdeckung in mobilen und ad-hoc Netzwerken ist nicht trivial.
- Vielfach kann mit der Graphentheorie, probabilistischen Modellen und Verfahren, und geormetrischen Modellen und Überlegungen eine möglichst hohe Wahrscheinlichkiet erreicht werden, das meistens alle Knoten (wenigstens indirekt) erreichbar sind.
    - Weitere Faktoren wie Energie und externe Störungen müssen ggfs. auch berücksichtigt werden

Weitere Modellierungsaspekte

- Neben Graphen und geometrischen Modellen spielen in drahtlosen Sensornetzwerken weitere Modellierungsaspekte eine wichtige Rolle:

Antennen
: Neben omnidirektionalen Antennen gibt es eine breite Palette anspruchsvollerer Antennenmodelle. Zum Beispiel kann ein Knoten eine Richtfunkantenne mit mehr Verstärkung in bestimmten Richtungen haben.

Verbindungsfehler
: Jedes graphbasierte Modell kann durch probabilistische Verbdindungen erweitert werden. D.h., es gibt eine zeitlich und geometrisch abhängige Wahrscheinlichkeit, dass eine Verbindung zwischen zwei Knoten u und v zustande kommt.

Kosten

Bei drahtgebundenen Systemen ist der Verbuindungsaufwand ein wesentlicher Parameter (Kosten des Netzwerkes)

Energie

Energieversorgung, Energiemangel, und Störungen in der Energieversorgung haben direkten Einfluss auf die Kommunikation zwischen Knoten.

Zusammenfassung

1. Die Topologie eines Sensornetzwerkes kann als Graph systematisch und methodisch modelliert werden
2. Es gibt unterschiedlichen Graphenmodelle die Nachbarschaft (d.h. Fähigkeit zur Kommunikation) beschreiben
    - Unterschiedliche räumliche Randbedingungen werden berücksichtigt
    - Teilweise sind die Modelle ineinander transformierbar
3. Die Graphen können sowohl statische als auch dynamische (mobile und ad-hoc) Netzwerke beschreiben
4. Die Abdeckung eines geometrischen Raums mit Sensorknoten und Kommunikationsfähigkeit aller Knoten sind zentrale Fragestellungen

Referenzen

[1] S. SCHMID and R. WATTENHOFER, “Modeling Sensor Networks,” in Algorithms and Protocols for Wireless Sensor Networks, Springer, 2008.

[2] S. S. Iyengar and R. R. Brooks, Distributed Sensor Networks - Sensor Networking and Applications. CRC Press, 2013. Sensor model: pp 33 (1.2)