4. GI/ITG KuVS Fachgespräch „Drahtlose Sensornetze“

ETH Zürich
23.–24. März 2005

Kay Römer (Editor)

Technischer Bericht TR 481
Departement Informatik, ETH Zürich

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Liste der Teilnehmer

Zinaida Benenson	RWTH Aachen
Jan Beutel	ETH Zürich
Rani Bhutada	Univ. Freiburg
Reinhard Bischoff	EMPA
Erik-Oliver Blass	Univ. Karlsruhe
Alejandro Buchmann	TU Darmstadt
Carsten Buschmann	Univ. zu Lübeck
Alexander Coers	Fraunhofer IMS
Dirk Dahlhaus	ETH Zürich
Klaus David	Univ. Kassel
Daniel Dietterle	IHP
Falko Dressler	Univ. Erlangen
Matthias Dyer	ETH Zürich
Stefan Fischer	Univ. zu Lübeck
Christian Frank	ETH Zürich
Thomas Fuhrmann	Univ. Karlsruhe
Simeon Furrer	IBM Research
Ruimin Huang	Univ. Freiburg
Senthil Jayapal	Univ. Freiburg
Jonas Meyer	EMPA
Holger Karl	Univ. Paderborn
Oliver Kasten	ETH Zürich
Jochen Koberstein	Univ. zu Kiel
Kendy Kutzner	Univ. Karlsruhe
Andreas Lachenmann	Univ. Stuttgart
Olaf Landsiedel	Univ. Tübingen
Norbert Luttenberger	Univ. zu Kiel
Yiannos Manoli	Univ. Freiburg
Pedro José Marrón	Univ. Stuttgart
Friedemann Mattern	ETH Zürich
Lennart Meier	ETH Zürich
Daniel Minder	Univ. Stuttgart
Clemens Moser	ETH Zürich
Mario Neugebauer	TU Dresden
Dennis Pfisterer	Univ. zu Lübeck
Senthil Ramchandran	Univ. Freiburg
Frank Reichenbach	Univ. Rostock
Matthias Ringwald	ETH Zürich
Hartmut Ritter	FU Berlin
Kay Römer	ETH Zürich
Silvia Santini	ETH Zürich
Olga Saukh	Univ. Stuttgart
Wolfgang Schott	IBM Research
Peter Schramm	Univ. Dortmund
Katja Schwieger	TU Dresden
Michael Sessinghaus	Univ. Paderborn
Jan Steffan	TU Darmstadt
Guido Stromberg	Infineon
Kirsten Terfloth	FU Berlin
Lasse Thiem	Fraunhofer FOKUS
Volker Turau	TU Hamburg-Harburg
Andreas Ulbrich	TU Berlin
Harald Vogt	ETH Zürich
Markus Waelchli	Univ. Bern
Klaus Wehrle	Univ. Tübingen
Christoph Weyer	TU Hamburg-Harburg
Matthias Witt	TU Hamburg-Harburg
Jens Wukasch	T-Systems

Inhaltsverzeichnis

Kommunikation, Hardware, Betriebssysteme

Plattformen und Deployment

Programmierabstraktionen und Middleware

Simulation, Monitoring, Vorhersage

Sicherheit, Energie, Ort, Zeit

Einsatz von UWB in Sensornetzwerken

Katja Schwieger und Gerhard Fettweis

Vodafone Chair Mobile Communications Systems
Dresden University of Technology, Mommsenstr. 18, D-01062 Dresden, Germany
Phone: +49 351 463 33919, Fax: +49 351 463 37255
{schwieg, fettweis}@ifn.et.tu-dresden.de

Zusammenfassung. In diesem Artikel werden Möglichkeiten und Schwachstellen von Ultra-Wideband (UWB) Verfahren für Sensornetzwerke betrachtet.

1 Was ist UWB?

In UWB-Systemen werden Signale mit Bandbreiten größer als 500 MHz oder mit relativen Bandbreiten größer als 0.2 (Definition gemäß FCC (*Federal Communications Commission*) [1]) übertragen. Ursprünglich verstand man unter UWB-Signalen kurze Pulse, z.B. mit Pulsdauern von weniger als 1 ns. Diese Art von UWB bezeichnet man heute als *impulse radio* (IR), oder auch trägerlose Übertragung. Heutzutage werden Systeme auch als UWB-Systeme bezeichnet, die als Spreizspektrumverfahren, multi-Band-Verfahren (z.B. MB-OFDM) oder Mehrträgerverfahren realisiert werden, solange sie die Definition einhalten.
Aufgrund der grossen Bandbreite ist die Anzahl der auflösbaren Mehrwegekomponenten gross, damit ist theoretisch ein hoher Diversitätsgewinn erreichbar. Praktisch wird aber die Anzahl der nutzbaren Pfade von dem tolerierbaren Hardwareaufwand des Empfängers (z.B. Anzahl der Rake-Finger, Genauigkeit der Quarze) bestimmt [2].
Aufgrund der hohen Bandbreite und der damit verbundenen hohen zeitlichen Auflösefähigkeit von UWB, ist dieses Verfahren auch für Ortungs- und Navigations-Verfahren sehr geeignet.
Für Sensornetzwerke wird bei Einsatz von IR ein geringer Hardwareaufwand prognostiziert, wie in [3] am Beispiel eines realen Veruchsaufbaus gezeigt wird, da auf den Einsatz von Mischern verzichtet werden kann. Daher soll im Weiteren nur IR betrachtet werden.

2 Wie funktioniert UWB?

Modulation
Gängige IR-Modulationsverfahren sind PAM (*pulse amplitude modulation*) und PPM (*pulse position modulation*). Außerdem existiert noch BPSK (*binary phase shift keying*), bei dem das Vorzeichen eines Pulses geändert wird.
Bei PPM wird ausgehend von einer Referenz das Symbol anhand der zeitlichen Position des Pulses bestimmt. Dieses Prinzip ist vergleichbar mit FSK (*frequency shift keying*), wobei bei FSK als Referenz eine Frequenz herangezogen wird und bei PPM eine Zeit.

Wie bei M-wertiger-FSK lassen sich PPM-Signale mit M orthogonalen Basisvektoren beschreiben. Damit ist die Bitfehlerrate (BER) von PPM die gleiche wie bei anderen orthogonalen Modulationsverfahren. Die BER von 2-PAM ist diegleiche wie die antipodaler Verfahren.
Oftmals werden time-hopping (TH) Verfahren angewandt. Dabei wird ein Symbol d gemäß eines Kodes c in mehrere Chips aufgeteilt. Im (mittleren) Abstand T_f (*pulse repetition time*) wird ein Chip, also der Sendepuls w_{TX} (*monocycle*) der Breite τ_W, übertragen, wobei ein Chipintervall T_C lang ist (vgl. Abbildung 1). Vorrangig dient TH dazu, mehrere Nutzer gleichzeitig im Netzwerk unterzubringen. Werden PN (*pseudo-random*) Sequenzen verwendet, wird gleichzeitig das Spektrum des Sendesignals geglättet. Da sich die Signalleistung des Pulses aus den akkumulierten Einzelleistungen der Chips ergibt, können mit dieser Methode auch immer die von den Regulierungsbehörden geforderten Leistungsmasken eingehalten werden.
Das mit dem Modulationsindex δ PPM-modulierte Sendesignal des k-ten Nutzers bei Anwendung von TH kann dargestellt werden, vgl. auch [4]:

$$s_{TX}^{(k)}(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} w_{TX}\left(t^{(k)} - iT_f - c_i^{(k)}T_C - \delta d^{(k)}_{\lfloor i/N_S \rfloor}\right). \tag{1}$$

Ein Symbol besteht aus N_S Chips. Abbildung 1 veranschaulicht das Prinzip des Time-Hopping bei Einsatz von PPM.

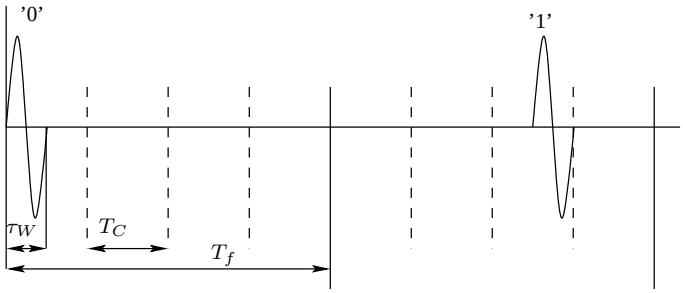


Abb. 1. Time-Hopping Prinzip mit PPM-modulierten Signalen

Empfängerentwurf
Prinzipiell könnte man die gängigen UWB-Empfänger in Kanal-matched-filter (Kanal-MF) und Energiedetektoren unterteilen. Als Spezialfall des Kanal-MF kann der Rake-Empfänger betrachtet werden. Allerdings können beim Rake nur endlich viele Finger implementiert werden. Damit können auch nur endlich viele Mehrwege berücksichtigt werden. Da bei UWB-Übertragung eine große Anzahl an Mehrwegen zu erwarten ist, müssen also sehr viele Finger implementiert werden, um möglichst viel Leistung ëinzusammelnünd damit eine geringe Bitfehlerrate (BER) zu gewährleisten. Insbesondere sind hohe BERs zu erwarten, wenn keine direkte Sichtverbindung (*non-line-of-sight* NLOS) besteht, wie in [5] gezeigt wurde. Bei einem Kanal-MF muss vor dem Datenempfang der Kanal geschätzt werden. Ist die Kanalschätzung perfekt, können alle

Mehrwegekomponenten bei der Demodulation berücksichtigt werden. Ein solcher Ansatz wird z.B. in [6] zugrunde gelegt.
Die Komplexität eines Empfängers basierend auf dem Rake-Ansatz steigt mit der Anzahl der Finger und ist für Empfänger mit geringem Leistungsverbrauch nicht geeignet. Daher wird in Sensornetzwerken oftmals der Ansatz der Energiedetektion realisiert, so z.B. in [3]. Dem Nachteil einer geringeren theoretischen Leistungsfähigkeit von Energiedetektoren gegenüber Rake-Empfängern steht der Vorteil einer einfachen Realisierbarkeit mittels Integratoren [2] gegenüber. Dabei ist keine Kanalschätzung nötig. Weiterhin existieren vielversprechende Ansätze, bei denen unmodulierte Templates als Referenzsignale gesendet werden, die dann mit den kurz darauffolgenden Daten korreliert werden (*auto-correlating receiver*).

Kanalmodelle

Es gibt eine große Anzahl von Kanalmodellen für UWB-Signale [7], neue, auf niederbitratige Übertragung zugeschnittene Modelle entstehen aktuell im Rahmen der Standardisierungsaktivitäten von IEEE 802.15.4a. Viele greifen auf das Saleh-Valenzuela (SV)-Modell zurück, welches auf Messungen im Innenbereich beruht [8]. Dabei werden die Mehrwegekomponenten nicht mit *einer* statistischen Verteilungsfunktion beschrieben. Vielmehr wird davon ausgegangen, dass in Gebäuden Reflexionen an Clustern auftreten (z.B. eine Möbelgruppe), und typischerweise viele Cluster zu finden sind. Die Ankunftszeiten von Echos innerhalb eines Cluster bezogens auf die Ankunftszeit des ersten Echos des Clusters werden nun mit einem Poisson-Prozess der Rate λ beschrieben. Die Ankunftszeit der ersten Echos der jeweiligen Cluster werden als Poisson-Prozess mit der Rate Λ modelliert, τ_k bezeichnet die Ankunftszeit eines Pfades des l-ten Cluster relativ zur Ankunftszeit des ersten Pfades des Clusters. Dies wird in Abbildung 2 verdeutlicht. Die mittlere Leistung der einzelnen Pfade folgt einem exponentiellen Abfall. Zusätzlich unterliegt jeder Pfad einem Rayleigh-Zufallsprozess.

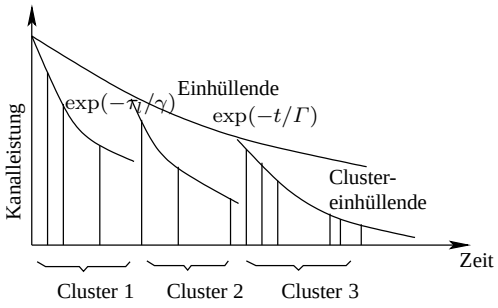


Abb. 2. Saleh-Valenzuela-Modell (nach [8])

	LOS	NLOS
Λ	0.025 ns^{-1}	0.4 ns^{-1}
λ	0.045 ns^{-1}	5.5 ns^{-1}
Γ	14.5 ns	14 ns
γ	8 ns	7.5 ns

Abb. 3. Parameter des SV-Mehrwegekanals

Für die weiteren Untersuchungen wird das SV-Modell mit den in Abbildung 3 gegebenen Parametern verwendet. Darin stellen Λ die Cluster Ankunftsrate, λ die Echo Ankunftsrate, Γ den Cluster Dämpfungsfaktor und γ den Echo Dämpfungsfaktor dar.

3 Leistungsfähigkeit von IR in Sensornetzwerken

Im Folgenden sollen einige Simulationsergebnisse vorgestellt werden, die zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit von IR-UWB bei niederbitratiger Übertragung dienen. Dabei wird davon ausgegangen, dass Sender und Empfänger perfekt synchronisiert sind und der Empfänger perfekte Kanalkenntnis hat. Als Modulationsverfahren wird PPM angewandt. Pro Rahmen wird ein Gauss'scher Monopuls der Dauer 1 ns ausgesendet (also $N_S = 1$). Es wird keine Interferenz mit anderen Systemen betrachtet. Als Kanalmodell dient der SV-Kanal mit den in Tabelle 3 angegebenen Parameter.
Zunächst wird ein Kanal-Matched-Filter (Kanal-MF) betrachtet und die Auswirkungen der Rahmenlänge auf die Bitfehlerrate (BER) in einem single-link System (1 Sender, 1 Empfänger) betrachtet. Die Datenrate R ergibt sich aus der betrachteten Rahmenlänge T_f mittels $R = 1/T_f$.

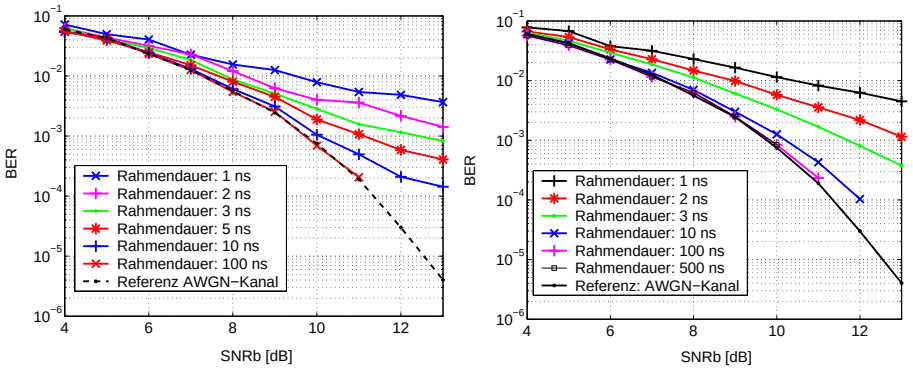


Abb. 4. BER im LOS/NLOS (links/rechts) SV-Mehrwegekanal für versch. Rahmendauern T_f

Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse für den SV-Kanal für LOS und NLOS. Offensichtlich tritt bei geringen Rahmendauern aufgrund der Mehrwege Interpulsinterferenz (IPI) auf, so dass eine Sättigung der Bitfehlerrate zu beobachten ist. Bei langen Rahmendauern (> 100 ns) ist der Abstand zwischen 2 Pulsen gross genug, so dass der Einfluss von IPI zu vernachlässigen ist.

Im Folgenden wird die Leistungsfähigkeit eines Rake bei verschiedenen Fingeranzahlen betrachet. Abbildung 5 bestätigt, dass bei UWB aufgrund der hohen Bandbreite viele Mehrwege aufgelöst werden. Somit ist die Anzahl der zur Demodulation benötigten Rake-Finger hoch.
Während im LOS-Fall aufgrund der starken LOS-Komponenten noch vernünftige Fehlerraten mit wenigen Fingern erreicht werden können, ist die Leistungsfähigkeit von wenigen Fingern im NLOS eindeutig nicht ausreichend, da damit zu wenig Leistung eingesammelt wird. Damit scheidet ein Rake-Empfänger für Sensornetzwerke, die im Innenbereich eingesetzt werden sollen, aufgrund des Hardwareaufwandes aus. Ähnliche

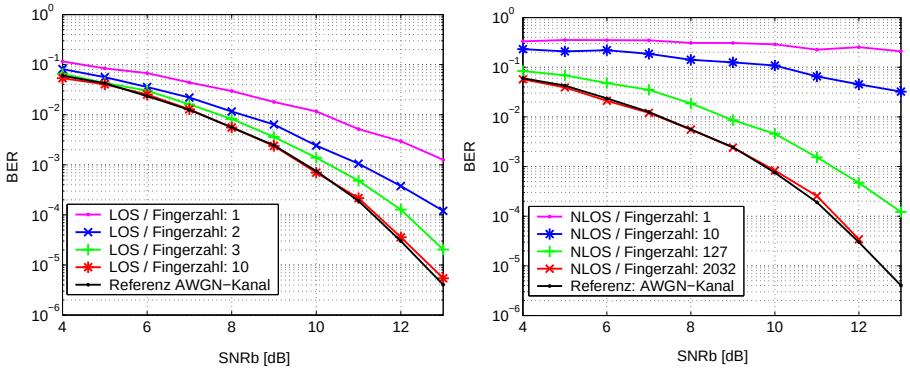


Abb. 5. BER im LOS/NLOS (links/rechts) SV-Kanal für versch. Anz. von Rake-Fingern

Ergebnisse wurden bereits in [9] dokumentiert. Darin wird u.a. gezeigt, dass in kritischen Kanälen wesentlich mehr als 10 Finger benötigt werden, um eine vernünftige BER zu erreichen.

Es bleibt die Leistungsfähigkeit von nicht-kohärenten Empfangsmethoden, d.h. Energiedetektion zu untersuchen. Würde Energiedetektion eine gute BER erreichen, wäre IR-UWB eine interessante Alternative zu herkömmlichen Schmalbandverfahren, da dann Transceiver mit geringem Leistungsverbrauch realisierbar wären.

Literatur

1. FCC, "Report and order, FCC 02-48," Apr. 2002.
2. L. Stoica, S. Tiuraniemi, H. Repo, A. Rabbachin, and I. Oppermann, "A low complexity UWB circuit transceiver architecture for low cost sensor tag systems," in *Symp. on Personal Indoor Mobile Communication*, Sept. 2004, vol. 1, pp. 196–200.
3. I. Oppermann and et al., "UWB wireless sensor networks: UWEN-a practical example," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 42, pp. S27–S32, Dec. 2004.
4. M.Z. Win and R.A. Scholtz, "Impulse radio: How it works," *IEEE Communications Letters*, vol. 2, pp. 36–38, Feb. 1998.
5. J.D. Choi and W.E. Stark, "Performance of ultra-wideband communications with suboptimal receivers in multipath channels," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 20, pp. 1754–1766, Dec. 2002.
6. F. Ramírez-Mireles, "On the performance of ultra-wide-band signals in Gaussian noise and dense multipath," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 50, pp. 244–249, Jan. 2001.
7. J. Foerster and Q. Li, "UWB channel modeling contribution from intel," in *IEEE P802.15-02/279r0-SG3a*, Nov. 2003.
8. A.A.M. Saleh and R.A. Valenzuela, "A statistical model for indoor multipath propagation," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. SAC-5, pp. 128–137, Feb. 1987.
9. Y. Ishiyama and T. Ohtsuki, "Performance comparison of UWB-IR using rake receivers in UWB channel models," in *2004 International Workshop on Ultra Wideband Systems (Joint UWBST&IWUWBS 2004)*, 2004, pp. 226–230.

Using TinyOS on BTnodes

Jan Beutel, Attila Dogan

Computer Engineering and Networks Laboratory
Department of Information Technology and Electrical Engineering
ETH Zurich, Switzerland
beutel@tik.ee.ethz.ch, adogan@ee.ethz.ch

Abstract. TinyOS has been very popular for wireless sensor network applications and is a de facto standard today. This study compares the architectural differences between the BTnode and Mote platforms and explains how to implement TinyOS applications on the BTnodes. In addition this enables to interface between networks of Mote and BTnode devices.

1 Introduction

Starting out from an all-in-one Bluetooth module, the BTnode family of nodes has matured to a full fledged dual radio wireless networking platform with both a Bluetooth and a Chipcon CC1000 low-power radio [2]. Thus, the BTnode rev3 is a twin, of the Berkeley Mica2 Mote [5] and the previous BTnode rev2 and ideally suited to interface between both classes of devices. Both radios can be operated simultaneously or be independently powered off completely when not in use, considerably reducing the idle power consumption of the device.

This new architecture opens new opportunities to interface between ultra-low-power devices like the Berkeley Motes and larger devices such as Bluetooth-enabled appliances [4], or to investigate duty-cycled multi-frontend devices with wake-up radios [7] or bandwidth–power–latency trade-offs.

This study provides a base for the implementation of TinyOS [3] applications on the BTnode platform. A short synopsis of the architectural differences of the BTnode and Mote platforms is followed by a basic introduction to TinyBT, the TinyOS support for BTnodes.

2 BTnode Hardware

The BTnode hardware is built around an Atmel ATmega128L microcontroller with on-chip memory and peripherals (see Fig. 1). The microcontroller features an 8-bit RISC core delivering up to 8 MIPS at a maximum clock frequency of 8 MHz. The on-chip memory consists of 128 kbytes of in-system programmable Flash memory, 4 kbytes of SRAM, and 4 kbytes of EEPROM. There are several integrated peripherals: JTAG for debugging, timers, counters, pulse-width modulation, 10-bit analog-digital converter, I2C bus, and two hardware UARTs. An

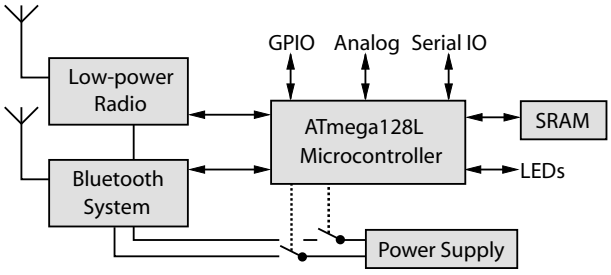


Fig. 1. BTnode rev3 hardware architecture overview.

external low-power SRAM adds an additional 240 kbytes of data memory to the BTnode rev3 system [1].

An assessment of the platform status and the experience gained through applications implemented on the BTnode rev2 resulted in the following design criteria that were realized in the BTnode rev3:

- Enhanced Bluetooth 1.2 subsystem supporting multiple-master Scatternets
- Additional low-power radio
- Integrated, battery-powered power supply
- Switchable power supplies for radios
- Board-to-board extension connector
- Open interface documentation of radios (developer information)

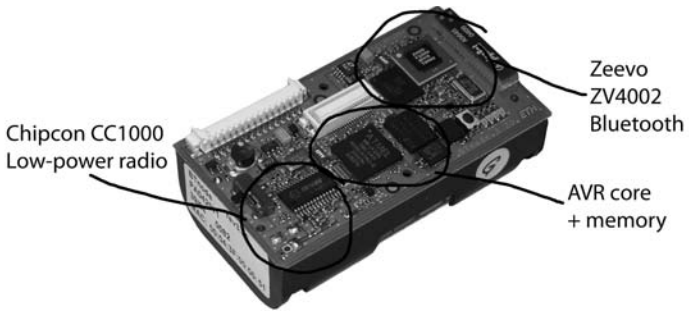


Fig. 2. The BTnode rev3 hardware with an AVR core, a CC1000 radio and a ZV4002 Bluetooth device in a Mica2 form factor.

2.1 Hardware Details – The BTnode rev3 Compared

The basic differences in the hardware architecture of the BTnode rev3 and the Mica2 Mote are outlined in Table 1. The main architectural advantages are the

dual radio, the extended data memory and the power switches for the radios that provide the application developer with more resources and flexibility while maintaining the basic Mica2 Mote characteristics. An additional address latch and 3 GPIO lines are used to multiplex the storage memory, the LEDs and the power switches to the AVR memory bus. This extra functionality adds some complexity that needs to be supported by the respective device drivers as well as in the applications.

Platform	**BTnode rev3**	**Mica2 Mote**
Bluetooth	Zeevo ZV4002	none
Low-power radio	CC1000	CC1000
Data Memory	64 kB	4 kB
Storage	180 kB SRAM	512 kB Flash
LEDs	4	3
Serial ID	no	yes
Debug UART	UART0	UART0, UART1
Connector	Molex 15 Pin or Hirose DF17 40 Pin	Hirose DF9 51 Pin
Regulated power supply	yes, 2xAA cells or DC input	none
Switchable power for radios and extensions	yes	none

Table 1. BTnode rev3 hardware details compared to the Mica2 Mote.

3 TinyOS on BTnodes – TinyBT

A first step to support TinyOS on the BTnode platform was achieved by the Manatee project [6] that developed portions of a Bluetooth protocol stack for TinyOS and an initial platform description of the BTnode for TinyOS that is available under `/tinyos-1.x/contrib/tinybt` and documented under `http://www.distlab.dk/madsdyd/work/tinyos`. Similarly, the Intel imote effort [4] has created a proprietary Bluetooth stack that uses TinyOS (available under `/tinyos-1.x/beta/platform/imote`. Both these efforts are not completely compatible with the BTnode rev3 but can be used as a reference for further work.

The current support for the BTnode rev3 in TinyOS is integrated into TinyBT where a platform definition as well as device specific drivers can be found. These allow to compile and run simple TinyOS demo applications like `CntToRFM`, `RFMToLED`, `Surge`, etc. that rely on the CC1000 radio.

A simple application using the AVR core and the CC1000 radio needs to import the platform specific `hardware.h` file and initialize the power for the CC1000 radio. This is done using the `set_latch()` function that controls the multiplexed lines for the power switches and LEDs that is automatically included when the `btnode3_2` platform is selected as compile target by `make btnode3_2`.

For the application programmer, everything looks just as if writing a TinyOS example for any other target platform. If applications want to make use of other specialized features of the BTnode rev3 like the extended storage memory or a combination of the two radios, specific operating strategies and software will need to be developed.

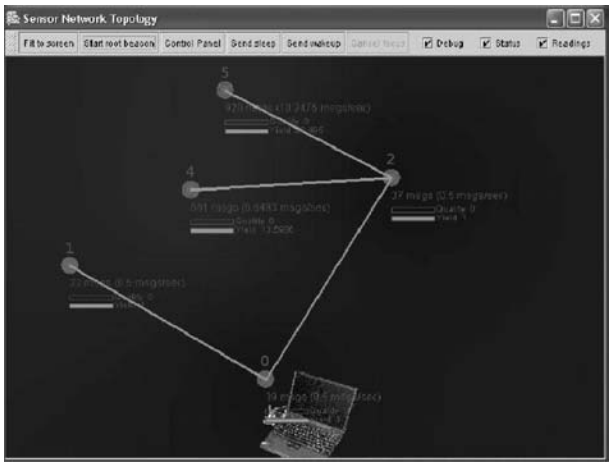


Fig. 3. The Surge demo application running on a mixed network of Mica2 Motes (nodes 0, 1 and 2) and BTnodes (nodes 4 and 5).

4 Summary

In this study we have investigated the feasibility of using TinyOS on the BTnode rev3 platform. A basic set of drivers and a platform definition has been created and tested with simple demo applications. A heterogeneous network consisting of Mica2 Motes and BTnodes has been created using the `Surge` demo application (see Fig. 3).

Today TinyOS does not incorporate multiple threads and many abstractions are oriented towards dataflow oriented interfaces which pose problems when dealing with a packet oriented radio interface such as Bluetooth. The ongoing work on the 2nd generation TinyOS (TinyOS 2.0 working group) as well as the architectural advantages of the BTnode rev3 allow to explore novel applications and flexible operating system concepts using dual radios and advanced power saving techniques.

For further information please refer to `http://www.btnode.ethz.ch` and the TinyOS developer resources found at `http://www.tinyos.net/`.

Acknowledgements

The work presented in this paper was supported (in part) by the National Competence Center in Research on Mobile Information and Communication Systems (NCCR-MICS), a center supported by the Swiss National Science Foundation under grant number 5005-67322.

References

1. J. Beutel, M. Dyer, M. Hinz, L. Meier, and M. Ringwald. Next-generation prototyping of sensor networks. In *Proc. 2nd ACM Conf. Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2004)*, pages 291–292. ACM Press, New York, November 2004.
2. J. Beutel, O. Kasten, F. Mattern, K. Römer, F. Siegemund, and L. Thiele. Prototyping wireless sensor network applications with BTnodes. In *Proc. 1st European Workshop on Sensor Networks (EWSN 2004)*, volume 2920 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 323–338. Springer, Berlin, January 2004.
3. D. Culler, J. Hill, P. Buonadonna, R. Szewczyk, and A. Woo. A network-centric approach to embedded software for tiny devices. In *First Int'l Workshop on Embedded Software (EMSOFT 2001)*, volume 2211 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 114–130. Springer, Berlin, October 2001.
4. J.L. Hill, M. Horton, R. Kling, and L. Krishnamurthy. Wireless sensor networks: The platforms enabling wireless sensor networks. *Communications of the ACM*, 47(6):41–46, June 2004.
5. J.L. Hill, R. Szewczyk, A. Woo, S. Hollar, D. Culler, and K. Pister. System architecture directions for networked sensors. In *Proc. 9th Int'l Conf. Architectural Support Programming Languages and Operating Systems (ASPLOS-IX)*, pages 93–104. ACM Press, New York, November 2000.
6. M. Leopold, M.B. Dydensborg, and P. Bonnet. Bluetooth and sensor networks: A reality check. In *Proc. 1st ACM Conf. Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2003)*, pages 103–113. ACM Press, New York, November 2003.
7. E. Shih, P. Bahl, and M. Sinclair. Wake on Wireless: An Event Driven Energy Saving Strategy for Battery Operated Devices. In *Proc. 6th ACM/IEEE Ann. Int'l Conf. Mobile Computing and Networking (MobiCom 2001)*, pages 160–171. ACM Press, New York, September 2002.

A Collision-Free MAC Protocol for Sensor Networks using Bitwise "OR"

Matthias Ringwald, Kay Römer

Dept. of Computer Science
ETH Zurich, Switzerland
{mringwal,roemer}@inf.ethz.ch

1 Introduction

Many widely used Medium Access Control (MAC) protocols for sensor networks are based on contention, where concurrent access to the communication channel by multiple sensor nodes leads to so-called collisions. Collisions are a source of many undesirable properties of these MAC protocols such as reduced effective bandwidth, increased energy consumption and indeterministic data delivery. Hence, collisions are commonly considered a "bad thing", and MAC protocols strive to avoid them wherever possible. In sensor networks, communication activity is typically triggered by an event in the physical world. In dense networks, such an event triggers communication activity at many collocated nodes almost concurrently, such that a high probability of collisions must be expected.

In this paper, we adopt another, more positive view on collisions. In particular, we show that a set of synchronized nodes can concurrently transmit data, such that a receiver within communication range of these nodes receives the bitwise "or" of these transmissions. Based on this communication model, we can provide efficient parallel implementations of a number of basic operations that form the foundation for BitMAC: a deterministic, collision-free, and robust MAC protocol that is tailored to dense sensor networks, where nodes report sensory data over multiple hops to a sink.

2 Basic Assumptions

In this section, we present our communication model and characterize the class of applications, for which BitMAC has been designed.

Our work is based on the assumption, that a node receives the "or" of the transmissions of all senders within communication range. In particular, if bit transmissions are synchronized among a set of senders, a receiver will see the bitwise "or" of these transmissions. This behavior can actually be found in practice, e.g., for radios that use On-Off-Keying (OOK), where "1"/"0" bits are transmitted by turning the radio transmitter on/off. BitMAC will use this communication model only for a limited number of control operations. For the remainder (e.g., payload data transmission), other, perhaps more efficient modulation schemes can be used if supported by the radio.

Furthermore, our work assumes that the radio supports a sufficient number of communication channels, such that nodes within communication range can switch to different channels to avoid interference.

BitMAC is designed for data-collection sensor networks, where many densely deployed sensor nodes report sensory data to a sink across multiple hops. Data communication is mostly uplink from the sensor nodes to the sink, although the sink may issue control messages to the sensor nodes. One prominent example of this application class are directed diffusion [2] and TinyDB [5]. Many concrete applications (e.g., [1, 4, 6, 8]) show this behavior as well. Furthermore, it is assumed that the network topology is mostly static. That is, after initial deployment, node mobility and addition are rare events.

3 Protocol Overview

BitMAC is based on a spanning tree of the sensor network with the sink at the root. In this tree, every internal node and its direct children form a star network. That is, the tree consists of a number of interconnected stars. Within each star, time-division multiplexing is used to avoid interference between the children sending to the parent. Time slots are allocated on demand to nodes that actually need to send. Using a distributed graph-coloring algorithm, neighboring stars are assigned different channels as to avoid interference between them. Both the setup phase and actual data transmission are deterministic and free of collisions.

In the following sections we will describe interesting parts of the protocol with increasing level of complexity. We will begin with basic techniques for communication among a set of child nodes and a parent node in a star network. We will then discuss the part of the MAC protocol used to control a single star. Finally, we will describe how these stars can be assembled to yield the complete multi-hop MAC protocol.

Fig. 1. (a) Star network with a single parent. (b) Multiple stars with shared children.

4 Integer Operations

Let us assume that all or a subset of children need to transmit k-bit unsigned integer values to the parent as depicted in Figure 1(a), where the latter is interested in various aggregation operations (OR, AND, MIN, MAX) on the set of values of the children.

Obviously, a bitwise "or" can be implemented by having the children synchronously transmit their values bit by bit.

In order to compute MAX, the binary countdown protocol is used which requires k communication rounds. In the i-th round, all children send the i-th bit of their value (where $i = 0$ refers to the most significant bit), such that the parent receives the bitwise "or". The parent maintains a variable *maxval* which is initialized to zero. When the parent receives a one, it sets the i-th bit of *maxval* to one. The parent then sends back the received bit to the children. Children stop participation in the algorithm if the received bit does not equal the i-th bit of their value as this implies that a higher value of another child exists. After k rounds, *maxval* will hold the maximum among the values of the children. Note that children who sent the maximum will implicitly know, since they did not stop participation. If the values are distinct among the children, this operation implements an election.

In a parallel integer operation, parents of multiple stars that share one or more children perform the same integer operation as depicted in Figure 1(b). If all involved nodes are synchronized, all of the above integer operations can be performed (synchronously) in parallel. For the OR and AND operations, our communication model will ensure that all parents will obtain the correct result for their respective children. For MAX, the parent will in general not obtain the correct result. However, this operation implements an election, where any two elected nodes do not share a common parent, if their values are distinct.

5 Star Network

Using the bitwise "or" operation, we present a MAC protocol for star networks, which will be used as a building block for the multi-hop protocol presented in the following section. Time-division multiplexing is used to avoid collisions and to ensure a deterministic behavior of the protocol. In order to optimize bandwidth utilization, time slots are allocated on demand to nodes that actually need to send data.

Let us assume for the discussion that children have been assigned small, unique integer IDs in the range $1...N$. We will show in Section 6 how these can be assigned. The protocol proceeds in rounds with the parent acting as a coordinator. A round starts with the parent broadcasting a beacon message to the children. Then children will transmit send requests to the parent. After receiving these requests, the parent constructs a schedule and broadcasts it to the children. During their time slots, children send their payload data to the parent. The parent will then acknowledge successful receipt. If transmission failed, the affected children will try a retransmission in the next round. For the send requests and the acknowledgments, a bit vector of length N is used. As a further optimization, the acknowledgment set can be concatenated with the beacon of the following message as depicted in Figure 2.

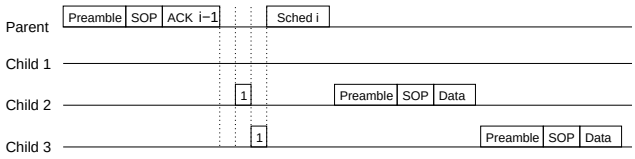


Fig. 2. Round i of the optimized MAC protocol for star networks.

6 Multi-Hop Network

We now show how to extend the protocol for star networks to a multi-hop network. First, nodes with the same hop count to the sink form rings. This is achieved by flooding of a beacon message that contains a hop counter. This operation is only possible because all nodes on ring i synchronously transmit the beacon to nodes in ring $i+1$ utilizing the bitwise "or" of the channel.

Next, the connectivity graph as shown in Figure 3(a) has to be transformed into a spanning tree by reducing the number of uplinks of each node to one by assigning separate radio channels. We will show in the next section how these are assigned. After the channel assignment, each internal node and its direct children form a star that uses the protocol presented in the previous section.

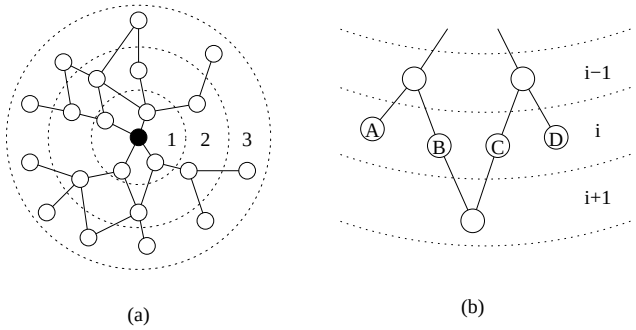


Fig. 3. Distance from the sink (•) imposes a ring structure on the network. Network links between nodes in the same ring are not shown.

7 Assigning Channels and IDs

In order to turn the hierarchical ring structure into a tree, each node must be assigned to a single parent. A parent in ring i then must share a channel with its children in ring $i+1$, such that no other parent in ring i of the children uses the same channel. More formally, this requires the assignment of small integers (i.e., channel identifiers) to nodes in ring i, such that nodes who share a child in ring $i+1$ are assigned different numbers.

We assumed in Section 5 that children of a single parent are assigned small unique integer numbers. With respect to the ring structure, this task can be formulated as assigning small integers to nodes in ring i, such that nodes who share a parent in ring $i-1$ are assigned different numbers.

The above two problems can be combined into a two-hop graph coloring problem: assign small integers (i.e., *colors*) to nodes in ring i, such that nodes with the same number do not share a common neighbor in ring $i-1$ or $i+1$. Note that common neighbors in ring i are not considered. In Figure 3(b), a valid color assignment would be $A = D = 1, B = 2, C = 3$.

In order to solve this coloring problem, let us assume that a small number C is known, such that the numbers $1...C$ (the *color space*) are sufficient to solve the coloring problem. Simulation of random graphs in [7] has shown that choosing C to be greater than two times the average node degree is sufficient with high probability. In practice, C will be set to the number of available radio channels.

Under these assumptions, we can use a deterministic variant of the algorithm presented in [3] to solve the above described two-hop graph coloring problem for ring i. For this algorithm, each node in ring i maintains a set P (the *palette*) of available colors, which initially contains $1...C$. The algorithm proceeds in rounds. In each round, every node in ring i selects an arbitrary color c from its palette P. Some nodes may have selected conflicting colors. For each possible color, at most one node in a two-hop neighborhood is allowed to keep its color. All other nodes must reject the color and remove it from P. The process of selecting nodes that keep their color is implemented by using the parallel MAX operation described in Section 4 where at most one node is chosen from a two-hop neighborhood. As a unique value, a 16-bit MAC address can be used.

The algorithm requires at most C rounds. It is important to note that this algorithm can be performed by every fourth ring in parallel, hence, the whole network can be colored in $4C$ rounds.

8 Further Issues

There are several further issues that cannot be described in detail in this extended abstract. Some are explored in the full paper [7], for example, time synchronization, dealing with bit errors, and topology changes. In [7] we also analyze setup time and energy efficiency of the protocol. Other issues will be evaluated in future experiments such as robustness against interference and link fluctuations.

9 Conclusion

We have presented BitMAC, a deterministic, collision-free, and robust protocol for dense wireless sensor networks. BitMAC is based on an "or" channel, where synchronized senders can transmit concurrently, such that a receiver hears the bitwise "or" of the transmissions.

10 Acknowledgments

The work presented in this paper was supported (in part) by the National Competence Center in Research on Mobile Information and Communication Systems (NCCR-MICS), a center supported by the Swiss National Science Foundation under grant number 5005-67322.

References

1. R. Beckwith, D. Teibel, and P. Bowen. Pervasive Computing and Proactive Agriculture. In *Adjunct Proc. PERVASIVE 2004*, Vienna, Austria, April 2004.
2. C. Intanagonwiwat, R. Govindan, and D. Estrin. Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks. In *6th Intl. Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2000)*, Boston, USA, August 2000.
3. Öjvind Johannson. Simple Distributed $\Delta + 1$ Coloring of Graphs. *Information Processing Letters*, 70:229–232, 1999.
4. C. Kappler and G. Riegel. A Real-World, Simple Wireless Sensor Network for Monitoring Electrical Energy Consumption. In *EWSN 2004*, Berlin, Germany, January 2004.
5. S. R. Madden, M. J. Franklin, J. M. Hellerstein, and W. Hong. TAG: a Tiny Aggregation Service for Ad-Hoc Sensor Networks. In *OSDI 2002*, Boston, USA, December 2002.
6. R. Riem-Vis. Cold Chain Management using an Ultra Low Power Wireless Sensor Network. In *WAMES 2004*, Boston, USA, June 2004.
7. M. Ringwald and K. Römer. BitMAC: A Deterministic, Collision-Free, and Robust MAC Protocol for Sensor Networks. In *EWSN 2005*, Istanbul, Turkey, January 2005.
8. R. Szewczyk, J. Polastre, A. Mainwaring, and D. Culler. Lessons from a Sensor Network Expedition. In *EWSN 2004*, Berlin, Germany, January 2004.

Energy Reduction Strategies for Sensor-Node-on-a-Chip The SNoC Project at the University of Freiburg

Y.Manoli, S.Ramachandran, S.Jayapal, S.Bhutada, R.Huang

Institute of Microsystem Technology (IMTEK),
Chair of Microelectronics,
University of Freiburg, Germany.
{manoli@imtek.de}

1 Introduction

A wireless sensor network is a cluster of sensor nodes communicating with each other, for collecting, processing and distributing data. Each sensor node consists of sensors, data converters, a processor, power management unit, radio for wireless communication and networking. Wireless sensor networks have a wide range of applications like air traffic control, video surveillance, industrial and manufacturing automation, distributed robotics, smart textiles, building, structure as well as environmental monitoring etc. A wireless sensor network may be small or large depending on the application requirements. However, the ubiquitous wireless network of micro-sensors is changing the world of sensing, computation and communications.

The goal of the SNoC project at University of Freiburg is to develop energy reduction strategies and to design all the necessary electronics of a sensor node on a single chip thus ensuring a low power operation of the system while also reducing the overall size of the node.

1.1 Sensor Node on a Chip

The general architecture of a sensor node is shown in figure (1). It has one or more sensors, an application specific dedicated logic unit to process and control the data, a RF modem with DSP engine to send and receive message to and from other sensor nodes or base station in the network and a battery or other energy source to provide power for all execution units on the node.

These different building blocks can be implemented using standard off-the-shelf components. This provides the flexibility of rapidly implementing a system prototype. But commercially available sensor nodes are not always optimized for power. Although most micro-controllers have various power-down and idle modes they still tend to consume large amounts of power. Even at a moderate speed of

1 MHz they require microwatts of power in the power down and milliwatts in the active mode [1]. These general purpose devices are designed with flexibility in mind and less for low-power requirements. They include a number of functional units (serial and parallel interfaces, keyboard and display control etc) that in the context of a sensor node might not be required but still contribute to the power consumption.

Designing a dedicated chip on the other hand allows the optimization of the architecture for low-power requirements. This mixed signal system can include sensor interface electronics leading to greater area and power savings. One disadvantage is of-course the longer design time. For evaluation purposes FPGA and FPAA solutions can be implemented providing the functionality but of-course at a much higher power level.

The following sections discuss different possibilities of energy reduction in the computation and communication modules.

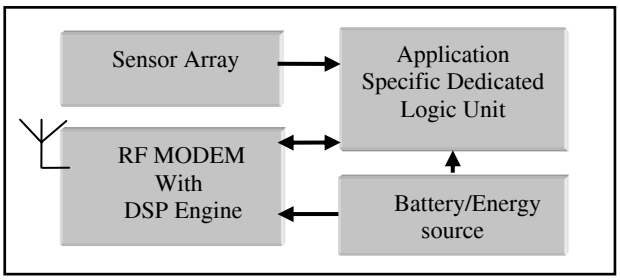


Figure 1. General architecture of SNoC.

2. **Energy Reduction at different Levels of Abstraction**

Optimization of power can be done at different levels of abstraction viz., behavioural, architectural and logical or physical levels. In the behavioural and architectural level optimization can bring 10% to 90% power savings [2]. This is because any changes made at this level will be reflected at the lower levels of abstraction. So a very careful design of each and every module is necessary. Dedicated hardware for low level tasks and careful use of software for high level tasks reduces the energy at the architectural level while dynamic energy scaling schemes reduce the power at the logic and circuit level.

This section describes the Characteristics of Sensor-Node-On-a-Chip, the hardware software co-design methodology and energy efficient LSI design in sections (2.1), (2.2) and (2.3) respectively.

2.1 Characteristics of SNoC:

There are many challenges to be faced in designing energy efficient computation and communication building blocks and developing algorithms for adhoc networking for wireless sensor nodes. The first challenge is that all nodes are energy constrained. So, if the numbers of nodes are increased, it becomes infeasible to replace all of the batteries of the sensors. To prolong the lifetime of the sensor nodes, all aspects of the sensor system operation should be energy efficient. So, the energy requirement depends on the state of operation, like standby or active mode and the nature of applications. But, in most of the applications, the standby mode will be longer than the active operating time (Figure 2).

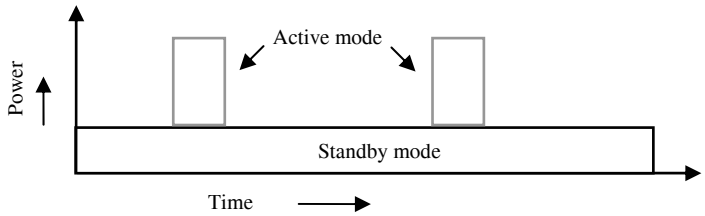


Figure 2. Power required versus operating time

A wireless sensor network node is a system which has long idle times. This means that the node in the network does not accumulate, send or receive data very often. Most of the time the system can be in the sleep state. When there is a request from other nodes or from the sensors on the system then only a part of the system wakes up, executes some task and goes to sleep again. When a sensor on a node reads some new value from the environment it does not necessarily transmit the data to the master node or any other node in the network, unless the data is critical. The system can ignore the new data or can store it for future transmission.

The node has a number of different operating modes for reducing the power consumption. As mentioned above the wake-up/active time is much less than the sleep/power down time. This forces the design of SNoC to be also optimized for the sleep state power consumption. A number of different sleep modes maintain only the blocks required for a specific background task active. Dedicated sensor data acquisition hardware collect data or compare them to critical values without the intervention of the central processing unit.

A novel microprocessor architecture, which was especially designed to reduce power dissipation of modern system-on-a-chip, was introduced in [3]. This paper introduces new type of data storage files and hardware supported constant elimination to utilize the mostly local scope of common arithmetic operations for reducing energy. A multi-level instruction-cache scheme together with a cache controller supporting sophisticated opcode pre-processing operations like Huffmann decoding decreases the amount of external memory access and size. Additionally the width of pointers is significantly reduced by a table-lookup cache miss concept. Finally a

segmented gray-code program counter decreases the switching activity on the address bus by an average of 25-30% [4].

2.2 Hardware software co-design approach

Due to the growing complexity of embedded systems new design methodologies and concepts are mandatory. First of all, the design process must be shifted towards higher levels of abstraction. Therefore a focus is set upon a system-level design methodology. The section (2.2) shows an approach to hardware-software co-design for design of low power Wireless sensor nodes.

Co-design may include integrated synthesis of hardware and software components, which we refer to as hardware/software co-synthesis [5]. Automated hardware/software co-synthesis may allow the designer to explore more of the design space by dynamically reconfiguring the hardware and software to find the best overall organization as the design evolves. This can lead to better results than could be achieved if the hardware and software architectures had to be specified up-front, during the early stages of the design.

Design tools for hardware/software co-synthesis must understand the relationship between the hardware and software organization and how design decisions in one domain affect the options available in the other. It also requires an understanding of how the overall system cost and performance are affected by the hardware and software organization.

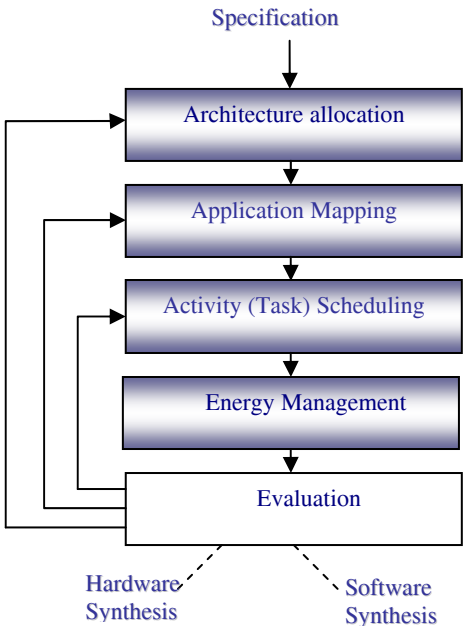


Figure 3. System-Level Co-Synthesis flow

Co-synthesis is the process of deriving a mixed hardware-software implementation from an abstract functional specification of the system. To achieve this goal, the co-synthesis needs to address four fundamental design problems: architecture allocation, application mapping, and task scheduling and most important in this case energy management [6]. Figure (3) shows the co-synthesis flow in diagrammatic form. The energy management techniques we can apply to wireless sensor nodes is dynamic voltage scaling and optimizing each step for energy, area and cost, then evaluating and going back to steps in the flow. After evaluation of the system according to the requirements, we can finally proceed to hardware and software synthesis.

2.3. Energy Efficient Large Scale Integration Unit.

The process technology scaling requires a reduction of the supply voltage and threshold voltage. In the nanometer regime, the static leakage power component starts dominating the switching power in the highly integrated applications [7]. Due to the technology limitations, designing energy efficient Microsystems in deep sub micron technologies becomes a challenging task. Sections (2.3.1) and (2.3.2) discuss how energy reduction techniques can be implemented in an autonomous wireless sensor node. Figure (2) shows that a major portion of the precious battery lifetime is mostly wasted in standby mode. So, designing a system which reduces both the standby and active power is most important for the wireless sensor node.

2.3.1 Energy Constrained Sensor System

Energy efficient LSI design maximizes the useful lifetime of the battery source, by adjusting the supply and threshold voltage. The supply voltage scaling is a well known method of reducing the energy per operation with or without performance penalty based on the application requirements. For autonomous wireless sensor systems, the energy is usually much more important than performance requirements [8]. So, the total energy requirements depends on the state of operation as shown

Total Energy = f (E [active mode], E [standby mode])	(1)

To reduce the total energy, both active and standby mode energy reduction is necessary. The proposed architecture is discussed in detailed in section (2.3.2)

2.3.2 Dynamic Energy Scaling

We propose the dynamic energy scaling (DES) technique by which the supply and threshold voltage is varied by constantly maintaining the performance of the system for burst mode computation based on the temperature and process variations. The change in the threshold voltage depending on the change in the supply voltage results in a constant performance with less switching power. The threshold voltage varies either due to the ambient temperature or by process variations. By employing a body

bias potential, the active and standby power can be reduced at the lowest possible value at an optimal performance.

The conventional dynamic voltage scaling technique reduces the supply voltage based on the performance demands, but it does not taken into account the leakage power and ambient temperature [9]. In our DES scheme, energy is altered dynamically based on the fixed performance and process variations. This technique leads to switching and standby energy reduction as shown in Figure (4)

During the active mode of operation, the supply voltage is reduced while the threshold voltage is also reduced by changing the forward body voltage thus maintaining the performance of the system constant. Through this technique, the switching power of the system is decreased while maintaining the same performance as with a high supply voltage and still having the leakage power at a low level.

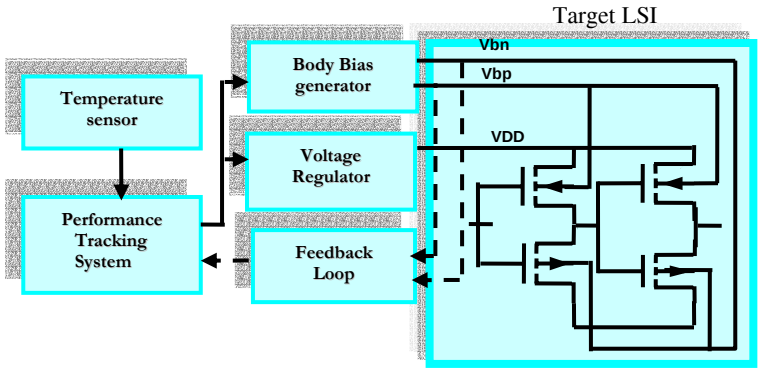


Figure.4. Dynamic Energy Scaling

During the standby mode, withdrawing the body bias voltage or even applying a reverse body bias increases the threshold voltage which in turn reduces the standby leakage power of the sensor system.

3. Communication module

The communication is a very important design issue in a wireless sensor network (WSN) because it primarily determines the reliability of network connections and data exchanging between different nodes. Moreover it consumes much energy for data and message exchanging. There are many variations for the wireless communication means which can be used in WSN. They are electromagnetic (EM) wave, magnetic field, ultra sonic and optics. These methods are suitable for different application scenarios according to their properties.

Radio frequency (RF) has many advantages over other transmission means. Simplicity for transmitting and receiving is obvious. The signal which is propagated in space can be transmitted to and received by antenna, which is as simple as a metal wire or different shapes of metal structures. RF can use a wide range of frequencies,

theoretically from zero to infra-red. Therefore, the bandwidth of RF is much wider than the ultra sonic and magnetic field. RF can also penetrate many obstacles and can transmit a very long distance by an electromagnetic energy.

In WSN, as in commercial mobile networks, it is very important to develop a technique to avoid interference between communication links. Generally, different radio resource management plans can be used to share the limited frequency spectrum. For instance, frequency-division-multiple-access isolates different communication links to specific frequency bands to avoid the interference. Likewise, time-division-multiple-access separates different communication links in different time slots. Code-division-multiple-access, a more advanced technique, overcomes the interference between communication links by allocating different spread spectrum sequences to different units. In present years, space division technology, which uses the smart antenna, is an interesting research topic. Although this technology needs more complex circuits and antenna structures, it seems to give some promising features to WSN, such as localization and route computing [10] [11].

These various technologies are always implemented in different specifications. As shown in the table 1, there are 3 different protocols which are being or can be used in wireless personal area network (WPAN) and also are a good choice for the WSN. Bluetooth is popularly used in wireless sensor network because much hardware and software are available from many companies. However, this protocol is not designed for the low data rate scenario and WSN, as claimed by the ZigBee developers and its power efficiency is not sufficient as required by a wireless sensor network. ZigBee is especially designed for low data rate wireless personal area network and uses IEEE 802.15.4 protocol as physical and MAC layer specification. ZigBee seems to be a good candidate for the wireless sensor network and it attracts more and more attention from different companies and institutes. Ultra wide band is a new technology which is just appearing. The specific modulation scheme of ultra wide band is still undefined. Furthermore, the interference from ultra wide band to other electronic modules, for instance GPS, is still under research. Table 1 summarizes different protocols' specifications.

In WSN, the energy efficiency is an important design issue. Therefore, the system design and circuit design is optimized for low power while maintaining the necessary performance. Bearing this in mind, the system uses the receive signal strength indication in the receiver node and programmable power amplifier in the transmission node to control the transmission power for different communication ranges. The system also uses RF energy detection circuit to monitor the received signal and wake up the node control system when the signal is over the control threshold level set by the software.

4. Conclusion

This paper has discussed the Sensor-Node-On-a-Chip project at the Albert-Ludwig-University, Freiburg. It has been shown that an application specific design using dedicated hardware for the low level tasks and careful use of software for high

level tasks can reduce the power consumption at the architectural level. An optimized communication link as well as dynamic voltage scaling can reduce the power at the logic and circuit level.

Table 1. Different communication protocols and their specifications

Protocols	Frequency (MHz)	Modulation	Channel Bandwidth (MHz)	Channels	Data rate (kb/s)
Bluetooth	2400-2483.5	GFSK	1	79	765
ZigBee	2400-2483.5	O-QPSK	5	16	250
	902-928	BPSK	2	10	40
	868-868.6	BPSK	1	1	20
Ultra-Wide Band	3100-10600	Un-defined	3000	1	100,000

References

[1]Gerald Kupris, Freescale solution for IEEE 802.15.4/Zigbee June 2004, IEEE802.15.4/zigbee workshop, Loerach, Germany

[2]Gailhard, N.Julien, J.-Ph.Diguert, E.Martin, How to transform an Architectural Synthesis tool for Low Power VLSI Designs

[3]Hakenes, R., Manoli, *Y.*A Segmented Gray Code for Low-Power Microcontroller Address Buses EUROMICRO 99, Workshop on Digital System Design, 1999. EUROMICRO 99. Proceedings. Volume 1, 1999, 240-243

[4]Hakenes,R.,Manoli,Y. A Novel Low Power Microprocessor Architecture International Conference on Computer Design (2000) Proceedings, 2000, 141-146

[5]Jay K. Adams, Donald E. Thomas The Design of Mixed Hardware/Software Systems in proc.33rd DAC'96, 1996.

[6]M. T. Schmitz, B. M. Al-Hashimi, P. Eles, System-level design techniques for energy-efficient embedded systems Kluwer Academic Publishers, Feb. 2004.

[7]Shekhar Borkar**,** Intel Fellow and Director, Intel Corp., Hillsboro, OR Low-Voltage Design for Portable Systems, *IEEE I* ISSCC 2002.

[8]Ian F.Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Erdal Cayirci, A survey on Sensor Networks IEEE Commmunication magazine 2002

[9]T.Burd, T.Pering,A.Stratakos,R.Brodersen, A Dynamic Voltage-Scaled Microprocessor System, 2000 IEEE International Solid-State Circuits Confreence Digest of Technical Papers, Feb 2000.

[10]Huang R., Manoli Y., Power Efficiency in Wireless Sensor Networks using Directional Antennas , VDE-Kongress 2004 Conference on Ambient Intelligence, Berlin, 2004

[11]Huang R., Manoli Y., Phased Array and Adaptive Antenna Transceivers in Wireless Sensor Networks, EUROMICRO Symposium on Digital System Design (DSD 2004), Renne, France, 2004,

Deployment Support for Wireless Sensor Networks

Matthias Dyer, Jan Beutel, and Lennart Meier

Computer Engineering and Networks Laboratory, ETH Zurich, Switzerland
{dyer,beutel,meier}@tik.ee.ethz.ch

Abstract. We present the concept of Deployment-Support Networks (DSN), a tool for the coordinated deployment of distributed sensor networks. A DSN supports the development, debugging, monitoring, and testing of sensor–network algorithms and applications. With our implementation of the DSN on the BTnode rev3 platform, we have proven that the concept scales well to a large number of nodes.

1 Introduction

The recent focus on wireless sensor networks (WSNs) has brought about many different platforms such as the BTnodes [1] or the Berkeley Motes [2]. Researchers are successfully using these platforms in the development of a multitude of sensor-network applications and in the deployment of demonstrators. However, setups with more than 10–20 nodes have shown to be hard to manage, especially when situated in a realistic physical environment.

The key problem is the lack of appropriate support tools for large numbers of distributed devices. Coordinated methods for testing, monitoring, programming, and debugging of WSN applications in realistic scenarios are missing so far. Existing methods commonly used for developing and testing embedded systems are not sufficient for WSNs since they do not meet the new requirements.

A step in the right direction are the simulators [3] and testbeds [4] that have been built for WSNs. Simulators abstract the WSN hardware. They incorporate a more or less accurate model of the computation and communication and are very useful in the early phase of development where basic concepts of collaborative applications and protocols need to be tested. However, for more complex and advanced development, the models used in simulators are often too simplistic [5]. For this reason, researchers have built testbeds with real devices. Existing testbeds consist of a collection of sensor nodes that are connected to a fixed infrastructure, such as serial cables or ethernet boxes. Testbeds are more realistic than simulators because they use the real devices and communication channels. The problem that remains is that the conditions in the field where the WSN should be deployed in the end can be significantly different from the testbed in a laboratory. In particular, with a cable-based infrastructure it is impossible to test the application with a large number of nodes out in the field.

To address these issues, we present the deployment-support network (DSN), a tool for developing, testing, programming, and monitoring WSNs in a realistic

environment. The term *deployment support*, as it is used in this paper, does not only stand for supporting the act of deploying nodes in the field, but for the whole process of development and testing in the field.

2 Deployment Support Network

The main idea of the DSN is to replace the cable based infrastructure of the testbeds with a wireless infrastructure. This is achieved by attaching the sensor node to a wireless embedded node, the DSN-node. The DSN–nodes form a self-maintained network that provides deployment support services. This network is referred to as *Deployment-Support Network* (see Fig. 1). The DSN does not replace the WSN that is used for the application. DSN and WSN coexist during the development phase. When this phase is completed, the DSN nodes are not needed anymore and are detached from the sensor nodes.

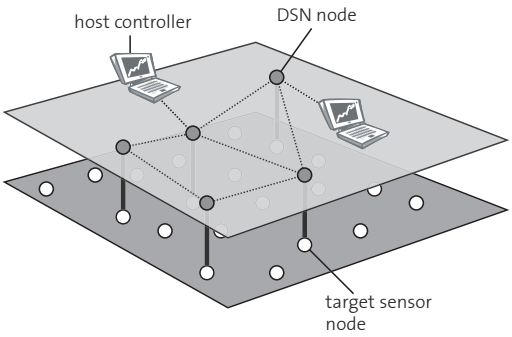


Fig. 1. Abstract view of a DSN

Fig. 2. The BTnode rev.3 platform.

Conceptually, there are many services that can be offered by a DSN. However, we concentrate here on four services that we believe are the most important.

Wireless Node Access: As a general service, the DSN provides access to the sensor nodes with a wireless backbone network. One or more host computer are used to connect to the network and to communicate with the target sensor nodes. This service includes algorithms for the construction and maintenance of a network, the networking services and protocols such as broadcast and multi-hop transport and higher-level services such as finding nodes and obtaining information on the topology.

Serial Tunnel: The DSN replaces the serial cables. It offers a serial connection from a host computer to a target sensor node. More than one connection can be used simultaneously, but the maximal throughput of the backbone network limits the traffic on shared links. The multi-purpose serial connections

are widely accepted as standard I/O for sensor nodes. Having the serial connection tunneled over a wireless network allows the host controller to communicate with the sensor nodes as over a serial cable. Possible applications that use this service are, e.g., remote debugging, interactive terminal sessions, or any application-specific serial data transport.

Target (Re)Programming: Remote programming is important since the software running on the target sensor nodes is still under development and many test cycles with small updates are needed. With this service, the sensor nodes can remain deployed while being reprogrammed.

Event-based Monitoring: While the serial tunnel is a connection-oriented service, event-based monitoring is connectionless. Triggered by the sensor nodes, the DSN nodes send events to a host controller.

Alternatively, the described services could be implemented on the sensor nodes themselves, and instead of using the DSN, the existing wireless network could be used to transport debug, monitoring, and control information. The benefit of the DSN in over this alternative or a cable-based solution are obvious:

- The DSN and the WSN have different requirements on the wireless interface. WSNs are optimized for energy efficiency. The WSN has to meet the bandwidth requirement of the application which is typically reported as being in the order of 10 kbps. A DSN node can afford a more powerful wireless interface that is optimized for deployment support.
- The WSN cannot be used to reliably transport debug and control information when the application and protocols on the sensor node are still under development.
- Using the WSN for remote programming is dangerous as nodes can become unreachable if the programming fails or the new program version is erroneous. Because the DSN nodes are not reprogrammed, they are always reachable and can reprogram the sensor node at any time.
- The DSN nodes are small and battery-operated. Therefore they can easily be deployed almost everywhere. The logistical overhead of deploying a WSN with a DSN is minimal.
- The DSN solution scales well to a large number of nodes. The DSN bandwidth limits the number of concurrently active connections and not the number of nodes in the DSN in general.
- The DSN services unburden the sensor nodes. Less debugging and control code has to be implemented on a sensor node if it is attached to a DSN node.

3 Implementation and Results

We have implemented a prototype of a DSN on the BTnode rev3 platform (see Fig. 2). We use Bluetooth as the wireless interface for the DSN. A distributed topology-control algorithm has been implemented that forms and maintains automatically a tree-based topology with all reachable DSN nodes. The networking

services are implemented in a multi-hop middleware layer. On top of this middleware are the services that handle the serial tunnels and monitor the target sensor node. Our BTnut system software consists of a port of the embedded multi-threaded OS "Ethernut" and a Bluetooth stack.

The host computer runs a monitoring and control tool with which the engineer can obtain information on the topology, control the nodes, or open and close serial tunnels.

In a case study [6] we have measured parameters of our prototype such as the delay per hop on serial tunnels and the initial-topology-construction speed. The measurements are performed on automatically formed networks with up to 71 BTnodes. To our knowledge, these are the largest connected Bluetooth networks that have been reported so far.

4 Conclusion

With the concept of a deployment-support network, we have introduced a valuable tool for the coordinated deployment of distributed sensor networks. In contrast to existing test setups in laboratories, the DSN approach allows large-scale deployment without losing the ability to observe and control all nodes and without the burden of fixed, wired infrastructure or changes to the target system. Scalable communication to large populations of WSN target devices embedded in their designated physical environment will allow to investigate the performance of live sensor systems to enable detailed comparisons and validation.

References

1. Beutel, J., Kasten, O., Mattern, F., Römer, K., Siegemund, F., Thiele, L.: Prototyping wireless sensor network applications with BTnodes. In: Proc. 1st European Workshop on Sensor Networks (EWSN 2004). Volume 2920 of Lecture Notes in Computer Science., Springer, Berlin (2004) 323–338
2. Hill, J., Culler, D.: Mica: A wireless platform for deeply embedded networks. IEEE Micro **22** (2002) 12–24
3. Levis, P., Lee, N., Welsh, M., Culler, D.: TOSSIM: Accurate and scalable simulation of entire TinyOS applications. In: Proc. of the 1st int'l conference on Embedded networked sensor systems (SenSys), ACM Press, New York (2003) 126–137
4. Girod, L., Elson, J., Cerpa, A., Stathapopoulos, T., Ramananthan, N., Estrin, D.: EmStar: A software environment for developing and deploying wireless sensor networks. In: Proc. USENIX 2004 Annual Tech. Conf. (2004) 283–296
5. Kotz, D., Newport, C., Gray, R., Liu, J., Yuan, Y., Elliott, C.: Experimental evaluation of wireless simulation assumptions. In: Int'l Workshop Modeling Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM), ACM Press, New York (2004) to appear
6. Beutel, J., Dyer, M., Meier, L., Thiele, L.: Scalable topology control for deployment-support networks. In: The Fourth International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN). (2005) to appear

A Platform for Lab Exercises in Sensor Networks

Thomas Fuhrmann[1] and Till Harbaum[2]

[1] IBDS System Architecture, Universität Karlsruhe (TH), Germany
[2] Beecon GmbH, Haid- und Neu-Str. 7, 76131 Karlsruhe, Germany
fuhrmann@ira.uka.de, harbaum@beecon.de

Abstract. Programming of and experiences with sensor network nodes are about to enter the curricula of technical universities. Often however, practical obstacles complicate the implementation of a didactic concept. In this paper we present our approach that uses a Java virtual machine to decouple experiments with algorithm and protocol concepts from the odds of embedded system programming. This concept enables students to load Java classes via an SD-card into a sensor node. An LC display provides detailed information if the program aborts due to bugs.

1 Introduction

Sensor networks are about to leave the forefront of research in distributed systems and become a standard topic that is taught both in lectures and laboratory exercises. Those of us who have been promoting research in sensor networks for the last years are well acquainted with the various devices that are used for sensor network prototypes. But those whose core skills are outside the field of low-power embedded devices often struggle with the odds that come with such tiny devices.

About a year ago, while preparing a lab-course on telematics at the University of Lübeck (Germany) we have begun to develop a new approach that makes experiments with sensor networks more easy. This workshop presentation reports on our experiences with that platform. Its focus lies hence more on the didactic aspects and their practical realization than on the study of novel aspects in sensor networks in general.

Sensor network platforms for research are abundant [1][2][3]. Typically, these platforms need to be time consumingly flashed with a code monolith consisting of low-level operating system code, the networking stack, and the respective networked application. This monolithic approach leads to a rather slow development cycle. Moreover, bugs in one part of the code can affect the entire system. And often such systems crash without a direct trace to the cause of the malfunction.

All this renders the typical sensor network platforms ill suited for didactic purposes. Accordingly, we devised an improved platform for our lab-course that is based on our previous *microblue*[1] platform [4], but is easily handled even by unexperienced students. Key ingredient is a small Java virtual machine that implements a subset of the Java 2 standard edition, much like the Java 2 micro edition does [5]. The board (cf. fig 1) provides a small 2×16 LC display, four keys, and an SD-card slot. It can be equipped

[1] The microblue stack is commercially sold by Beecon GmbH, a spin-off of the Karlsruhe university. Microblue is used by customers both in academia and industry.

with an 868 MHz radio transceiver, a Bluetooth module, or up to two RS232 compliant sub-D connectors.

The following sections describe the didactic rationale behind our design (sec 2), the architectural features that were implemented so far (sec 3), and first experiences with our platform (sec 4).

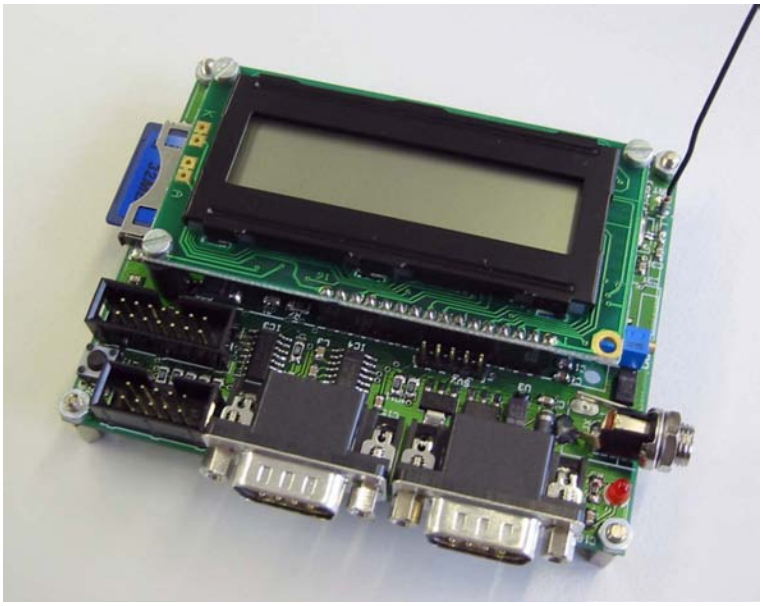


Fig. 1. The sensor network board used in the lab-course at the University of Lübeck

2 Design for Didactics

The lab-course's ancestor was a summer school taught by one of the authors in 2000. There, the students had to design and implement an entire protocol stack in Java that used the serial ports of desktop PCs to create a functional toy network. This course was refined over the years.

The didactic concept of the course is to divide the material into small units, each of which can be handled by one student. Typical units are e.g. an error detection method, an access mechanism to a shared medium, or a routing algorithm. The theoretical basis for each unit is presented in a talk by an individual student who also distributes hand-outs. Subsequently the students form teams who implement the different layers of the protocol stack. One goal besides the implementation work itself, is for the students to understand the role of interfaces and to create a clear design of reusable code modules

for the various aspects of the protocols. Finally, the students can compare the different implementations, algorithms and protocols based on actual measurements of their implementations.

This didactic concept created the need to provide a sensor networking platform that supports a modularized software development approach. The students should be able to immediately use a sensor node and substitute individual modules in a given stack with their own implementation as they go along with the course. Especially, should they be able to work with a complete system whose components they can use and replace, without understanding the entire system and without seeing the source code. Errors should be confined and localized as far as possible.

Java has been found to be the best suited language for that course, since many students already had experiences in Java programming, especially with tools like, e.g. JBuilder or Eclipse. Moreover, the fact that exceptions indicated the source code line where they occurred is considered most valuable by the students.

3 Architecture of the Platform

As a consequence of these requirements, we investigated the possibilities to use Java on a small sensor network platform. This has in fact proven feasible. In detail our solution provides the following architectural features:

- By using Java as sole programming means for the user of a node, we were able to separate the node's operating system from the protocol implementation. The Java byte code is inserted into the node via an SD-card. Thus there is no need to flash the microcontroller during the lab-course.
- Exceptions that occur during execution of the Java code are displayed as text message on the node's LC display. If the byte code contains debug information, these messages indicate the source file and the line where the exception originated. Users can scroll through the stack trace if necessary.
- The Java virtual machine (VM) supports multi-threading and thus simplifies many aspects of network programming. All *java.lang* classes that were ported to the node are thread safe.
- Heap memory can be accessed via *new*. Abandoned memory is automatically garbage collected.
- The low level communication interfaces (868 MHz, L2CAP Bluetooth, and RS232 serial) can be reached via simple octet-streams. According to the design goal of the system all protocol aspects have to be implemented in Java.
- Sensor interfaces (e.g. the microcontrollers analog ports) are reached with simple Java wrapper classes.

Altogether, the resulting system is easily used even by unexperienced students. The Java implementation can be coded, compiled and tested on any PC. Then the Java *class* files are simply copied to an SD-card that is inserted into the sensor node. The code is parsed and executed upon reset of the node.

The following section reports on the experiences gained from the implementation and first tests of the new platform.

4 Experiences, Conclusions, and Outlook

Even though the envisaged application of the nodes requires only limited capabilities, this design challenges the limits of our ATmega microcontroller. At 8 MHz the node can on average perform only about 100 000 byte code instructions per second. Heap operations, especially the garbage collection, further consume CPU resources. Nevertheless, this is sufficient for the didactic purpose of the platform.

In order to allow for different (and maybe inefficient) implementations, the board provides 512 KB external RAM, e.g. as heap memory. We currently extend the VM to access this memory via bank switching.

The most pressing problem turned out to be the flash memory. Both the VM and our Bluetooth stack alone easily fit into the 128 KB limit, but we have to engineer hard to fit both into that space at the same time. Currently, we explore modifications of the VM design that we hope can ease that situation.

Applicationwise, we consider our platform a success. We found that the combination of actual sensor node hardware with a simple Java programming approach intensifies the learning experience. Students have a greater freedom than with ready-made equipment. Still there is full freedom for own implementations without the need to get acquainted to the odds of embedded system programming.

References

1. Hill, J., Szewczyk, R., Woo, A., Hollar, S., Culler, D., Pister, K.: System Architecture Directions for Networked Sensors. In: Proceedings of the 9th Int. Conf. Architectural Support Programming Languages and Operating Systems (ASPLOS-IX). (2000) 93–104
2. Beigl, M., Gellersen, H.: Smart-Its – An Embedded Platform for Smart Objects. In: Proceedings of the Smart Objects Conference (SOC 2003), Grenoble, France (2003)
3. Beutel, J., Kasten, O., Mattern, F., Römer, K., Siegemund, F., Thiele, L.: Prototyping Wireless Sensor Network Applications with BTnodes. In: Proceedings of the IEEE European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN) 2004, Berlin, Germany (2004) 323–338
4. Fuhrmann, T., Harbaum, T.: Bluetooth für Kleinstgeräte. In: Proceedings of the Telematik Fachtagung, Siegen, Germany (2003)
5. Topley, K.: J2ME in a Nutshell. O'Reilly (2002)

Leistungsstarkes Softwaresystem zur Steuerung von großen drahtlosen Sensornetzwerken

Jan Blumenthal, Frank Reichenbach, Dirk Timmermann

Institut für Angewandte Mikroelektronik und Datentechnik
Universität Rostock, Richard-Wagner-Str. 31
18119, Rostock, Deutschland
{jan.blumenthal, frank.reichenbach, dirk.timmermann}
@uni-rostock.de
http://www.sensornetworks.org

Abstrakt. In diesem technischen Bericht beschreiben wir ein umfangreiches Softwaresystem zur Steuerung von drahtlosen Sensornetzwerken. Dieses besteht aus den Komponenten SeNeTs, EnviSense und der hardwareabhängigen Sensorknotensoftware.
SeNeTs ist eine leistungsfähige Softwareumgebung zum Testen und Administrieren von Applikationen für große Sensornetzwerke. EnviSense ist das grafische Frontend des Softwaresystems, mit dem eine übersichtliche Bedienung und Konfiguration von SeNeTs oder der Sensorknotensoftware erzielt werden. Alle drei vorgestellten Komponenten sind zudem autark lauffähig.

1 Einleitung

Applikationen und Protokolle für drahtlose Sensornetzwerke erfordern neuartige Programmiertechniken und Ansätze zum Testen und Administrieren. Sensorknoten müssen in der Praxis eine längere Zeit selbstständig arbeiten können [1]. Der Schlüsselfaktor dafür besteht in der frühzeitigen Selektion der sinnvollen Informationen aus der gesamten Informationsmenge zur Vermeidung eines unnötig hohen Netzwerkverkehrs. Im Kontrast dazu benötigt der Entwickler während der Implementierungs- und Testphase so viele Informationen wie möglich aus dem Netzwerk. Eine Test- und Administrierungsumgebung für Sensornetzwerk-Applikationen hat die Primäraufgabe, dies zu gewährleisten.
Wir präsentieren ein Softwaresystem zur Steuerung von drahtlosen Sensornetzwerken bestehend aus drei Teilkomponenten. Abb. 1 gibt einen schematischen Überblick über das Softwaresystem mit seinen Teilkomponenten. Auf den Sensorknoten innerhalb des Sensornetzwerkes laufen die hardwareabhängigen Knotenanwendungen. Den Kern des Systems bildet SeNeTs [2], eine leistungsstarke Softwareumgebung zum Testen und Administrieren von Programmen und Algorithmen in Sensornetzwerken. Ein intuitives und umfangreiches Frontend namens EnviSense bietet eine benutzerfreundliche Schnittstelle zur Steuerung großer drahtloser Sensornetzwerke.

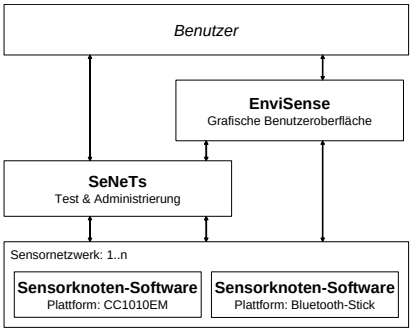


Abb. 1. Übersicht über die Teilkomponenten des Softwaresystems bestehend aus EnviSense, SeNeTs und der Sensorknotenanwendung.

2 Verwandte Arbeiten

In den letzten Jahren starteten zahlreiche Forschungsprojekte mit dem Ziel, den Entwicklungsprozess von Software für drahtlose Sensornetzwerke zu vereinfachen. EmStar ist ein Linux-basiertes Framework [3], [4]. Es unterstützt drei Operationsmodi: „Pure Simulation“, „In-situ Deployment“ und einen „Hybrid Mode“, der beide miteinander kombiniert. SeNeTs und EmStar ähneln sich darin, dass beide den gleichen Quelltext zur Simulation und auf echten Sensorknoten nutzen. Trotzdem existieren einige wichtige Unterschiede: In EmStar werden der Simulationsmodus und der Hybridmodus von einem zentralen Server aus gesteuert. SeNeTs hingegen läuft auf verschiedenen verteilten Maschinen und ist dadurch skalierbarer. Des Weiteren ist EmStar-Quelltext an die Knotenhardware Mica-Mote gebunden [7]. Eine Erweiterung auf die Stargate-Plattform ist beabsichtigt. Im Kontrast dazu ist SeNeTs nicht an eine bestimmte Plattform gebunden.
Neben EmStar und SeNeTs existiert als Alternative TOSSIM, ein diskreter Ereignis-Simulator für TinyOS-Programme [5], [6]. Hinter TinyOS verbirgt sich ein Betriebssystem für drahtlose Sensornetzwerke. TinyOS-Programme können ohne Änderungen am Quelltext für TOSSIM kompiliert werden. Eine Portierung von Anwendungen auf andere Hardwareplattformen ist jedoch an die durch TinyOS unterstützten Plattformen limitiert.

3 SeNeTs – Test und Administrierung

SeNeTs ist eine Terminalanwendung, die es ermöglicht, heterogene drahtlose Sensornetzwerke zu administrieren. Sie nutzt dafür einen zweiten, unabhängigen Administrierungskanal – den sekundären Kommunikationskanal – über den jederzeit Sensorknotenanwendungen installiert, zurückgesetzt und neu gestartet werden können. Auf diese Weise können Knotenanwendungen überwacht und schrittweise ausgeführt werden ohne den Funkkanal (primärer Kommunikationskanal) des

Sensornetzwerkes und damit die Ausführung der Sensornetzwerkanwendung zu stören. SeNeTs eignet sich somit hervorragend für das Abfragen von Informationen, das Ausführen von Diensten auf Sensorknoten und Performancemessungen in kleinen Sensornetzwerken. Ein weiterer Vorteil von SeNeTs ist die zeitliche Ersparnis durch die automatisierte und parallele Installation von Anwendungen auf Sensorknoten.

4 EnviSense – Grafische Benutzeroberfläche

Die Steuerung eines Sensornetzwerkes via Konsole ist aufwendig und wenig benutzerfreundlich. Aus diesem Grund entwickeln wir EnviSense [8]. EnviSense ist eine leistungsfähige grafische Benutzerschnittstelle zur übersichtlichen Steuerung und Kontrolle von großen Sensornetzwerken. Im Gegensatz zu SeNeTs verbindet sich EnviSense mit einem Sensornetzwerk ohne die Sensorknotenprogramme zu verändern oder zu beeinflussen. Die Aufgabe von EnviSense ist die Entlastung des Anwenders und des Entwicklers durch:

- Einfache Konfiguration des gesamten Netzwerkes oder einiger Knoten
- Vollständige grafische Übersicht über die verbundenen Sensorknoten
- Individuelle Anfragen auf Daten der Sensorknoten (Profile)
- Plugin-Schnittstelle für neue Sensorplattformen
- Anschluss an SeNeTs oder direkt an die Sensorknotenprogramme

In EnviSense sind alle Einstellungen in einem Arbeitsbereich definiert. Abb. 2 zeigt einen Screenshot von EnviSense mit dem Arbeitsbereich “DCP – Data Collection Protocol” unter Benutzung des SeNeTs-Backends [9]. Dieser Arbeitsbereich beinhaltet drei Sensornetzwerke: Bluetooth Network, Bluetooth (Pool) und Chipcon (Dike). Jedes dieser Netzwerke kann eigenständig oder in Verbindung mit anderen Netzwerken ausgeführt werden. Dadurch können verschiedene Sensornetzwerke verbunden werden und miteinander kommunizieren.

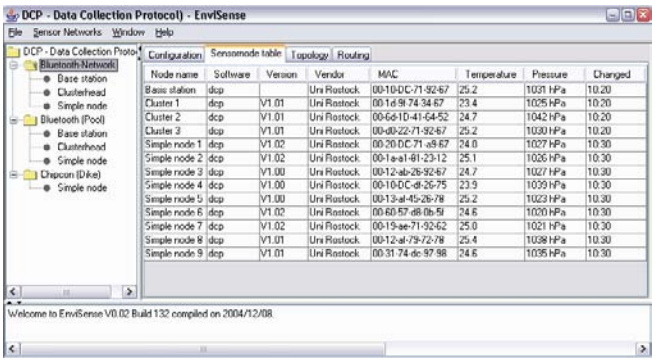


Abb. 2. Arbeitsbereich in EnviSense. Darstellung einer Tabelle der vorhandenen Sensorknoten und deren Attributen (Betriebssystem, Netzwerkadresse, Sensordaten etc.)

Um Sensorknoten zu administrieren, unterstützt EnviSense vordefinierte Knotenprofile, die individuell angepasst werden können. Knotenprofile bieten somit eine bestimmte Sicht auf das Netzwerk oder einzelne Knoten.
Um zukünftige Weiterentwicklungen zu unterstützen, ist der gesamte Arbeitsbereich in einer XML-Datei gespeichert. EnviSense ist in Java programmiert und kann dadurch als eingebettetes Applet in einem Browser oder als eigenständiges Programm ausgeführt werden.

5 Sensorknotensoftware – Steuerung der Hardware

SeNeTs verbindet sich mit einem Netzwerk über ein Gateway. Das Gateway besteht in unserer Testkonfiguration aus einem Sensorknoten (CC1010EM) auf einem Evaluierungsboard (C1010EB) [10]. Dadurch besitzt das Gateway einerseits eine Verbindung zum drahtlosen Sensornetzwerk und andererseits eine Verbindung zu einem Desktop-PC über die RS232-Schnittstelle. Beinhaltet die Knotenanwendung eine SeNeTs-Unterstützung kann sich SeNeTs mit den Knoten verbinden, um die Steuerung zu übernehmen.
Um die grafische Visualisierung mit EnviSense zu vereinfachen, wird für jede Sensorknotenhardware ein Profil als XML-Datei angelegt, die die Eigenschaften und die angebotenen Dienste definiert. Dies beinhaltet z.B. Kommunikationsparameter und die verfügbaren Sensorinformationen oder Attribute wie Betriebssystemversion oder den aktuellen Knotenzustand. Durch Importieren dieser Datei in EnviSense ist eine erfolgreiche Kommunikation mit den Sensorknoten möglich.

6 Zusammenfassung

Wir präsentieren ein Softwaresystem zur Steuerung von drahtlosen Sensornetzwerken. SeNeTs bildet dabei den Kern der Software und ermöglicht eine Administrierung von großen Sensornetzwerken. SeNeTs ist unabhängig von der eingesetzten Hardware der Sensorknoten. Es impliziert einen zweiten Kommunikationskanal (sekundärer Kommunikationskanal), um eine Überlastung des drahtlosen Übertragungsmediums (primärer Kommunikationskanal) durch Logging- und Administrierungsdaten zu verhindern. Dadurch können neue Knotenprogramme und Algorithmen zuverlässig getestet werden, was den damit verbundenen Entwicklungsprozess merklich beschleunigt.
Da der Zugriff auf SeNeTs nur konsolenbasiert möglich ist, entwickeln wir ein grafisches Frontend – EnviSense. Dadurch wird eine benutzerfreundliche Steuerung des Sensornetzwerkes ermöglicht. Es können netzinterne Vorgänge, wie z.B. der zurückgelegte Weg eines Paketes, visuell verfolgt oder bestimmte Ansichten auf Gruppen von Sensorknoten erstellt werden. Die Software schützt den Nutzer vor der im Netzwerk auftretenden hohen Informationsmenge und gewährleistet eine flexible Sicht auf das Wesentliche.

Literatur

1. J. Blumenthal, M. Handy, F. Golatowski, M. Haase und D. Timmermann: Wireless Sensor Networks - New Challenges in Software Engineering, Proceedings of 9th IEEE Int. Conf. on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Lissabon, Portugal, 2003.
2. SeNeTs-Projekt: http://www.senets.org.
3. J. Elson, S. Bien, N. Busek, V. Bychkovskiy, A. Cerpa, D. Ganesan, L. Girod, B. Greenstein, T. Schoellhammer, T. Stathopoulos und D. Estrin: “EmStar – An Environment for Developing Wireless Embedded Systems Software”, Technical Report CENS-TR-9, University of California, Los Angeles, Center for Embedded Networked Computing, März 2003.
4. L. Girod, J. Elson, A. Cerpa, T. Stathopoulos, N. Ramanathan und D. Estrin: “Em*: a software environment for developing and deploying wireless sensor networks”, to appear in the Proceedings of USENIX 04, also as CENS Technical Report 34.
5. P. Levis: “TOSSIM system description”, http://www.cs.berkeley.edu/~pal/research/tossim.html, Januar 2002.
6. Berkeley WEBS: “TinyOS”, http://today.cs.berkeley.edu/tos/, 2004.
7 Crossbow Technology: “http://www.xbow.com/Products/Wireless_Sensor_Networks.htm“, 2004.
8. EnviSense-Projekt: http://www.envisense.de.
9. M. Handy, J. Blumenthal, D. Timmermann: “Energy-Efficient Data Collection for Bluetooth-Based Sensor Networks”, IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Como, Italien, 2004.
10. Chipcon AS: http://www.chipcon.com/index.cfm?kat_id=2&subkat_id=12&dok_id=55, Januar 2005.

Application Development for Actuator- and Sensor-Networks

Andreas Ulbrich[1], Torben Weis[1], Gero Mühl[1], and Kurt Geihs[2]

[1] Technische Universität Berlin, Einsteinufer 17, 10587 Berlin
{ulbi,weis,gmuehl}@ivs.tu-berlin.de
[2] Universität Kassel, Wilhelmshöher Allee 73, 34121 Kassel
geihs@uni-kassel.de

Abstract. Actuator- and Sensor-Networks (AS-NET) are heterogeneous networks of sensors, actuators, and freely programmable devices. The high degree of heterogeneity and distribution, scarce resources, and the need to run autonomously make developing applications for AS-NETs very challenging. We propose a model-driven development approach for AS-NET applications. The paper discusses our application modeling language and the automatic implementation synthesis.

1 Introduction

Technological trends such as ubiquitous computing and ambient intelligence lead to heterogeneous networks of sensors, actuators, freely programmable devices, and non-programmable devices that use low priced radio communication to interact. This opens up new challenges and possibilities for application development. An application in this scenario ties together different devices and orchestrates their actions. Events trigger and influence the control flow of the application. For example the current TV channel can follow you as you move from room to room in your house. In this paper we discuss how applications for Actuator- and Sensor-Networks (AS-NET) can be developed and deployed. We propose a model-driven development approach for customized applications for heterogeneous networks of actuators and sensors.

The rest of the paper is structured as follows. To motivate our approach, we analyze challenges and state our objectives in section 2. Section 3 outlines the benefits of a model-driven approach and introduces our application modeling language. In section 4 we show how implementations are synthesized from the model.

2 Challenges and Objectives

Nodes of AS-NETs have *scarce resources*. Memory is measured in Kilobyte and many devices rely on battery and solar power. Software development must pay special attention to these resource conditions.

* The work presented in this paper is partially funded by Deutsche Telekom and Deutsche Telekom Stiftung.

Devices in AS-NETs are very *heterogeneous*. They range from embedded sensor boards, over smartphones and PDAs to powerful PCs. This also results in *different programming models*. The ESB [1] just offers a set of callbacks which must return within a guaranteed time. A smartphone on the other hand has a full fledged operating system with preemptive multi-threading.

AS-NETs expose all challenges of large *distributed* systems. The application developer knows little about the actual configuration of the system and typically programs against a moving target. Routing across the network is challenging due to resource restrictions and mobility. Applications have to deal with *unreliable communication and hardware*. It would be unacceptable if the application hung up because of a missing, duplicated, or corrupted message. Applications must expect the user to tinker with devices in the strangest ways possible. Nevertheless, the application should always be able to recover from any erroneous state.

Middleware can address some of these issues by providing appropriate abstractions through additional software layers. However, middleware trades off resource consumption for abstraction and programming convenience. Some devices might not even be capable of hosting a middleware layer. Therefore, application development for AS-NETs requires an extended *software development methodology and tools* in addition to existing software engineering techniques. We need programming abstractions that enable the application developer to program against the system as a whole. Tools have to deal with aspects of distribution, heterogeneity, constraint resources, and unreliability. These tools synthesize distributed implementations with a minimum footprint.

3 Application Modeling

In order to achieve our goals, we apply the principles of the OMG's Model-Driven Architecture (MDA). The MDA distinguishes two domains: the problem domain and the realization domain. The *problem domain* is only concerned with the application logic. In contrast, the *realization domain* is used to describe a concrete realization of the problem on a specific platform.

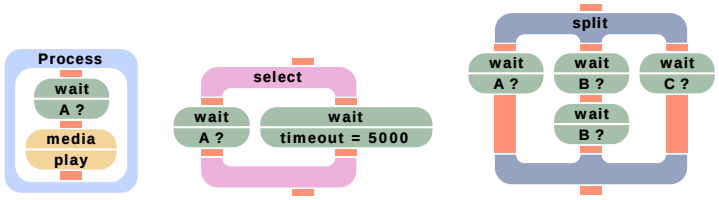
Developers build a *platform independent model* (PIM) of their application. This model is only concerned with the problem domain, i.e. sensors, actuators, and the application logic that ties them together. A tool transforms the PIM into a *platform specific model* (PSM). In our approach the transformation happens in two steps. First, the transformation decides which part of the application logic can be executed on which device. Then, a PSM is generated for each device.

The advantage of using MDA principles is two-fold. The PIM allows developers to work on a very high level of abstraction, while the transformation generates tailored, resource efficient PSMs. Furthermore, tools can analyze the model and select the most appropriate mechanisms for implementation.

3.1 Modeling Language

An appropriate modeling language is essential for the success of a model-driven approach. We have developed a modeling language that aims specifically at the

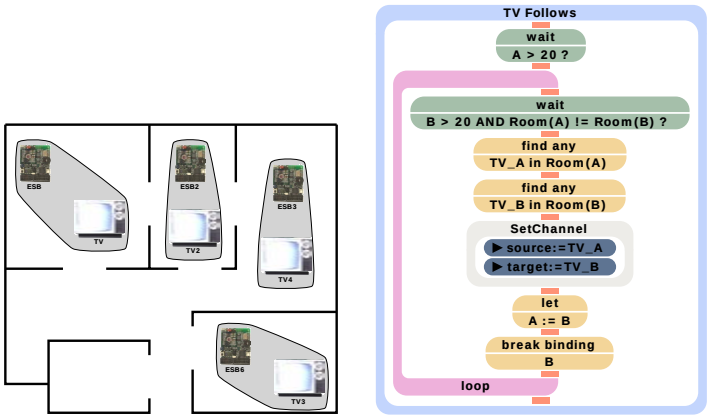
programming of AS-NET applications. The main objectives of our modeling language are to abstract from specific devices and to hide distribution.



(a) process (b) alternative events (c) parallel and sequential events

Fig. 1. Application modeling language

An application is structured into one or more processes (Fig. 1a). A process is a flow of actions and events, i.e. change of sensor values or elapsed timers. In many cases a primitive event alone is not of interest to the application. Developers can specify event patterns by composing event detection (Fig. 1b/c). Logical groups can reflect physical properties of the system, such as the collocation of two entities. But groups can also represent logical relationship, e.g. all devices belonging to a certain person. These relationships can either be established at deployment time (Fig. 2a) or at runtime, e.g. by querying a world model [2].



(a) deployment model (b) application logic

Fig. 2. PIM for "TV Follows"

Figure 2b shows the small example application "TV Follows". To keep the example concise, we assume that every room is equipped with at least one motion sensor and one TV. When a person changes rooms, the TV in the next room is tuned to the same channel as the TV in the previous room. Upon the first movement, the sensor that detects the movement becomes A (i.e. A is bound to that device). The sensor that detects the next motion event is bound to B. It must not be in the same logical group `Room` with A. Then, the TV in the room of sensor B is tuned to the channel shown in the room of sensor A. To complete the loop, A becomes B and B becomes unbound again.

4 Implementation Synthesis

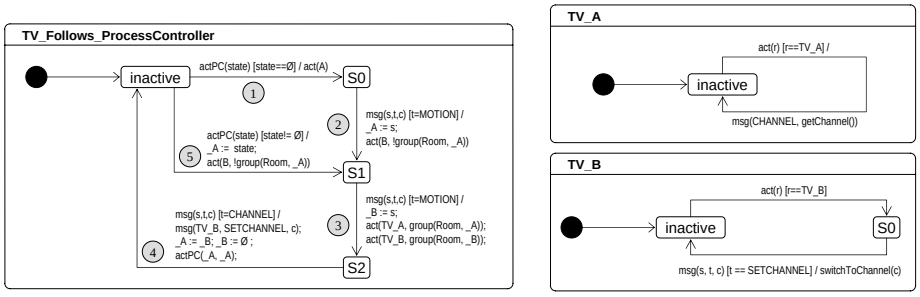
The AS-NET has to execute the application model. As a centralized controller for this execution is not feasible, the model transformation has to derive a distributed implementation of the application model.

The transformation extracts roles from the application model. A *role* is characterized by the capabilities that are required to execute a certain part of the application, for example the ability to detect motion events. At runtime, a role assignment mechanism activates the roles on the most appropriate devices. The *process controller role* is the principal role of an application process and realizes the control flow. It selects the next role to activate. The process controller can be reassigned and activated on a different device at runtime. This leads to a completely distributed implementation of the application.

A distributed implementation requires a set of core mechanisms. These mechanisms include routing to create a communication infrastructure, role assignment, process management, and leader election. The model transformation has to integrate the necessary parts of the mechanisms into the role implementations.

4.1 Model Transformation

The model transformation creates a state machine for each role in an application (Fig. 3). Roles `A` and `B` for motion detection are not shown.



(a) process controller role (b) TV roles

Fig. 3. PSM for "TV Follows"

The process controller role (Fig. 3a) is initially `inactive` on all devices. If no active process controller exists, a leader election (not shown in Figs.) selects one device to activate this role. The process controller takes transition 1 and activates role `A`. When a `MOTION` event has been detected, transition 2 activates role B. The next `MOTION` event triggers transition 3 and activates roles `TV_A` and `TV_B` (Fig. 3b). Role `TV_A` sends its current channel to the process controller which conveys it to role `TV_B`. Transition 4 implements the reassignment of the process controller role by sending an activation message for this role and returning to the inactive state.

The example illustrates that the PSM is far more complex than the PIM. A final code generation step creates source code from the PSM.

5 Related Work

The need for programming abstractions for AS-NETs is evident [3]. A general approach is to provide specialized operating systems and middleware architectures, for example BASE and PCOM [4]. Approaches such as TinyDB [5] or directed diffusion [6] focus on the retrieval and evaluation of sensor data.

Model-driven development is a viable approach to deal with the complexity and variety in certain application domains [7]. Tools like AIRES [8] analyze models with real-time constraints and synthesize an implementation. The CoSMIC [9] tool applies model-driven development to the field of distributed embedded real-time systems. Topiary [10] is a graphical tool for prototyping location-enhanced applications based on storyboards.

6 Conclusion

The high degree of heterogeneity and distribution, scarce resources, and the need to run autonomously make developing applications for AS-NETs very challenging. We propose an approach for creating applications based on the principles of model-driven development. Our modeling language allows developers to build a high level PIM disregarding the aspects of distribution, scarce resources, etc. A model transformation creates the actual implementation of the application as a PSM. The complexity hides in this transformation.

References

1. Scatterweb: (The Embedded Sensor Board) http://www.scatterweb.de/ESB.
2. Bauer, M., Rothermel, K.: How to observe real-world events through a distributed world model. In: Proceedings of the Tenth International Conference on Parallel and Distributed Systems 2004 (ICPADS 2004), Newport Beach, CA, USA (2004)
3. Römer, K.: Programming paradigms and middleware for sensor networks. In: GI/ITG Workshop on Sensor Networks, Kahrlsruhe, Germany (2004)
4. Becker, C., Handte, M., Schiele, G., Rothermel, K.: PCOM – A component system for pervasive computing. In: Proceedings of the Second International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom'04), Orlando, Florida (2004)
5. Madden, S., Franklin, M.J., Hellerstein, J.M., Hong, W.: TAG: a Tiny AGgregation service for ad-hoc sensor networks. In: Proceedings of the 5th Annual Symposium on Operating Systems Design and Implementation, Boston (2002)
6. Intanagonwiwat, C., Govindan, R., Estrin, D.: Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks. In: Proceedings of the Sixth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'00), Boston, MA, USA (2000) 56–67
7. Weis, T., Ulbrich, A., Geihs, K., Becker, C.: Quality of service in middleware and applications: A model-driven approach. In: Proceedings of the 8th International Enterprise Distributed Object Computing Conference (EDOC 2004), Monterey, California, USA, IEEE CS Press (2004)

8. Gu, Z., Kodase, S., Wang, S., Shin, K.G.: A model-based approach to system-level dependency and real-time analysis of embedded software. In: Proceeding of the Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS'03), Toronto, Canada, IEEE (2003)
9. Gokhale, A., Balasubramanian, K., Balasubramanian, J., Krishna, A., Edwards, G.T., Deng, G., Turkay, E., Parsons, J., Schmidt, D.C.: Model Driven Middleware: A new paradigm for deploying and provisioning distributed real-time and embedded applications. Journal of Science of Computer Programming: Special Issue on Model Driven Architecture (2004)
10. Li, Y., Jong, J., Landay, J.: Topiary: a tool for prototyping location-enhanced applications. In: Proceedings of the 17th annual ACM symposium on User interface software and technology, ACM Press (2004) 217 – 226

Scoping für Drahtlose Sensornetze

Jan Steffan, Ludger Fiege, Mariano Cilia, and Alejandro Buchmann

Fachbereich Informatik, TU Darmstadt
64289 Darmstadt, Germany
steffan@ito.tu-darmstadt.de,
{fiege,cilia,buchmann}@dvs1.informatik.tu-darmstadt.de

Zusammenfassung Sensornetze dienen dazu, Messwerte zu sammeln und zu verarbeiten. Genauigkeit und Effizienz hängen dabei stark davon ab, welche Knoten für die einzelnen Teilaufgaben ausgewählt werden. Die Auswahl und Gruppierung von Knoten nach verschiedenen Kriterien ist daher eine wichtige Abstraktion bei der Programmierung von Sensornetzen. Wir stellen Scoping als generisches Konzept zur Gruppierung von Knoten in Sensornetzen vor, das existierende Ansätze subsumiert und als Dienst in einer Middleware für Sensornetze angeboten werden kann.

1 Einführung

Drahtlose Sensornetze bestehen aus hunderten oder tausenden Knoten, die sich in einem dynamischen multi-hop Netz organisieren. Das gewünschte globale Verhalten des Sensornetzes muss durch lokale Algorithmen realisiert werden, die auf den einzelnen Knoten ablaufen. Die Auswahl geeigneter Knoten und deren Gruppierung zu Knoten übergreifenden Strukturen ist daher eine der Hauptaufgaben einer Middleware für drahtlose Sensornetze [5]. Die Art und Verwendung von Knotengruppen ist vielfältig und beinhaltet beispielsweise lokales Clustering, die Auswahl von Knoten für bestimmte Rollen, die Trennung von mehreren Anwendungen und die Adaption von Kommunikationsdiensten. Die Auswahl und Gruppierung von Knoten ist somit impliziter Teil von Algorithmen und Anwendungen für Sensornetze.

Lösungen für wiederkehrende Problemstellungen können abstrahiert und modularisiert werden und gehören zu den typischen Aufgaben einer Middleware. Ansätze zur Abstration von Teilaspekten der Auswahl und Gruppierung von Knoten wurden beispielsweise mit Abstract Regions [4] oder generischen Knoten-Rollen [2] vorgestellt.

Dass eine Verallgemeinerung vorteilhaft ist, haben wir für Event-basierte Systeme gezeigt [1]. Die in diesem Zusammenhang entwickelten *Scopes* trennen die Auswahl und Gruppierung von Knoten von den zu Grunde liegenden Kommunikationsmechanismen. Sie werden dadurch zu einem universellen Abstraktionsmittel für lose gekoppelte Systeme.

Die Anwendung dieses Konzepts auf drahtlose Sensornetze [3] bietet einerseits ein Abstraktionsmittel zur effizienteren und einfacheren Programmierung von Sensornetzen, andererseits erlaubt es eine modulare und damit flexible und

Ressourcen sparende Architektur. Als Module in Frage kommen verschiedene Auswahlkriterien sowie Gruppierungsmechanismen und daran gebundene Dienste. Zur Zeit arbeiten wir an einem Scoping-Mechanismus für Sensornetze mit modularen Auswahlkriterien.

Als Motivation und Anwendungsszenarien betrachten wir in Abschnitt 2 Mehrzweck-Sensornetze, die in besonders hohem Maße von einem modularen und flexiblen Middleware-Dienst zur Knotenauswahl und -gruppierung profitieren. Abschnitt 3 beschreibt beispielhaft zwei bestehende Ansätze, die in diese Richtung gehen. Abschnitt 4 stellt Scopes als verallgemeinerten Ansatz eines solchen Middleware-Dienstes vor und umreißt einige der Fragestellungen, die bei der Umsetzung zu berücksichtigen sind.

2 Mehrzweck-Sensornetze

Ein Gebiet, in dem die Auswahl und Gruppierung von Knoten eine große Bedeutung hat sind Mehrzweck-Sensornetze, d. h. Sensornetze, die gleichzeitung von verschiedenen Anwendungen benutzt werden. Dies kann aus Gründen der Wirtschaftlichkeit sinnvoll sein oder wenn mehrere Parteien an den im Sensornetz gesammelten Daten Interesse haben. Für verschiedene Anwendungen sind typischerweise nur bestimmte Knoten relevant. Darüberhinaus haben Anwendungen unterschiedliche Anforderungen bezüglich Dienst- und Datenqualität oder Sicherheit, die jedoch nur im für die Anwendung relevanten Teil des Sensornetzes umgesetzt werden sollen. Ein weiterer Aspekt ist die Trennung von Anwendungen aus Gründen der Verwaltung und Sicherheit.

Als Beispielszenario betrachten wir mit Sensorknoten ausgestattete Frachtcontainer. Verschiedenen Typen Sensoren kommen vor, z. B. solche zur Kontrolle von Temperatur, Feuchtigkeit, Erschütterungen oder zur Einbruchserkennung. Eine Gruppierung von Knoten kann also nach Sensortyp sinnvoll sein, aber auch nach verschiedenen Meta- und Kontext-Informationen wie der transportierten Ware, deren Besitzer oder der Position des Containers.

Unentbehrlich für die Realisierung von Mehrzweck-Sensornetzen ist eine flexible und modulare Middleware, die an das Szenario angepasst und um anwendungsspezifische Komponenten ergänzt werden kann. Im Gegensatz zu existierenden Sensornetzen, die fest für eine Aufgabe programmiert sind, müssen Anwendungen unabhängig voneinander zur Laufzeit aktiviert werden können.

3 Auswahl und Gruppierung als Middleware-Schicht

Aus einer Reihe von Ansätzen, die die Auswahl oder Gruppierung von Knoten als Middleware-Schicht realisieren, greifen wir hier Abstract Regions [4] und einen Rollen basierten Ansatz [2] heraus. Ziel beider Ansätze ist die Vereinfachung der Programmierung durch eine abstraktere Schnittstelle.

Abstract Regions basiert auf Gruppen von Knoten, die innerhalb der direkten Nachbarschaft um einen Knoten ausgewählt werden. Die Auswahl erfolgt an Hand lokal auswertbarer Knoten-Eigenschaften wie Sensor-Messwerte, Position oder

Güte der drahtlosen Verbindung. Der Prozess der Auswahl und deren dynamische Anpassung an Veränderungen ist für den Programmierer transparent. Innerhalb einer so gebildeten Gruppe von Knoten können Daten ausgetauscht und aggregiert werden. Diese Dienste sind allerdings nicht austauschbar und die Beschränkung auf Nachbarknoten ist fester Bestandteil der Implementierung.

Der in [2] vorgestellte Rollen-basierte Ansatz hat im Gegensatz zu Abstract Regions das gesamte Sensornetz als Grundmenge. Jeder Knoten ist in der Lage, verschiedene Rollen zu übernehmen, etwa das Sammeln, Aggregieren oder Weiterleiten von Messwerten. Die Auswahl der Rollen erfolgt dynamisch zur Laufzeit abhängig von verschiedenen lokaler Knoten-Eigenschaften, wie bei Abstract Regions, oder von Eigenschaften von Nachbarknoten. Im Unterschied zu Abstract Regions gibt es keinerlei Struktur zur Gruppierung der Knoten einer Rolle. Dienste wie der Austausch oder die Aggregation von Daten innerhalb einer Gruppe müssen also nachwievor selbst implementiert werden.

Beiden Ansätzen gemeinsam ist die Spezifikation der Regionen bzw. Rollen schon zur Übersetzungszeit. Ein einmal programmiertes Sensornetz kann daher nicht für zusätzliche Anwendungen verwendet werden wie dies für Mehrzweck-Sensornetze nötig wäre.

4 Scopes für drahtlose Sensornetze

Scopes als Mittel zur Strukturierung verteilter Systeme wurden zuerst im Zusammenhang mit Publish/Subscribe-Systemen untersucht [1]. Ein Scope besteht im Kern aus einer Gruppe von Knoten oder Komponenten, die durch eine Auswahlbedingung oder durch Aufzählen spezifiziert wird. Durch die Betrachtung von Scopes als eigenständiges Objekt erhält man ein Mittel zur Strukturierung, das die Kommunikation zwischen Scopes kontrolliert, aber orthogonal zu Kommunikations- und Anwendungslogik innerhalb der Gruppen ist. Dies erlaubt es, Scopes für vielfältige Zwecke zu verwenden und zusätzliche Dienste und Eigenschaften daran zu binden.

Im Folgenden geben wir einen Überblick über die Anwendung dieses Konzepts auf drahtlose Sensornetze. Fast alle oben genannten Aspekte der Knotenauswahl und Gruppenbildung in Sensornetzen lassen sich auf Scopes abbilden.

4.1 Spezifikation von Scopes

Zur Spezifikation eines Scopes bedarf es vor allem einer Sprache zur Beschreibung der Scope-Zugehörigkeitsbedingung. Im Gegensatz zu den meisten anderen Netzwerken kommt es bei drahtlosen Sensornetzen meistens nicht darauf an, einzelne Knoten direkt zu adressieren, sondern Knoten mit bestimmten Eigenschaften zu finden und anzusprechen. Diese Eigenschaften müssen von einer Scope-Beschreibungssprache abgedeckt werden. In Frage kommen hierfür sowohl statische *Knoteneigenschaften* wie „Knoten hat einen Temperatursensor“ als auch dynamische wie „Knoten hat mindestens drei Nachbarn“.

Um die modulare Erweiterbarkeit der Knoteneigenschaften zu ermöglichen, schlagen wir eine hierarchische Strukturierung des *Namensraums* für Knoteneigenschaften vor wie in Abbildung 1 exemplarisch für das Meta-Attribut *meta.color* und die geografische Position *geo.x* gezeigt. Dadurch wird eine Abbildung von Knoteneigenschaften auf spezielle Implementierungen möglich, deren spezifischen Eigenschaften zur Optimierung verwenden können. Das Modul zur Umsetzung der geografischen Knoteneigenschaften kann beispielsweise die Ausbreitung einer Scope-Erzeugung auf die in Frage kommende Region beschränken. Auf diese Weise lassen sich auch den Abstract Regions entsprechende, auf Nachbarknoten beschränkte Scopes effizient umsetzen.

Bezüglich der *Mächtigkeit von Ausdrücken* über Knoteneigenschaften ist ein Kompromiss nötig. Ein Problem stellen Ausdrücke dar, die sich auf zeitlich oder räumlich nicht lokale Eigenschaften beziehen. Dies trifft vor allem auf aggregierte Werte zu, wie beispielsweise „Temperatur liegt über dem Durchschnittswert aller Knoten“. Abgesehen davon können Ausdrücke, die aus Funktionen und Vergleichsoperatoren über Knoteneigenschaften und Konstanten gebildet sind, lokal ausgewertet werden. Der Komplexität der Ausdrücke sind allerdings durch die beschränkten Ressourcen auf Sensorknoten Schranken gesetzt.

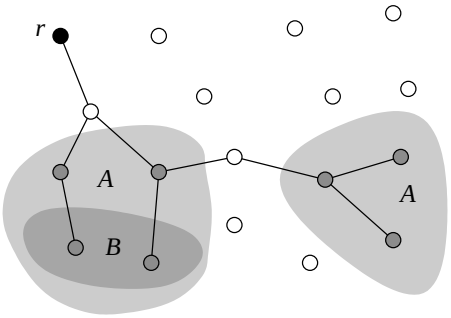
4.2 Implementierung

Die konkrete Umsetzung erfolgt auf Basis von TinyOS. Ziel ist dabei eine flexible Lösung, die die Erweiterung um Szenario-spezifische Knoteneigenschaften und die Instantiierung von Scopes zur Laufzeit erlaubt.

Zur Spezifikation von Scopes verwenden wir über Vergleichsoperatoren, Knoteneigenschaften und Konstanten gebildete Boolesche Ausdrücke wie in Abbildung 1 dargestellt. Um diese Ausdrücke trotz der Ressourcenbeschränkungen in Sensorknoten zur Laufzeit auswerten zu können, werden sie in einen kompakten Bytecode in Postfix-Notation übersetzt. Dieser Bytecode kann mit Hilfe eines Stacks leicht von links nach rechts ausgewertet werden.

Die Instantiierung eines Scopes kann sowohl durch einen Gateway-Knoten als auch durch einen inneren Knoten angestoßen werden. Von diesem Wurzelknoten aus wird die entsprechende Auswahlbedingung im Sensornetz übertragen. Die Menge der dabei zu berücksichtigenden Knoten kann auf die Knoten eines bereits instantiierten Basis-Scopes beschränkt werden. Abbildung 1 zeigt einen geographischen Scope B der vom Wurzelknoten r aus innerhalb des Basis-Scopes A erzeugt wurde. Basis-Scopes können sowohl zur Effizienzsteigerung als auch, in Verbindung mit zusätzlichen Authentisierungsmechanismen, zur Zugriffsbeschränkung verwendet werden.

Als Gruppierungsmechanismus haben wir einen Routing-Baum implementiert, der gleichzeitig mit der Instantiierung eines Scopes zwischen seinem Wurzelknoten und den Mitgliedern des Scopes aufgebaut wird. Wie in Abbildung 1 gezeigt kann der Routing-Baum auch Knoten umfassen, die selbst nicht Mitglied des Scopes sind. Durch die Modularisierung könnte stattdessen beispielsweise auch ein Mesh-Overlay verwendet werden.



$$A := \{\, N \in \mathit{world} : N.\mathit{meta.color} = \text{grey} \,\}$$

$$B := \{\, N \in A : N.\mathit{geo}.x \leq 3 \wedge N.\mathit{geo}.y \geq 4 \,\}$$

Abbildung 1. r ist Wurzel der Scopes A und B. Scope A ist Basis-Scope von B.

Zur Beschränkung der Lebensdauer eines Scopes verwenden wir ein auf Leases basierendes Verfahren. Während der Lebensdauer eines Scopes muss der Routing-Baum den sich ändernden Bedingungen im Sensornetz angepasst werden. Das gleiche gilt für Auswahlbedingungen sofern diese von dynamischen Eigenschaften abhängen.

5 Ausblick

Wir haben Scopes als allgemeines Konzept zur Strukturierung von Sensornetzen vorgestellt. Scopes decken nicht nur die Auswahl und Gruppierung von Knoten als abstraktes Programmier-Konzept ab, sondern auch Probleme, die bei der Realisierung von Mehrzweck-Sensornetzen zu lösen sind.

Breiten Raum für weitere Entwicklungen bietet die Möglichkeit, verschiedene Dienste und Eigenschaften mit Scopes zu koppeln, wie etwas Zugriffsbeschränkungen oder die Spezifikation der Dienstgüte.

Literatur

1. L. Fiege, M. Mezini, G. Mühl, and A. P. Buchmann. Engineering event-based systems with scopes. In *Proc. of ECOOP'02*, volume 2374 of *LNCS*, pages 309–333, Malaga, Spain, June 2002. Springer-Verlag.
2. K. Römer, C. Frank, P. J. Marrón, and C. Becker. Generic role assignment for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 11th ACM SIGOPS European Workshop*, pages 7–12, Leuven, Belgium, September 2004.
3. J. Steffan, L. Fiege, M. Cilia, and A. Buchmann. Scoping in wireless sensor networks: A position paper. In *Proceedings of the 2nd Workshop on Middleware for Pervasive and Ad-hoc Computing*, pages 167–171. ACM Press, October 2004.
4. M. Welsh and G. Mainland. Programming sensor networks using abstract regions. In *Proceedings of the First USENIX/ACM Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI '04)*, 2004.
5. A. Woo, S. Madden, and R. Govindan. Networking support for query processing in sensor networks. *Commun. ACM special issue: Wireless sensor networks*, 47(6):47–52, 2004.

TinyCubus: A Flexible and Adaptive Cross-Layer Framework for Sensor Networks

Pedro José Marrón, Daniel Minder, Andreas Lachenmann, and Kurt Rothermel

University of Stuttgart
Institute of Parallel and Distributed Systems (IPVS)
Universitätsstr. 38, D-70569 Stuttgart
{marron,minder,lachenmann,rothermel}@informatik.uni-stuttgart.de

1 Introduction

With the proliferation of sensor networks and sensor network applications during the last few years, the overall complexity of such systems is continuously increasing. Sensor networks are now heterogeneous in terms of their hardware characteristics and application requirements even within a single network. In addition, the requirements of current applications are expected to change over time. All of this makes developing, deploying, and optimizing sensor network applications an extremely difficult task. In the `TinyCubus` project we research a necessary infrastructure to support the complexity of such systems.

`TinyCubus` consists of a data management framework, a cross-layer framework, and a configuration engine. The *data management framework* allows the dynamic selection and adaptation of system and data management components. The *cross-layer framework* supports data sharing and other forms of interaction between components in order to achieve cross-layer optimizations. The *configuration engine* allows code to be distributed reliably and efficiently by taking into account the topology of sensors and their assigned functionality.

2 Overall Architecture

The overall architecture of `TinyCubus` mirrors the requirements imposed by the applications and the underlying hardware. As shown in figure 1, `TinyCubus` is implemented on top of TinyOS [3] using the nesC programming language [1], which allows for the definition of components that contain functionality and algorithms. We use TinyOS primarily as a hardware abstraction layer. For TinyOS, `TinyCubus` is the only application running in the system. All other applications register their requirements and components with `TinyCubus` and are executed by the framework.

2.1 Tiny Data Management Framework

The Tiny Data Management Framework provides a set of data management and system components, selected on the basis of the typically data-driven nature of

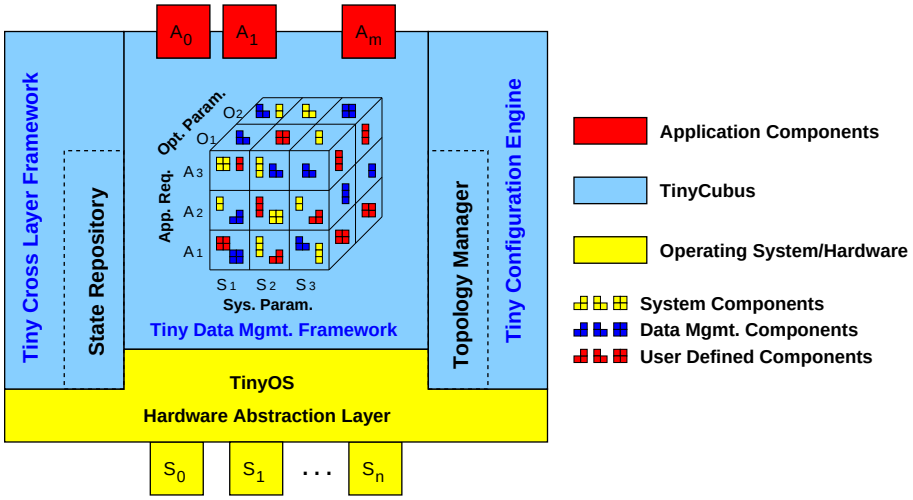


Fig. 1. Architectural components in `TinyCubus`

sensor network applications. For each type of standard data management component such as replication/caching, prefetching/hoarding, aggregation, as well as each type of system component, such as time synchronization and broadcast strategies, it is expected that several implementations of each component type exist. The Tiny Data Management Framework is then responsible for the selection of the appropriate implementation based on the information obtained from the system.

The cube of figure 1, called 'Cubus', combines *optimization parameters*, such as energy, communication latency, and bandwidth; *application requirements*, such as reliability; and *system parameters*, such as mobility. For each component type, algorithms are classified according to these three dimensions. For example, a tree based routing algorithm is energy-efficient, but cannot be used in highly mobile scenarios with high reliability requirements. The component implementing the algorithm is tagged with the combination of parameters and requirements for which the algorithm is most efficient. Eventually, for each combination a component will be available for each type of data management and system components.

The Tiny Data Management Framework selects the best suited set of components based on current system parameters, application requirements, and optimization parameters. This adaptation has to be performed throughout the lifetime of the system and is a crucial part of the optimization process.

2.2 Tiny Cross-Layer Framework

The Tiny Cross-Layer Framework provides a generic interface to support parameterization of components using cross-layer interactions. Strict layering (i.e.,

each layer only interacts with its immediately neighboring layers) is not practical for wireless sensor networks [2] because it might not be possible to apply certain desirable optimizations. For example, if some of the application components as well as the link layer component need information about the network neighborhood, this information can be gathered by one of the components in the system and provided to all others.

If layers or components interact with each other, there is the danger of loosing desirable architectural properties such as modularity. Therefore, in our architecture the cross-layer framework acts as a mediator between components. Cross-layer data is not directly accessed from other components but stored in a state repository.

Other examples of cross-layer interactions are callbacks to higher-level functions, such as the one provided by the application developer. TinyOS already provides some support with its separation of interfaces from implementing components. However, the TinyOS concept for callbacks is not sophisticated enough for our purposes, since the wiring of components is static. With `TinyCubus` components are selected dynamically and can be exchanged at runtime. Therefore, both the usage of a component and callbacks cannot be static; they have to be directed to the new component if the data management framework selects a different component or the configuration engine installs a replacement for it. `TinyCubus` extends the functionality provided by TinyOS to allow for the dereferencing and resolution of interfaces and components.

2.3 Tiny Configuration Engine

In some cases parameterization, as provided by the Tiny Cross-Layer Framework, is not enough. Installing new components, or swapping certain functions is necessary, for example, when new functionality such as a new processing or aggregation function for the sensed data is required by the application. The Tiny Configuration Engine addresses this problem by distributing and installing code in the network. Its goal is to support the configuration of both system and application components with the assistance of the topology manager.

The topology manager is responsible for the self-configuration of the network and the assignment of specific roles to each node. A role defines the function of a node based on properties such as hardware capabilities, network neighborhood, location etc. A generic specification language and a distributed and efficient role assignment algorithm is used to assign roles to the nodes.

Since in most cases the network is heterogeneous, the assignment of roles to nodes is extremely important: only those nodes that actually need a component have to receive and install it. This information can be used by the configuration engine, for example, to distribute code efficiently in the network.

3 Application Studies

Three specific sensor network applications play an important role in the research performed at the University of Stuttgart: Sustainable Bridges [5], Cartalk 2000

[4], and our in-house application called 'Sense-R-Us'. These applications are being studied as canonical examples for a wide range of applications that deal with static and mobile sensor nodes. Their analysis allows us to identify requirements and characteristics that apply to applications that fall in this category.

The goal of the Sustainable Bridges project is to provide cost-effective monitoring of bridges using static sensor nodes in order to detect structural defects as soon as they appear. A wide range of sensor data is needed to achieve this goal, e.g., temperature, relative humidity, swing level, vibrations, as well as noise detection and localization mechanisms to determine the position of cracks. Nodes are stationary and are placed manually at well-known positions. In order to perform the localization, nodes sample noise emitted by the bridge at a rate of 40 kHz and, by using triangulation methods, the position of the possible defect is determined. This process requires the clocks of adjacent sensors to be synchronized within 15-25 μs of each other. Finally, sensors are required to have a lifetime of at least 3 years so that batteries can be replaced during the regular bridge inspections.

In contrast, the goal of the Cartalk 2000 project is to develop a cooperative driver assistance system based on mobile ad-hoc inter-vehicle communication. The vehicle should warn the driver of road obstacles, slowing-down traffic, or bad road conditions a vehicle ahead has detected. It supports the driver on highway entry, lane merging, and in right of way scenarios when the situation can become unclear. Since sensors are integrated into cars, they are mobile with respect to each other. A wide range of highly dynamic sensor data, e.g., speed, position, and tire pressure, is gathered continuously. The processing of data must be performed in a timely manner and immediately sent to other drivers that might be interested in it. Thus, time-constrained communication is important for the system since data must be forwarded to the appropriate cars at the right time. In contrast to the Sustainable Bridges application, energy constraints are less severe in this application since sensor nodes are directly connected to the electric system of the car.

The 'Sensor-R-Us' application aims at building a Smart Environment in our department using motes. Base stations are installed in all rooms and serve as location beacons and gateways to the mobile nodes carried around by the employees. Using a PC based GUI, the position and status ('in a meeting', e.g.) of persons or sensor information like room temperature can be queried. The query processing capability of Sensor-R-Us is much higher than of the other two applications: In addition to simple selection, projection, and aggregation, queries can be stored in a node, and their execution can be triggered by a sensor or timer event. Results of a query can also be stored in a node and be used as 'virtual sensors'.

3.1 Comparison of the Applications

All applications need some common functionality: routing, query processing, and data aggregation. Concerning Query Processing and Data Aggregation, they use simple queries that may be triggered by sensor or timer events and simple

aggregation functions. Sense-R-Us needs the most advanced Query Processing and Data Aggregation component to provide local storage of query results and more advanced or user-defined aggregation functions.

Routing is needed in all applications, but differs the most. In Sustainable Bridges a standard energy-efficient routing takes care of clusters and roles, CarTalk uses two different geographic routing algorithms, and Sense-R-Us needs a routing scheme which must come to terms with hybrid network topologies.

Nevertheless we have identified three functional blocks that can be implemented as components and stored in the Cubus.

3.2 Dynamics of Parameters

By analyzing these three applications, we give reasons for the dimensions of the Cubus.

In the Sustainable Bridges application, small Telos motes with only 48kB program flash are used. Several complex functions for analyzing the sampled data are needed which do not fit into the flash at the same time. The good news is that their usage frequency varies highly. The TinyCubus monitors the usage (system parameter) and can replace scarcely used components with dummies to optimize for low program size.

The system environment of CarTalk changes rapidly: a vehicle can wait with hundreds of other vehicles on a car park or it can run on a lonely highway, meeting others only every 10 minutes. An adaptive routing and also probably a clustering algorithm is obviously needed. When driving, energy is not a very important problem, this changes if the vehicles does not move for some time. In contrast, in circulating traffic CarTalk has high latency requirements which do not apply while being on a parking lot. Thus, optimization criteria change.

In Sense-R-Us a mobile node of an employee might send information regularly to the base station in the employee's own room. While being in this room, the information can be sent directly. But if the application detects that the mote is outside the room of the employee for at least a few minutes, it tightens its security requirements. The Cubus will adapt to this changed application requirement and install a component that will sign each message to the base station to proof its authenticity. On the system parameter side, topology changes will occur which affects routing and possibly clustering.

4 Conclusion and Future Work

In this paper, we have described the architecture of `TinyCubus`, a flexible, adaptive cross-layer framework for sensor networks. Its specific requirements have been derived from the increasing complexity of the hardware capabilities of sensor networks, the variety and breadth found in typical applications, and the heterogeneity of the network itself. Therefore, we have designed our system to have the Tiny Data Management Framework, that provides adaptation capabilities, the Tiny Cross-Layer Framework, that provides a generic interface and a

repository for the exchange and management of cross-layer information, and the Tiny Configuration Engine, whose purpose is to manage the upload of code onto the appropriate sensor nodes. We have underpinned the design of the cubus with the analysis of three current applications regarding functionality and dynamic parameters.

The implementation of `TinyCubus` is still under way and, although the prototypes for the cross-layer framework and configuration engine are already partially functional, there is still some work to do.

References

1. D. Gay, P. Levis, R. von Behren, M. Welsh, E. Brewer, and D. Culler. The nesC language: A holistic approach to networked embedded systems. In *Proc. of PLDI'03*, pages 1–11, 2003.
2. A. J. Goldsmith and S. B. Wicker. Design challenges for energy-constrained ad hoc wireless networks. *IEEE Wireless Communications*, 9(4):8–27, 2002.
3. J. Hill, R. Szewczyk, A. Woo, S. Hollar, D. Culler, and K. Pister. System architecture directions for networked sensors. In *Proc. of the 9th Intl. Conf. on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems*, pages 93–104, 2000.
4. D. Reichardt, M. Miglietta, L. Moretti, P. Morsink, and W. Schulz. CarTALK 2000: Safe and comfortable driving based upon inter-vehicle-communication. In *Proc. of the Intelligent Vehicle Symp.*, volume 2, pages 545–550, 2002.
5. Sustainable bridges web site. http://www.sustainablebridges.net.

Redundante Datensicherung in drahtlosen Sensornetzen

Alexander Coers

Fraunhofer Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme, Duisburg
alexander.coers@ims.fraunhofer.de,
WWW home page: http://www.ims.fraunhofer.de

Zusammenfassung Die von einzelnen Knoten in drahtlosen Sensornetzen ermittelten Daten werden üblicherweise an eine im Netz verfügbare Basisstation gesendet. Diese kann nun, je nach Anwendung, die Daten auswerten und speichern, oder als Gateway diese über ein anderes Netz weiterleiten. Fällt diese Basisstation über einen längeren Zeitraum aus, werden die Daten im einfachsten Fall auf den Knoten gespeichert. Fallen diese ebenfalls aus, verliert der Anwender unter Umständen wichtige Datensätze. Es soll hier ein Verfahren vorgestellt werden, das bestehende Methoden aus der Datenverarbeitung auf Sensornetze überträgt, mit dem Ziel Datenverlust zu vermeiden.

1 Einleitung

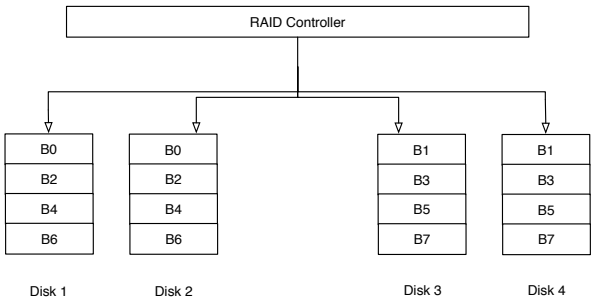
Systeme zur redundanten Speicherung von Daten sind aus der heutigen Rechnertechnologie nicht mehr wegzudenken. Jede Applikation, die die Handhabung von wichtigen und teilweise einzigartigen Daten steuert, benötigt eine zuverlässige und fehlertolerante Hardwareumgebung. Solch eine Umgebung wird in Rechnernetzen mit „Redundant Array of Independent Disks“ (RAID engl. für Redundanter Verbund unabhängiger Festplatten) Systemen realisiert. Dieses Verfahren soll nun in Ansätzen auf drahtlose Sensorknoten adaptiert werden, mit dem Ziel, Datenverluste bei Ausfall der Basisstation zu vermeiden. Sensorknoten sind mit Sensoren ausgerüstete Kleinrechner, die sich mit Hilfe ihrer Transceiver drahtlos zu Netzwerken verbinden. Sensorknoten verfügen nicht über die Rechenleistung und Kapazität, die für RAID Systeme benötigt wird, allerdings existieren Anwendungen für Sensorknoten, bei denen eine redundante Speicherung von Daten die Zuverlässigkeit der Applikation in einem Maße erhöht, dass der Aufwand für ein solches Verfahren gerechtfertigt ist.

1.1 RAID Verfahren

Zunehmende Rechenleistung und erhöhter Bedarf an größerer Speicherkapazität führten schon vor geraumer Zeit zur Suche nach Verfahren in der Datenverarbeitung, die unter Berücksichtigung der verfügbaren Speichermedien Möglichkeiten boten, die Zugriffszeiten zu verringern, die verfügbare Speicherkapazität

zu erhöhen, oder die Daten besser gegen Datenverlust zu sichern. Das wohl populärste Verfahren ist RAID. Je nach Konfiguration kann mittels RAID eine der drei Vorgaben erreicht werden. Dieses nur bei Festplatten angewendete Verfahren besteht aus einem Kontroller und mindestens zwei Festplatten. Die unterschiedlichen Konfigurationen werden mit Ziffern und dem Zusatz „Level“ bezeichnet, beispielsweise RAID Level 0 oder RAID Level 2. Eine umfangreiche Übersicht über die den verschiedenen Verfahren zu Grunde liegenden Techniken bietet Mark Calvin Holland in [1].

RAID Level 1: Das Spiegeln. Eine der einfachsten Möglichkeiten Daten redundant abzuspeichern ist das Spiegeln (Abb. 1). Bei dieser Methode werden die Datensätze auf zwei unterschiedlichen Medien (Festplatten) gespeichert. Fällt nun ein Medium aus, sind die entsprechenden Daten auf dem zweiten Medium noch intakt. Die Nachteile dieses Verfahrens liegen auf der Hand: für die Redundanz wird pro zu speicherndem Byte ein weiteres benötigt, was nicht nur wertvollen Platz belegt, sondern auch die Kosten verdoppelt.



Bn entspricht einem Datenblock von mehreren Bytes.

Abbildung 1. RAID 1: Spiegelung

RAID Level 5 Bei RAID Level 5 werden die Daten in mehrere Kilobyte große Blöcke auf die einzelnen Festplatten verteilt und ein Paritätsblock errechnet. Dieser wird jedoch nicht auf einer speziellen Festplatte gespeichert, sondern mit den Daten auf die Festplatten verteilt. Das in Abb. 2 dargestellte Standardverfahren speichert die Paritätsblöcke entlang einer Diagonalen und ordnet die Datenblöcke um diese an. Dieses Verfahren nennt man „links-symmetrische Organisation“. Dadurch wird sichergestellt, dass bei größeren Anfragen ein Maximum an Festplatten arbeitet. Es existieren neben der links-symmetrischen Organisation noch andere mögliche Anordnungsverfahren, allerdings ist das grundsätzliche

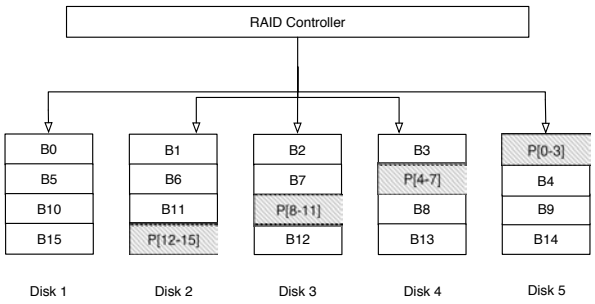
Verfahren immer gleich. Die Parität berechnet sich wie folgt:

$$p = d_1 \oplus d_2 \oplus d_3 \oplus d_4 \tag{1}$$

wobei p der Parität, und $d1$ bis $d4$ den Datenblöcken der einzelnen Festplatten entsprechen. Aufgrund der Exklusiv-Oder-Verknüpfung kann gezeigt werden, dass bei Ausfall eines Datensatzes dieser durch die anderen Daten errechnet werden kann und somit gilt:

$$d_m = d_i \oplus d_j \oplus d_k \oplus p \tag{2}$$

mit $i, j, k, m = 1 \ldots 4$ und $i \neq j \neq k \neq m$. Dieses Verfahren soll für drahtlose Sensornetze adaptiert werden.



Bn entspricht einem Datenblock von mehreren Kilobytes,
Pn entspricht einem Paritätsblock von mehreren Kilobytes.

Abbildung 2. RAID Level 5, links-symmetrische Organisation

1.2 Sensornetz: Protokolle

Daten, die einzelne Knoten in einem Netzwerk ermitteln, werden über Single-Hops oder Multi-Hops an die im Netzwerk verfügbare Basisstation gesendet. Dort werden diese für die Benutzer gespeichert, oder, wenn die Basisstation als Gateway ausgelegt wurde, können die Daten beispielsweise in das Internet oder in ein Intranet geleitet werden. Auf welchem Weg diese Datenpakete zur Basis gelangen, hängt von der verwendeten Hardware und Software ab, ebenso wie die daraus resultierende Netzwerktopologie. Heutzutage bieten Netzwerkprotokolle für drahtlose Sensornetze nur Sicherungsmechanismen, die bei ankommenden Paketen die Integrität prüfen und dem Sender einen erfolgreichen Empfang bestätigen. Die verwendeten Netzwerkprotokolle können Ausfälle einzelner Teilnehmer durch ihre vermaschte Topologie kompensieren und Routen zu den Basisstationen neu berechnen.

2 Beschreibung des Verfahrens

Unter der Vorraussetzung, dass in einem Sensornetz nicht alle Knoten gleich viele Daten akquirieren und somit einige Knoten bisher ungenutzte Speicherkapazitäten besitzen, soll hier ein Verfahren beschrieben werden, mit dem es möglich ist, solch ungenutzte Kapazitäten zu nutzen. Daten, die zu einer Basisstation gesendet werden sollen, müssen so im Netz verteilt werden, dass sie wiederherstellbar sind. Eine einfache Vorgehensweise wurde bereits in (1) gezeigt. Solange die Basisstation im Netz verfügbar ist, werden die Daten bis zur Basisstation weitergeleitet. Falls die Basisstation ausfällt, werden die zu sendenden Daten in zwei gleich große Blöcke unterteilt und eine Parität gebildet. Um den Sendeaufwand zu verringern, wird einer der Blöcke auf dem Knoten gespeichert, während die anderen möglichst weiträumig im Netz verteilt werden. Dies hat den Vorteil, dass bei einem großflächig auftretenden Ereignis (beispielsweise Feuer), das in der Lage ist die Knoten zu zerstören, die Verteilung der Datenpakete im Netz ausreichend groß ist und eine Wiederherstellung möglich ist. Sobald eine Basisstation im Netz wieder verfügbar ist, werden die einzelnen Datenblöcke zu dieser gesendet und zusammengesetzt.

3 Implementation

Es hat sich gezeigt, dass Protokolle, die zu ihrer Organisation Cluster aufbauen, sich für Modifikationen, die für dieses Verfahren nötig sind, besser eignen als Protokolle, die nur eine komplett vermaschte Topologie besitzen. Dies ist zum einen darin begründet, dass solche Protokolle, wie beispielsweise das IEEE 802.15.4 [3], durch die Clusterbildung bereits rudimentäre Informationen über die Positionen der einzelnen Knoten enthalten. Einzelne Cluster entstehen nur dann, wenn sich kein Clusterhead (IEEE802.15.4: Koordinator), also ein Knoten, der den jeweiligen Cluster kontrolliert, mehr in Reichweite befindet, so dass davon ausgegangen werden kann, dass die einzelnen Koordinatoren voneinander räumlich getrennt sind. Weiterhin wird deutlich mehr Netzwerkverkehr über diese Knoten geregelt bzw. geleitet, beispielsweise neue Routeninformationen oder Nachrichten, die das Hinzufügen bzw. das Entfernen von Knoten zu dem Cluster und damit zu dem gesamten Netz regeln. Diese Knoten eignen sich aus diesen Gründen gut, die Verteilung der verschiedenen Datenblöcke oder Paritätsblöcke zu übernehmen.

Für das MD Protokoll (Mediator Device), dass E. Callaway in [2] vorgestellt hat, wurde ein Softwaresimulator entwickelt, der ein Cluster-Basiertes Netz mit bis zu 100 Knoten aufbauen kann. Die Knoten werden dabei zufällig auf einem 30×30 Gitter platziert. Knoten ohne Netzanbindung sind somit ebenso möglich wie sehr dichte und kompakte Netze. Abbildung 3 zeigt ein Netz, das mit diesem Simulator erstellt wurde. In diesen simulierten Netzen existieren keine Basisstationen, so dass Knoten, die in regelmäßigen Abständen Daten ermitteln, diese an den CH (Clusterhead) senden. Es werden jedoch nicht die Daten direkt gesendet, sondern der sendende Knoten teilt den Datenblock in zwei gleich große Blöcke,

bildet den Paritätsblock und sendet einen Daten- und den Paritätsblock an den CH in einem Paket, so dass der Mehrsendeaufwand möglichst gering bleibt.

Das MD Protokoll ist ein Beacon-basiertes Protokoll, d.h. jeder Knoten muss in regelmäßigen Abständen ein sehr kurzes Paket zur Synchronisation mit dem CH aussenden. In diesem Paket mit einkodiert ist die Speicherkapazität, die dieser Knoten für andere Knoten zur Verfügung stellt. Dies und die Tatsache, dass das Entfernen und Hinzufügen von Knoten auch über den CH abgewickelt wird, befähigt den CH zu entscheiden, welcher Knoten ein Daten- oder Paritätspaket verarbeiten kann. Üblicherweise bilden die einzelnen Cluster Routen untereinander, so dass ein CH auch Pakete zu einem anderen Cluster schicken kann. Um eine möglichst breite Streuung bei der Redundanz zu erhalten, werden die ankommenden Daten- und Paritätsblöcke von dem CH in einen anderen Cluster gesendet. Dort werden die Daten- und Paritätspakete auf die Mitglieder des Clusters verteilt.

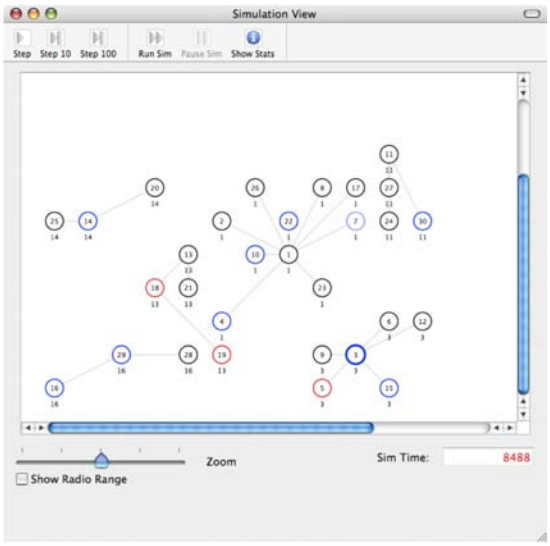


Abbildung 3. Bildschirmfoto einer Simulationssitzung

4 Ergebnisse und Diskussion

In Tab. 1 ist eine Verteilung von Daten- und Paritätsblöcken innerhalb eines Clusters dargestellt, die während einer Simulation aus 30 Knoten und fünf Clustern entstanden ist. Der CH des betrachteten Clusters ist Knoten eins, zwei bis fünf sind weitere Mitglieder des Clusters. Die Pakete wurden von einem anderen Cluster über Knoten eins zur Speicherung in dessen Cluster gesendet. Zu erkennen ist, dass eine nicht ideale Verteilung von Datenpaketen stattgefunden hat.

So wurden auf Knoten zwei und drei jeweils drei Pakete gespeichert, auf Knoten vier jedoch nur zwei Pakete und Knoten fünf erhielt im gleichen Zeitraum vier Datenpakete. Eine gleichmäßigere Verteilung wäre wünschenswerter. Allerdings führt ein Verlust von einem dieser Knoten bei keinem der sechs betrachteten Datenpakete zu einem Datenverlust, da Parität- und Datenblock immer getrennt gespeichert wurden.

Tabelle 1. Verteilung von Datenpaketen in einem Cluster

Paket Nr.	Paritätsblock auf Knoten	Datenblock auf Knoten
1	2	5
2	4	2
3	3	5
4	3	5
5	5	2
6	4	3

5 Fazit

Durch Simulation kann gezeigt werden, dass ein Verfahren zur redundanten Datensicherung in einem Sensornetz realisierbar ist. Durch die Bildung von zwei Datensätzen und einem Paritätssatz kann der Verlust von einem dieser drei Datensätze kompensiert werden, und so einem Datenverlust vorgebeugt werden. Zu untersuchen ist nun der Mehraufwand beim Senden der Datenpakete und welchen Einfluss dies auf die Lebensdauer der einzelnen Knoten hat. Bhardwaj et al. geben in [4] dafür geeignete Ansätze. Des Weiteren sollten die durch Simulation gewonnenen Ergebnisse durch eine Implementation auf existierenden Sensor Knoten ([5])vertieft werden.

Literatur

1. Holland, Mark Calvin: On-Line Data Reconstruction In Redundant Disk Arrays. Carnegie Mellon University. (1994)
2. Callaway, Edgar H.: Wireless Sensor Networks Auerbach Publications (2002)
3. IEEE Organisation.: IEEE Standard 802.15.4 http://www.ieee802.org/15
4. Bhardwaj, Manish and Garnett, Timothy: Upper Bounds of the Lifetime of Sensor Networks MIT Cambridge (2001)
5. Tiny OS: Berkeley University of California http://www.tinyos.net

Shawn: Ein alternativer Ansatz zur Simulation von Sensornetzwerken

Dennis Pfisterer[1], Stefan Fischer[1], Alexander Kröller[2], and Sandor Fekete[2]

[1] Institut für Telematik, Universität zu Lübeck,
{pfisterer, fischer}@itm.uni-luebeck.de,
http://www.itm.uni-luebeck.de
[2] Institut für mathematische Optimierung, Technische Universität Braunschweig,
{s.fekete,a.kroeller}@tu-bs.de,
http://www.math.tu-bs.de/mo

Zusammenfassung Die Simulation ist im Bereich der Sensornetzwerke eines der wichtigsten Werkzeuge bei der Entwicklung, Optimierung und Verifikation von Algorithmen und Protokollen. Wir präsentieren in dieser Arbeit den Simulator *Shawn*, der sich in seiner Zielsetzung und Realisierung signifikant von anderen Simulatoren für Sensornetze unterscheidet. Wir motivieren die Notwendigkeit dieses neuen für *Shawn* gewählten Ansatzes und beschreiben die sich daraus ergebenden Eigenschaften im Detail. Abschließend vergleichen wir anhand eines realistischen Szenarios *Shawn* mit dem Netzwerksimulator Ns-2 [1] und zeigen, in welchen Bereichen *Shawn* seine volle Leistungsfähigkeit entfalten kann.

1 Motivation

Die Entwicklung speziell auf Sensornetzwerke zugeschnittener Algorithmen und Protokolle ist in der gegenwärtigen Forschung ein hochaktiver und innovativer Bereich. Dabei ist die Simulation ein bewährtes und flexibles Werkzeug, um auch komplexe Szenarien modellieren und analysieren zu können. Zur Simulation von Netzwerken existiert eine Vielzahl an Simulatoren, die eine große Spanne unterschiedlichster Anforderungen abdecken und auch zur Simulation von Sensornetzen geeignet sind. Sehr hardwarenahe Simulatoren [2–4] bilden die Sensorknoten bis auf die Bit–Ebene genau nach und ermöglichen damit die Ausführung binärkompatiblen Programmcodes im Simulator, um z.B. Fehlerquellen bereits vor der Ausbringung auf die Geräte zu beseitigen. Andere Simulatoren [1, 5–7] haben sich auf die Simulation von Protokollstapeln spezialisiert. Dabei wird eine beachtliche Anzahl an Protokollen wird bereits mitgeliefert.

Verallgemeinernd lässt sich feststellen, dass sowohl die hardwarenahe Simulation als auch die Simulation des Protokollstacks mit einem sehr hohen Detaillierungsgrad hervorragend durch eine breite Auswahl an Simulatoren unterstützt wird. Die abstraktere algorithmische Betrachtung von Sensornetzwerken hat jedoch bislang noch sehr wenig Unterstützung durch Simulationswerkzeuge erfahren. Unserer Ansicht nach ist dieses Gebiet von enormer Wichtigkeit, um

Algorithmen für Sensornetze zu entwickeln ohne mit den Problemen konkreter Protokolle und deren Implementierung konfrontiert zu sein.

Die Notwendigkeit dieses Ansatzes wird sehr deutlich, wenn man an die Entwicklung neuartiger Algorithmen denkt. Entscheidend ist dabei zunächst nur die Qualität der von dem Algorithmus selbst produzierten Ergebnisse. Die erreichbaren Ergebnisse hängen dabei zwar von der Charakteristik des Übertragungskanals ab, da sie die Übertragungsverzögerungen und Paketverluste bestimmt. Aus Sicht des Algorithmus ist es aber nicht unterscheidbar, ob hinter dieser Charakteristik eine zeitintensive Simulation der physikalischen Welt und des verwendeten Protokollstapels stattgefunden hat, oder ob gut gewählte Zufallsverteilungen diese Charakteristik modellieren. So kann je nach Ziel der Simulation die Situation entstehen, dass ein Großteil der verfügbaren Rechenzeit darauf verwendet wird, Protokolle zu simulieren, die ohne unmittelbaren Belang für das Ergebnis sind. Abschnitt 4 zeigt an einem einfachen Beispiel, welche Steigerung der Performanz durch Verzicht darauf *Shawn* im Vergleich zu Ns-2 [1] erreicht.

2 Designziele von Shawn

Die Design– und Implementierungsphase von *Shawn* wurde stets von verschiedenen wichtigen Leitlinien geleitet: Auf keinen Fall sollte die Arbeit, die andere Simulatoren bereits hervorragend leisten, dupliziert werden. Simulationen sollten den Fokus mehr auf algorithmische und graphentheoretische Betrachtungen legen, als dies die in Abschnitt 1 erwähnten Simulatoren bereits leisten. Eine weitere Zielvorgabe war der Entwurf eines hochperformanten Simulators, der sowohl eine schnelle Entwicklung von prototypischen Implementierungen erlaubt, als auch im weiteren Verlauf der Protokollentwicklung das feingranulare Ausarbeiten von verteilten Protokollen unterstützt.

Um die genannten Ziele zu erreichen ist eine der grundlegenden Ideen, den Effekt von Phänomenen zu simulieren und nicht die Phänomene selbst. Anstatt z.B. ein komplettes MAC–Protokoll (inkl. des Radiopropagationsmodells) zu simulieren, modelliert *Shawn* seine Effekte (z.B. Verlust, Verfälschung und Verzögerung). Simulationen werden dadurch aufgrund der im Detail bekannten Modellierung wiederholbarer und aussagekräftiger. Oft können diese Modelle extrem effizient implementiert werden, wodurch die Simulationszeit erheblich reduziert wird und bis dato kaum erreichbare Knotenzahlen handhabbar werden (siehe Abschnitt 4). Andererseits verliert die Simulation dabei naturgemäß manches Detail, was bei der Auswertung der Ergebnisse berücksichtigt werden muss. Kommt z.B. ein vereinfachtes Kommunikationsmodell zum Einsatz, so sind die Ergebnisse vergleichbar, jedoch keinesfalls die Laufzeit.

Bei der Entwicklung unterstützt *Shawn* den Anwender bei dem vollständigen Entwicklungszyklus und verzichtet dabei bewusst auf die Festlegung auf ein konkretes Programmiermodell. Die Motivation hierfür liegt in der Beobachtung begründet, dass es von ersten Ideen für einen Algorithmus ausgehend nicht ohne Zwischenschritte ersichtlich ist, wie man zu einer verteilten Implementierung eines Protokolls gelangt. Es ist daher zweckdienlich mit einer zentralisierten Um-

setzung zu beginnen, der eine globale und flache Sicht auf das Sensornetzwerk zugrundeliegt. Dieser Zugriff auf Nachbarschaftsbeziehungen und Datenstrukturen aller Knoten ermöglicht graphentheoretische Betrachtungen, um die Eigenschaften und Probleme des Algorithmus zu verstehen und ihn zu optimieren, ohne auf die Probleme der Verteiltheit eingehen zu müssen. In mehreren Verfeinerungsstufen gelangt man schrittweise zu einer vollständig verteilten Protokollimplementierung. In *Shawn* implementierte Algorithmen können somit in weiten Grenzen zwischen den beiden Extremen der zentralisierten Programmierung und der verteilten Protokollimplementierung wählen und dabei auch Mischformen einsetzen. Die damit verbundenen Vorteile sind eine schnelle Implementierung von Prototypen, gute Optimierbarkeit und Unterstützung des Protokolldesigns.

3 Architektur

Die in Abschnitt 2 beschriebenen Ziele spiegeln sich direkt in der Architektur von *Shawn* (Abbildung 1) wider. *Shawn* besteht aus drei Hauptkomponenten: der Simulationsumgebung, der Ablaufsteuerung und den Modellen. Die Simulationsumgebung ist der Container aller Elemente der simulierten Welt. Die Ablaufsteuerung und die Modelle hingegen bestimmen das Verhalten und die Eigenschaften der Simulationsumgebung. Modelle sind in *Shawn* der zentrale Hebel, um eine größtmögliche Wiederverwendbarkeit, Erweiterbarkeit und Skalierbarkeit zu erreichen. Einige dieser Modelle formen dabei das Verhalten der simulierten Welt, wohingegen andere spezialisierte Daten bereitstellen.

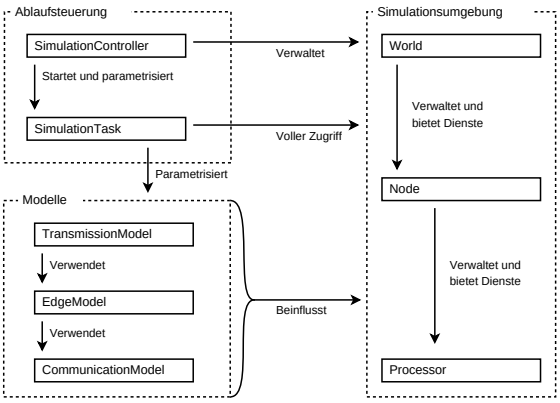


Abbildung 1. Architektur von *Shawn*

Die fundamentalen Modelle *Communication Model*, *Edge Model* und *Transmission Model* prägen die Kommunikationseigenschaften der Simulationsumgebung. Das *Communication Model* bestimmt, ob zwei Knoten prinzipiell kommunizieren können. Diese Konnektivitätsinformationen verwendet das *Edge Model*,

um eine Graphenrepräsentation des Netzes bereitzustellen. Mit seiner Hilfe ist — im Unterschied zu anderen Simulatoren — ein direkter Zugriff auf die Nachbarschaften der Knoten möglich. Damit können zentralisierte Algorithmen effizient und elegant implementiert werden. Das *Transmission Model* bestimmt die Eigenschaften einzelner Datentransmissionen (Verzögerung, Verfälschung und Verluste). Neben diesen grundlegenden Modellen existieren noch einige andere Modelle für Distanzschätzungen, Mobilität und Zufallszahlen.

Dieses System aus verschiedenen Modellen ist durch diese Aufgabenteilung extrem flexibel, da je nach Anforderungen an die Simulation konkrete Implementierungen zusammenstellbar sind. So kann z.B. ein maßgeschneidertes *Edge Model* gewählt werden: Bei kleinen Netzen ist es aus Performanzgründen sinnvoll, alle Nachbarschaftsbeziehungen im Speicher vorzuhalten, während sehr große Netze schnell an die Grenzen des verfügbaren Speichers stoßen. Alternative, intelligente Caching–Strategien oder gitterbasierte Varianten gewährleisten dann trotz moderaterer Speicheranforderungen eine gute Performanz. Konkrete Implementierungen des *Communication Models* können z.B. *Unit Disk Graphs* zur graphentheoretischen Analyse verwenden, auf physikalischen Prinzipien der Funkwellenausbreitung basieren oder schlicht eine vorgegebene Liste zur Untersuchung von Standardszenarien benutzen.

Damit kann man bei der konkreten Wahl der Modellimplementierung die Parameter Speicherbedarf, Laufzeitverhalten und Genauigkeit gegeneinander abwägen und optimal auf die Gegebenheiten anpassen.

4 Performanz

Um einen groben Anhaltspunkt zu geben, welche Performanzsteigerung im Vergleich zu Ns-2 erreicht wird, haben wir eine Reihe vergleichender Simulationen durchgeführt. Simuliert wurde ein Teil eines Zeitsynchronisationsprotokolls, wobei jeder Knoten periodisch eine Nachricht versendet, deren Zeitstempel beim Empfänger konvertiert wird. Dies gibt einen Einblick, wie gut der Simulator ein hohes Nachrichtenaufkommen verarbeiten kann. Eine solche Simulation gibt selbstverständlich nur ein unvollständiges Bild der Wirklichkeit wieder, denn Ns-2 führt wesentlich aufwändigere Berechnungen durch, um das gleiche Ziel zu erreichen. Tabelle 1 zeigt die Rechenzeit und den Speicherverbrauch von Ns-2 und *Shawn* in verschiedenen Szenarien.

Die Simulationsumgebung besteht aus einer rechteckigen Fläche, deren Größe in Vielfachen des Kommunikationsradius angegeben ist. Die Knotendichte beschreibt die durchschnittliche Anzahl von Knoten in der Broadcastumgebung eines Knotens. Es fällt auf, dass Ns-2 die Rechenzeit eines vollen Tages überschreitet, während *Shawn* noch unter einer Minute benötigt und dabei beträchtlich weniger Speicher benötigt. Die vierte Zeile beschreibt eine Simulation, die das *Simple Edge Model* verwendet, das stets eine Neuberechnung der Nachbarschaften durchführt. Alle anderen Simulationen verwenden das *List Edge Model*, das sämtliche Nachbarschaftsinformationen im Speicher hält.

Knoten-zahl	Umgebungs-größe	Knoten-dichte	Ns-2 CPU–Zeit (H:M:S)	Ns-2 Speicher-verbrauch (MBytes)	Shawn CPU–Zeit (H:M:S)	Shawn Speicher-verbrauch (MBytes)	*Edge–Model*
100	10x10	3,1	00:00:15	14,8	00:00:01	1,9	List
1,000	10x10	31,4	01:59:36	106,0	00:00:04	4,5	List
2.000	10x10	62,8	25:36:13	224,0	00:00:19	8,6	List
25.000	10x10	785,4	—	—	19:45:48	122,9	Simple
30.000	10x10	942,5	—	—	01:34:47	757,6	List
200.000	80x80	78,5	—	—	03:27:49	891,0	List
300.000	173,2x173,2	31,4	—	—	04:47:46	855,5	List

Tabelle 1. Vergleich der Laufzeit und des Speicherverbrauchs von *Shawn* und Ns-2

5 Zusammenfassung

Wir haben einen neuen Ansatz zur Simulation auch extrem großer Sensornetze vorgestellt, der im Open–Source Simulator *Shawn* realisiert wird. Wir haben die Unterschiede zu bisher allgemein verwendeten Simulatoren verdeutlicht und beschrieben, wie Anwender von *Shawn* und seinen Stärken profitieren können. Mit der aktuellen Version von *Shawn* haben wir auf Standard PC Komponenten Netzwerke mit weit mehr als 100.000 Knoten erfolgreich simuliert. Anhand einer kleinen Performanzstudie haben wir seine Leistungsfähigkeit demonstriert.

Shawn ist im Rahmen des, von der DFG im SPP 1126 geförderten, SwarmNet Projektes entstanden. *Shawn* ist unter `http://www.swarmnet.de/shawn` verfügbar und steht unter der GNU General Public Lizenz.

Literatur

1. University of Southern California: (Ns-2: Network simulator-2) http://www.isi.edu/nsnam/ns/.
2. Levis, P., Lee, N., Welsh, M., Culler, D.: (TOSSIM: Accurate and scalable simulation of entire TinyOS applications) http://www.cs.berkeley.edu/ pal/research/tossim.html.
3. Shnayder, V., Hempstead, M., rong Chen, B., Allen, G.W., Welsh, M.: Simulating the power consumption of large-scale sensor network applications. In: Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems, ACM Press (2004) 188–200
4. J. Polley, D. Blazakis, J.D.J.M.: ATEMU: A fine-grained sensor network simulator. In: Proceedings of SECON'04, The First IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks. (2004)
5. Varga, A.: (OMNeT++: Objective modular network testbed in C++) http://www.omnetpp.org.
6. University of California: (GloMoSim: Global mobile information systems simulation library) http://pcl.cs.ucla.edu/projects/glomosim/.
7. Chen, G.: (SENSE: Sensor network simulator and emulator) http://www.cs.rpi.edu/ cheng3/sense/.

Wireless Sensor Networks in virtueller Umwelt – der SEE-Ansatz für die WSN-Simulation

Jochen Koberstein, Norbert Luttenberger

Arbeitgruppe Kommunikationssysteme,
Institut für Informatik, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
{jko|nl}@informatik.uni-kiel.de

Zusammenfassung Es ist sinnvoll, vor der Ausbringung eines Sensornetzes in die zu beobachtende Umwelt – ein Vorgang, der mit hohen Kosten und großem zeitlichen Aufwand verbunden ist – Aufschluß über die Leistungsfähigkeit des Netzes zu gewinnen. Naheliegenderweise bietet sich dafür die Simulation des Netzes und seiner Umwelt an. Unser Ansatz SEE/OMNeT++ stellt dem simulierten WSN eine virtuelle Umwelt und der WSN-Applikation eine generierbare Plattformabstraktion zu Verfügung. In einem Beispiel werden neue Visualisierungsmöglichkeiten aufgezeigt.

1 Motivation

Ein Sensornetz hat die Aufgabe, durch die kooperative Erfassung von physikalischen/chemischen/... Größen ein dem Einsatzzweck entsprechendes und dabei möglichst getreues Abbild der Umwelt, in das es eingebettet ist, zu liefern. Die „Qualität“ dieses Umweltabbildes wird entscheidend beeinflußt durch die Algorithmen zur Sensordatenauswertung („*sensor fusion*“) und die damit verbundenen Algorithmen zur Kommunikation der Sensorknoten untereinander sowie die Algorithmen zur Selbstorganisation des Netzes. Diese Algorithmen wiederum bestimmen ihrerseits in einem hohen Maße den Ressourcenverbrauch im Sensornetz. Durch eine simulative Untersuchung des Netz- und Knotenverhaltens in einer virtuellen Umwelt lassen sich vor Ausbringung eines WSN wichtige Eigenschaften der programmierten Algorithmen visualisieren. Mit Hilfe dieser Erkenntnisse läßt sich eventuelles Fehlverhalten des WSN frühzeitig korrigieren. Die Simulation übernimmt damit Funktionen, die ansonsten der Testphase zugeordnet werden. In diesem Beitrag formulieren wir Anforderungen an WSN-Simulatoren und stellen unseren eigenen Ansatz SEE/OMNeT++ vor.

2 WSN-Simulation

Jede Simulation abstrahiert notwendigerweise von einigen Aspekten der zu simulierenden Realität. In dem folgenden Katalog von Anforderungen sollen unter Voraussetzung der „üblichen Funktionalität“ eines Netzwerksimulators diejenigen zusätzlichen Aspekte herausgearbeitet werden, auf die in einer WSN-Simulation nicht verzichtet werden sollte:

1. Ein WSN-Simulator sollte einem Sensornetz eine virtuelle Umwelt bereitstellen, d.h. eine Menge von Informationsquellen, die in Raum und Zeit verbunden sind. Diese Informationsquellen liefern in der WSN-Simulation den „Input“ für die Sensoren der WSN-Knoten.
2. Ein WSN-Simulator sollte den zu simulierenden Algorithmen eine Plattformabstraktion für die WSN-Knoten zur Verfügung stellen, die so gestaltet ist, daß die in der IDE entwickelte Implementierung eines Algorithmus unverändert in die Simulation und den realen WSN-Knoten übernommen werden kann.
3. Manche WSN-Selbstorganisationsalgorithmen zeigen emergentes Verhalten, das nur verstanden werden kann, wenn vom Simulator eine detaillierte Ereignisspur erfaßt und visualisiert wird. Im Zusammenhang mit solchen Analysen läßt sich die WSN-Simulation nur noch unscharf von Emulation und Test unterscheiden. Offensichtlich ist es nahezu unmöglich, solche Analysen an einem bereits ausgebrachten WSN vorzunehmen: Die Ausbringung eines WSN darf nicht die Voraussetzung für seinen Test sein.
4. Ein WSN-Simulator sollte aus praktischen Gesichtspunkten möglichst eng an eine IDE angebunden sein, damit die Knoten-Programmierung und der Test des Netzwerkverhaltens verzahnt vollzogen werden können. Diese enge Anbindung schließt eine Nachbildung der Netzwerkausbringung ein, also z.B. die Verteilung der WSN-Knoten über dem Spielfeld, den Einschaltvorgang usw..

Um eine Simulation nicht an zu hohem Rechenaufwand scheitern zu lassen, muß ein WSN-Simulator offensichtlich von anderen Aspekten abstrahieren:

1. Die genaue Berechnung der Funkwellenausbreitung ist einerseits sehr aufwendig und setzt andererseits eine detaillierte topographische Beschreibung des Spielfelds voraus. Beide Gegebenheiten lassen es geraten erscheinen, trotz ihres geringen Realitätsgehalts von einer kreisförmigen Funkausbreitung auszugehen. Nicht verzichten sollte man allerdings auf die Simulationen von Kollisionen: Zum einen sind Kollisionen in einem Funknetz sehr „teuer“, und zum anderen können sie die Übertragungskapazität so empfindlich beeinflussen, daß eine pauschale Abschätzung (z.B.: „30% aller Pakete kollidieren“) nicht mehr realistisch ist.
2. Ebenso aufwendig (oder sogar undurchführbar) ist eine genaue Berechnung des Energieverbrauchs eines Sensorknotens. Möglicherweise ist es ausreichend, ein Maß für den Energieverbrauch aus der Anzahl der gesendeten und empfangenen Nachrichten abzuleiten, da alle mit Funk verbundenen Vorgänge mit dem relativ höchsten Energieverbrauch einhergehen.
3. Auch für die Drift von Uhren und Sensorwerten aufgrund von Temperaturschwankungen und anderen Umwelteinflüssen lassen sich allenfalls pauschale Modelle angeben. In den meisten Fällen wird man sich mit der Angabe einer pauschalen prozentualen Abweichung begnügen müssen.

Im folgenden Abschnitt bewerten wir existierende und im WSN-Umfeld verwendete Simulatoren anhand dieser Kriterien.

3 WSN-Simulatoren

Es gibt eine Vielzahl von Simulatoren, mit denen sich die bei Funkkommunikation und Mobilität auftretenden Effekte simulieren lassen, unter denen der bekannteste sicherlich der *ns-2* ist. Es gibt dagegen kaum Ansätze, die eine virtuelle Umgebung in die Simulation einbeziehen. Die beiden einzigen den Autoren bekannten Simulatoren dieser Art sind *SensorSim* [1] und *VisualSense* [2].

SensorSim erweitert ns-2 um ein *power model* und ein *sensor model*. SensorSim gestattet hybride Simulation, d.h. die Interaktion eines Simulationsmodells mit einem realen WSN. Die gleiche Applikationssoftware läuft dabei sowohl auf den realen WSN-Knoten als auch auf den simulierten Knoten. Es fehlt allerdings eine leistungsfähige Visualisierung zur Simulationszeit. Auf ihrer Website weisen die Autoren darauf hin, daß die weitere Verbreitung von SensorSim wegen der „unfinished nature of the software“ eingestellt wurde (2001).

Wie der Name bereits vermuten läßt, hat bei VisualSense die Visualisierung des Ablaufgeschehens in einem WSN einen hohen Stellenwert. Es gibt zusätzlich eine elaborierte Unterstützung für die Modellierung der Funkübertragung. Allerdings läßt sich das Verhalten eines WSN-Knoten nur in Java bzw. durch ein sog. *Ptolemy II model* (ein weiterer Simulator) spezifizieren; es fehlt also die geforderte direkte und unmittelbare Übertragbarkeit der Applikationen.

4 Der SEE/OMNeT++-Ansatz

4.1 Architektur

Da – wie ausgeführt – die verbreiteten Netzwerksimulatoren wie ns2 bzgl. der Simulation von drahtlosen Netzen sehr ausgereift sind, aber andererseits keine virtuelle Umwelt für Sensoren bieten, liegt es nahe, einen existierenden Simulator zu erweitern. Aus pragmatischen Gründen (u.a. wegen der hervorragenden Visualisierungsfähigkeiten) haben wir uns für OMNeT++ [3] in Zusammenhang mit dem MobilityFramework [4] entschieden und nennen die Erweiterung „Simulation Environment Extension“ (SEE).

Diese Erweiterung (Abbildung 1) ist weitestgehend vom Netzwerksimulator entkoppelt, um eine mögliche spätere Nutzung mit einem anderen Simulator zu vereinfachen. Das Kernelement dieser Erweiterung ist die SEE-API. Diese stellt die oben angesproche Plattformabstraktion dar. Darunter befindet sich das „Sensor Management“, das alle im Netz simulierten Sensoren verwaltet. Das Sensor Management bedient sich einer Reihe von zunächst abstrakten Informationsquellen, die ihrerseits reale Informationsquellen wie z.B. Bilddateien, Videoströmen oder spezielle physikalische Modelle kapseln. Diese Quell-Module sind dabei auch für evtl. zu simulierende Sensorungenauigkeiten verantwortlich.

Das Sensor Managment ist über eine „Basic Simulator API” (BS-API) an den OMNeT++ Netzwerksimulator angebunden. Diese API stellt Funktionalitäten wie Eventhandling, Messagehandling, Zeit- oder Positionsinformationen des Netzwerksimulators zur Verfügung.

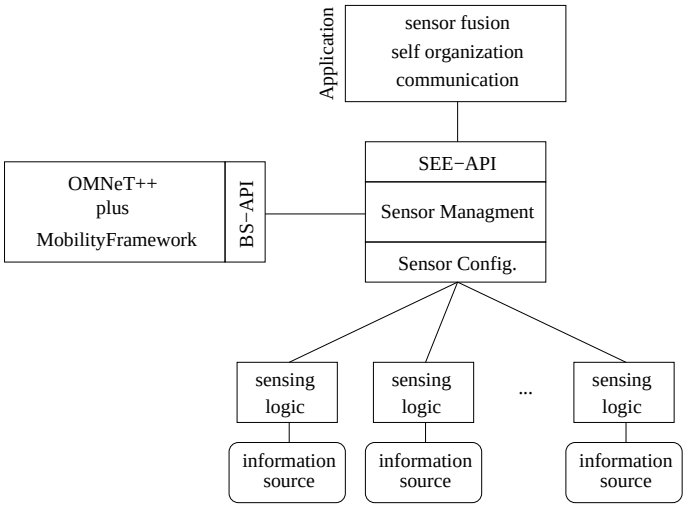


Abbildung 1. Architektur der „Simulation Environment Extension“ (SEE)

4.2 Der SEE-Generator

Um eine offene Lösung bzgl. der angesprochenen Plattformabstraktion anbieten zu können, wurde ein Generator entwickelt, der die SEE-API aus einer als XML-Dokument kodierten Plattformbeschreibung generiert. Dieses Dokument enthält Informationen bzgl. der genutzten Sensoren (z.B. Rückgabewerte, Abhängigkeiten, Intervalle usw.), aber auch die für die Simulation notwendigen Parameter der Informationsquellen (z.B. Dateien, Wirksamkeitsintervalle usw.). Ein Beispieldokument ist in Abbildung 2 angedeutet.

Auf Basis dieser Information wird die SEE-API generiert, wobei in diesem Beispiel die `action`-Elemente des XML-Dokuments auf API-Funktionen wie `int readRTC()`, `int regHandlerRTC(void(*)())` und `float readTemperature()` abgebildet werden.

Die Sensorkonfiguration enthält überdies `depends`-XML-Elemente, die die Abhängigkeit der les- und schreibbaren Werte von Raum und Zeit festlegen. So hängt der über den Temperatursensor lesbare Wert von Ort und Lesezeitpunkt ab. Die Real-Time-Clock dagegen ist vom Aufenthaltsort des Knoten unabhängig.

Durch die `internalSource` bzw. `externalSource`-XML-Elemente wird festgelegt, ob eine Informationsquelle ausprogrammiert werden soll (internal) oder eine externe Datei gelesen werden soll. Eine Real-Time-Clock wird z.B. mit Hilfe der Simulationsuhr implementiert, indem zu den regelmäßigen Ticks der Simulationsuhr eine Gangabweichung hinzuaddiert wird.

Zur Beschreibung der Funkschnittstelle der Knoten wird ein ähnlich aufgebautes `stringSensor`-XML-Element benutzt, welches auch eine `write`-Aktion beinhaltet.

```
<sensorInterface>
    <intSensor>
        <name>RTC</name>
        <action>read</action>
        <action>interrupt</action>
        <depends>simTime</depends>
        <internalSource>
            <description>My realtime clock</description>
        </internalSource>
        <minValue>0</minValue>
        <maxValue>unbounded</maxValue>
    </intSensor>
...
    <floatSensor>
        <name>Temperature</name>
        <action>read</action>
        <depends>simTime</time>
        <depends>nodeLocation</depends>
        <externalSource>
            <sourceFile>
                <filename>myImage.gif</filename>
                <startTime>10</startTime>
                <overlay>add</overlay>
            </sourceFile>
            <scaleValueRange>false</scaleValueRange>
        </externalSource>
        <minValue>-20</minValue>
        <maxValue>120</maxValue>
    </floatSensor>
</sensorInterface>
```

Abbildung 2. Beispiel einer Sensorkonfiguration

Der SEE-Generator erstellt die in Abbildung 1 dargestellte SEE-API und Code zur Anbindung der Informationsquellen an das Sensor Managment. Zur Portierung der Applikation auf reale WSN-Knoten ist die Implementierung dieser API erforderlich.

4.3 Beispiel für Visualisierung

Mit Hilfe des SEE-Prototyps und des OMNeT++/MobilityFramework Netzwerksimualtors lassen sich die virtuelle Umwelt, in die ein Sensornetz eingebettet ist, und das von den WSN-Knoten in Kooperation erfasste Umweltabbild visualisieren.

Abbildung 2 zeigt links die grafische Repräsentation der Verteilung einer physikalischen Größe über einer Fläche und ein auf dieser Fläche operierendes mobiles Sensornetz. Es wird angenommen, daß die Knoten auf Basis des in [5] beschriebenen Paradigmas des "distributed virtual Shared Information Space" miteinander kooperieren. Das heißt, daß sie jeweils lokale Sichten auf ihre Umwelt aufbauen, indem sie erfasste Information im Netzwerk austauschen und damit ihre lokale Sicht über die selbst gesammelte Information hinaus erweitern. Der rechte Teil von Abbildung 2 zeigt die grafische Repräsentation der von WSN-Knoten 0 aufgebauten lokalen Sicht auf die virtuelle Umwelt nach einer gewissen Simulationszeit. Über die Visualisierung des Verhaltens der WSN-Applikation

hinaus läßt sich mit Hilfe statistischer Methoden ein Maße für die Qualität des gewonnenen Umweltabbilds gewinnen.

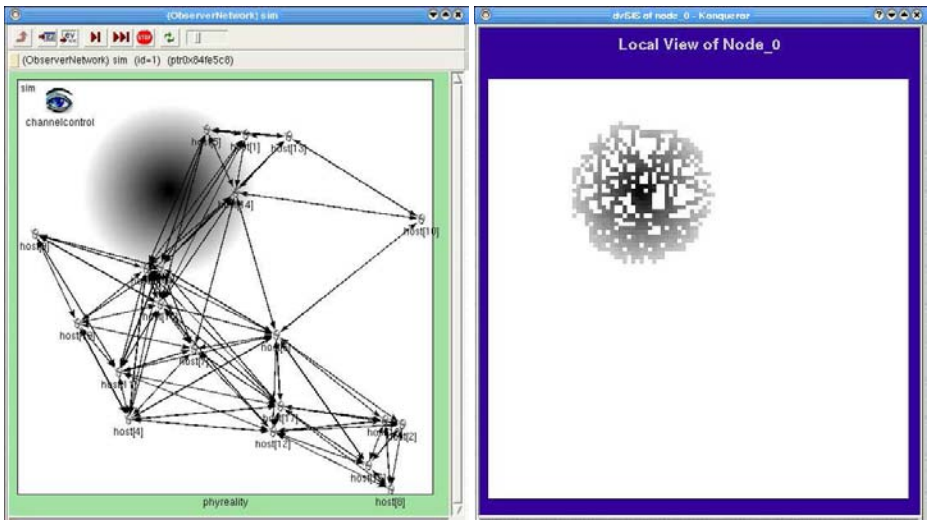


Abbildung 3. Sensornetzvisualisierung

5 Ausblick

Im nächsten Arbeitsschritt ist vorgesehen, für die so erweiterte Simulationsumgebung eine direkte Anbindung an eine IDE zu schaffen, um den Iterationszyklus Implementieren/Simulieren/Testen noch weiter zu vereinfachen.

Literatur

1. Park, S., Savvides, A., Srivastava, M.B.: SensorSim: A Simulation Framework for Sensor Networks. (In: MSWiM 2000)
2. Baldwin, P., Kohli, S., Lee, E.A., Liu, X., Zhao, Y.: VisualSense: Visual Modeling for Wireless and Sensor Network Systems. Technical Memorandum UCB/ERL M04/08, University of California, Berkeley, CA 94720, USA (2004)
3. Varga, A.: The OMNeT++ Discrete Event Simulation System. (In: European Simulation Multiconference (ESM 2001))
4. Drytkiewicz, W., Sroka, S., Handziski, V., Koepke, A., Karl., H.: A Mobility Framework for OMNeT++. (In: 3rd International OMNeT++ Workshop 2003)
5. Koberstein, J., Reuter, F., Luttenberger, N.: The XCast Approach for Content-based Flooding Control in Distributed Virtual Shared Information Spaces–Design and Evaluation. (In: 1st European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN 2004))

AEON: Accurate Prediction of Power Consumption in Sensor Networks

Olaf Landsiedel, Klaus Wehrle, Simon Rieche, Stefan Gtz, Leo Petrak

Protocol Engineering & Distributed System
University of Tübingen, Germany
firstname.lastname@uni-tuebingen.de

Abstract. Power consumption is a crucial characteristic of sensor networks and their applications, as sensor nodes are commonly battery driven. Although recent research focuses strongly on energy aware applications and operating systems, power consumption is still a limiting factor. Once sensor nodes are deployed, it is challenging and sometimes even impossible to change batteries. As a result, erroneous lifetime prediction causes high costs and may render a sensor network useless, before its purpose is fulfilled.

In this paper we present AEON, a novel evaluation tool to quantitatively predict power consumption of sensor nodes and whole sensor networks. Our energy model, based on measurements of node current draw and the execution of real code, enables accurate prediction of the actual power consumption of sensor nodes. Consequently, preventing erroneous assumptions on node and network lifetime. Moreover, our detailed energy model allows to compare different low power and energy aware approaches in terms of energy efficiency.

1 Introduction

Research advances in highly integrated and low power hardware, wireless communication technology, and highly embedded operating systems enable sensor networks. A sensor network may consist of several thousands of nodes, each with very limited processing, storage, sensing and communication abilities. Sensor nodes are usually battery driven. Due to these limited energy resources, energy consumption is a crucial design factor for hardware and software developers. It is crucial to evaluate the power consumption of applications accurately, since the choice of algorithms and programming styles may influence energy consumption heavily. In this paper we present AEON (Accurate Prediction of Power Consumption), a novel evaluation tool to quantitatively predict power consumption of sensor nodes. Based on the execution of real code and measurement of node current draw, our model enables accurate prediction of the actual power consumption of nodes.

The remainder of this paper is structured as follows. First, we discuss related work in Section 2. Section 3 presents the energy model and a detailed validation. Next, section 4 evaluates the power consumption of various TinyOS applications. Finally, Section 5 concludes the paper and presents future work.

2 Related Work

For embedded systems development many energy profiling tools have been presented [1,2] to model the power consumption of processors and microcontrollers for embedded systems. They include models for the memory, serial communication and other parts of the microcontroller. These tools mainly focus on hardware development and not on the evaluation of software for distributed systems. None of the tools include models for devices next to the microcontroller like inter-device communication, external memory, sensors and actuators.

Recently, Power Tossim [3] has been presented as an extension to the TinyOS [4] simulator Tossim [5] to estimate the power consumption of the Mica2 senor node. Since Tossim provides an abstracted model of the node and compiles applications to x86 executables, it does not model all hardware details, like interrupts and execution time. Hardware abstraction in Tossim results in a high lack of detail and accuracy in the power consumption prediction of Power Tossim.

3 AEON's Energy Model

Coarse approximations of the power consumption are usually derived from the number of packets transmitted and CPU duty cycles [6, 7]. However, such approximations fail to capture low-level details and states of a device. For quantitative evaluation a precise and detailed low-level model of all device components, e.g. microcontroller, radio, sensors, and memory, is needed. The single states of every component form the state of the whole node. Thus, the total draw of current of a node is the sum of the currents of each component in the respective states. Our approach for modeling power consumption consists of three steps: (1) We measured the current draw of each state of all sensor node components to calibrate our model. (2) The model resulting from these measurements, e.g. the energy consumption of all component states, is implemented in a sensor node emulator. (3) The model is validated with oscilloscope measurements and battery lifetime tests running TinyOS applications. We address these steps in the following sections.

For AEON we focus on modeling the power consumption of the Mica2 platform. However, by repeating the following procedure, the energy model can be easily adapted to other platforms.

3.1 Calibrating the Energy Model

To calibrate our energy model we implemented specific applications which keep all node components in a certain state during program execution. These test applications allow us to measure the draw of current of various component state combinations with highly precise ampere meters. Based on this data, we extracted the draw of current of each component's state and estimated its energy consumption. Finally, the power consumption of each component forms our energy model for the sensor node (see Table 1). We measured over twenty different states of three Mica2 nodes. Measurement deviation for each node was less than 0.5 %. However, due to electronic components tolerances,

Device	Current	Device	Current
CPU		**Radio** (900 MHz)	
Active	7.6 mA	Core	60 μA
Idle	3.3 mA	Bias	1.38 mA
ADC Noise	1.0 mA	Rx	9.6 mA
Power down	116 μA	Tx (-18 dBm)	8.8 mA
Power Save	124 μA	Tx (-13 dBm)	9.8 mA
Standby	237 μA	Tx (-10 dBm)	10.4 mA
Ext Standby	243 μA	Tx (-6 dBm)	11.3 mA
		Tx (-2 dBm)	15.6 mA
LED (each)	2.2 mA	Tx (0 dBm)	17.0 mA
		Tx (+3 dBm)	20.2 mA
Sensor Board	0.7 mA	Tx (+4 dBm)	22.5 mA
		Tx (+5 dBm)	26.9 mA

Table 1: Measurements of current draw form the base of the energy model.

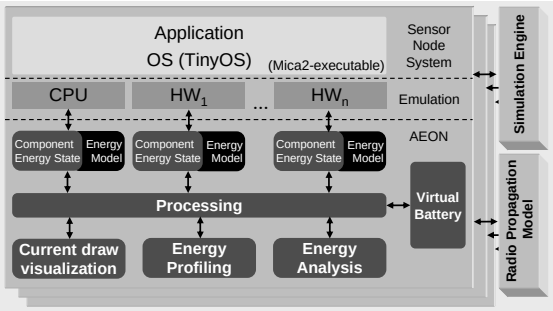


Fig. 1: Block diagram of AEON's architecture.

the results of different nodes varied by approximately 5 %. Further, our measurements indicate, that CPU access to the ADC, UART or SPI bus do not draw more current than any other CPU instruction.

3.2 AEON's Implementation

To enable exact modeling of application execution and device state changes, we base our model on Avrora. The execution of real code guarantees accurate device timing, which allows to model the state of every single component at every point in time during program execution. The energy model extends the implementation of each hardware component in AVRORA (see Fig. 1) by monitoring their power usage. Furthermore we added energy profiling to enable a breakdown to individual source code routines and components as well as a radio propagation model to provide realistic node communication.

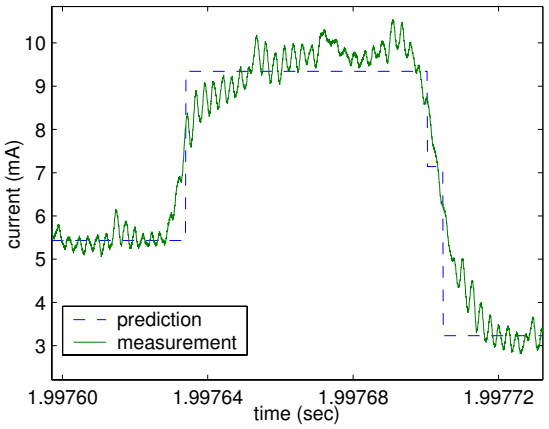


Fig. 2: Comparing detailed current measurements of a oscilloscope and AEON's prediction of current draw (TinyOS `Blink` application).

3.3 Validation of the Energy Model

Model validation is important for reliable and accurate results. For validation we use two different approaches: (1) Oscilloscope measurements of TinyOS applications. (2) Long time validation to evaluate whether the predicted lifetime matches the actual node lifetime. To validate our model we measured standard sensor node applications with an oscilloscope over various amounts of time. As example, Fig. 2 shows a (noise filtered) measurement and corresponding results predicted by AEON for the TinyOS `Blink` application. The average error for this measurements is about 0.4 % (standard deviation: 0.24), measurements of other applications are in the same range.

Recently, the sensor node manufacturer Crossbow published battery life tests [8] for the Mica2 node (433 MHz radio). These tests indicated that the TinyOS `CntToLedsAndRfm` application operated for 172 hours. For the corresponding battery type, AEON predicts a lifetime of approximately 168 h and 165 h for the 433 MHz radio and the 933 MHz radio, respectively. The prediction error of 2 % is due to voltage fluctuation, battery tolerance and the fact that the nodes' current draws differ by 5 % as mentioned in section 3.1. Based on these results we consider our energy prediction tool AEON as highly precise.

4 Evaluating TinyOS and Applications

Our model enables detailed energy evaluation for each state of all node components. Table 2 presents a breakdown for various TinyOS applications based on AEON's predictions. For a deep evaluation of various TinyOS components, such as Power Management, Multihop Routing and Low Power Listening, see [9].

Test Application	Predicted Energy Consumption (in mJ) and Node Lifetime							
	CPU		Radio		LEDs	Sensor Board	Total	Lifetime (days)
	active	idle	rx	tx				
`Blink`	0.37	601.6	0	0	196.2	-	798.2	25.8
`CntToLeds`	0.77	601.5	0	0	590.6	-	1193	17.4
`CntToLedsAndRfm`	93	560.7	1651	130	589.6	-	3025	6.9
`CntToRfm`	92.7	560.8	1651	130	0	-	2435	8.5
`RfmToLeds`	82.9	565.2	1727	0.6	589.0	-	2965	7.0
`SenseToLeds`	1.85	601	0	0	0	126	728.8	28.5
`SenseToRfm`	4.39	560.3	1651	130	0	126	1937	10.7

Table 2: Component breakdown for TinyOS 1.1.7. Applications were executed for 60 emulated seconds. `SenseToLeds` was configured to read sensor value 0 and so its LEDs did not consume energy.

5 Conclusion and Future Work

As sensor networks gain more importance in the research communities, we believe that it is crucial to have tools for analyzing and evaluating their behavior accurately. Energy is a limited resource for sensor nodes. Thus, a deep evaluation of energy consumption and accurate lifetime prediction is crucial before deployment. As devices are commonly deployed embedded into the environment, it is very challenging and sometimes even impossible to change batteries, if nodes run out of power. As a result nodes may fail and not fulfill their purpose, long before the expected lifetime is reached. Erroneous lifetime prediction causes high costs and may even render a network of small devices useless, making a deep and accurate energy analysis and precise lifetime prediction a must.

References

1. Tan, T.K., Raghunathan, A., Jha, N.: EMSIM: An Energy Simulation Framework for an Embedded Operating System. In: Proc. of ISCAS. (2002)
2. Sinha, A., Chandrakasan, A.P.: JouleTrack - A Web Based Tool For Software Energy Profiling. In: Proc. of Design Automation Conference. (2001)
3. Shnayder, V., et al.: Simulating the Power Consumption of Large-Scale Sensor Network Applications. In: Proc. of SenSys. (2004)
4. Levis, P., et al.: The Emergence of Networking Abstractions and Techniques in TinyOS. In: Proc. of NSDI. (2004)
5. Levis, P., et al.: TOSSIM: accurate and scalable simulation of entire tinyOS applications. In: Proc. of SenSys. (2003)
6. Madden, S.R., et al.: TAG: a Tiny AGgregation Service for Ad-Hoc Sensor Networks. In: Proc. of OSDI. (2002)
7. Woo, A., Culler, D.E.: A transmission control scheme for media access in sensor networks. In: Proc. of MobiCom. (2001)
8. Suh, J., et al.: MICA2 AA Battery Pack Service Life Test. Crossbow Technology, Inc. (2004)
9. Landsiedel, O., et al.: Enabling Detailed Modeling and Analysis of Sensor Networks. To appear in PIK, Special Edition on Sensor Networks (2005)

Monitoring Energy Consumption In Wireless Sensor Networks

Matthias Witt, Christoph Weyer, and Volker Turau

Hamburg University of Technology, Department of Telematics
Schwarzenbergstraße 95, 21073 Hamburg, Germany
{matthias.witt,c.weyer,turau}@tuhh.de

Abstract. This note introduces an approach to monitor the consumption of energy in wireless sensor networks based on video streams composed from sequences of temperature maps. It is used to compare and evaluate beacon-less geographic routing algorithms.

1 Introduction

Wireless sensor networks are increasingly becoming an important part of the next-generation network infrastructure. One of the chief limitations of these wireless networks is the limited battery power of the network nodes. The lifetime of a wireless sensor network is determined by the duration over which the network can perform its assigned tasks. If a sufficient number of nodes run out of energy, it may impair the ability of the sensor network to function. Therefore, minimizing energy consumption is an important challenge in mobile networking [1]. Capable architectures and circuit techniques to address energy consumption in both standby and active modes is the basis of wireless networks. Energy preserving procedures can be leveraged at different layers of a sensor network architecture:

- *MAC layer*: S-MAC [2] is a protocol developed to address energy issues in sensor networks. It uses a simple scheduling scheme to allow neighbors to sleep for long periods and synchronize wakeups.
- *Adaptive Topology Schemes*: STEM [3] is a two-radio architecture that achieves energy savings by letting the data radio sleep until communication is desired while the wakeup radio periodically listens using a low duty cycle. In GAF [4] nodes use location information to divide the network into fixed square grids and nodes in each grid alternate between sleeping and listening.
- *Energy aware routing*: With power-aware broadcasting based on connected dominating sets [5] only nodes in a dominating set need to relay broadcast packets. Activity scheduling rotates the role of nodes between dominating and dominated.
- *Transmission power control*: The transmission power of the nodes is reduced as long as the topology has desired properties such as k-connectivity [6].
- *In-network aggregation*: Network traffic is reduced by aggregating sensor data inside the network and thus saving energy [7].

2 Energy Management

The goal of energy management is twofold: Minimizing the total energy consumption of all nodes in the network and secondly, achieving a homogeneous consumption of energy throughout the network. The second criteria is aimed at maximizing the network lifetime. It is well known that these are two conflicting criteria. Network lifetime is defined as the time until the network no longer is able to fulfill the tasks it was designed for. Depending on the task this might be when

- the first node fails,
- the network becomes disconnected and packets can no longer be routed between any pair of locations,
- the number of serviceable nodes falls below a critical level, or
- a specific region is no longer covered by any active node.

A theoretical analysis of the lifetime of a wireless network requires a model of energy consumption. Since communication is the dominant factor in power consumption, most models are based on communication only. Due to the complicated interactions between the different layers, these models consider only application related data packets. But such an analysis excludes the energy consumption of the idle mode and caused by lower level protocols such as the MAC layer or the routing protocol. Nevertheless, such models can be helpful in the preliminary analysis of network routing algorithms. A better tool for this purpose are simulation environments that consider MAC layer issues and that support sophisticated energy models. Unfortunately, realistic experiments are in most cases too sumptuous.

To evaluate and compare the energy consumption of different routing protocols we utilize temperature maps. Contour lines on the temperature maps are similar to contour lines on a topographic map; they show areas of higher or lower amounts of remaining energy. To this end, we simulate a sensor network with its nodes randomly distributed in a 2-dimensional plane with the tool ns-2. While running a series of routing tasks the energy levels of all nodes (related to sending packets) are read periodically over a fixed span of time and transformed into temperature maps. Finally, sequences of these maps are combined into video streams. Combined with a visual representation of other characteristic quantities such as error rate and average path length, this approach brings about a simple mechanism for analyzing and comparing the energy consumption of routing algorithms and the resulting network lifetimes.

The discussed visualization technique is used to analyze and compare different beacon-less routing algorithms. In particular, we investigate a novel algorithm called *BGR (Blind Geographic Routing)* [8]. This algorithm is reliable in fields with high node density and sends significantly fewer packets than other algorithms. Redundancy in the network topology is exploited to achieve a uniform energy consumption and thus, to extend the network lifetime.

We consider different application patterns such as all nodes send sensor readings periodically or sporadically to a fixed sink (with and without in-network

aggregation) or randomly selected pairs of nodes exchange packets. At the beginning, a fixed amount of energy is assigned to every node. When this energy is consumed by a node, it is no longer available for the application. Furthermore, we consider cases, in which selected nodes (either randomly determined or computed via a backbone algorithm such as those based on connected dominating sets) get assigned a significantly higher amount of energy at the start of the simulation.

Figure 1 shows an example of a temperature map with 150 nodes; the dark nodes already ran out of energy. The left bar shows the number of hops divided by the optimal number of hops; the right bar depicts the packet delivery rate throughout the last measurement interval.

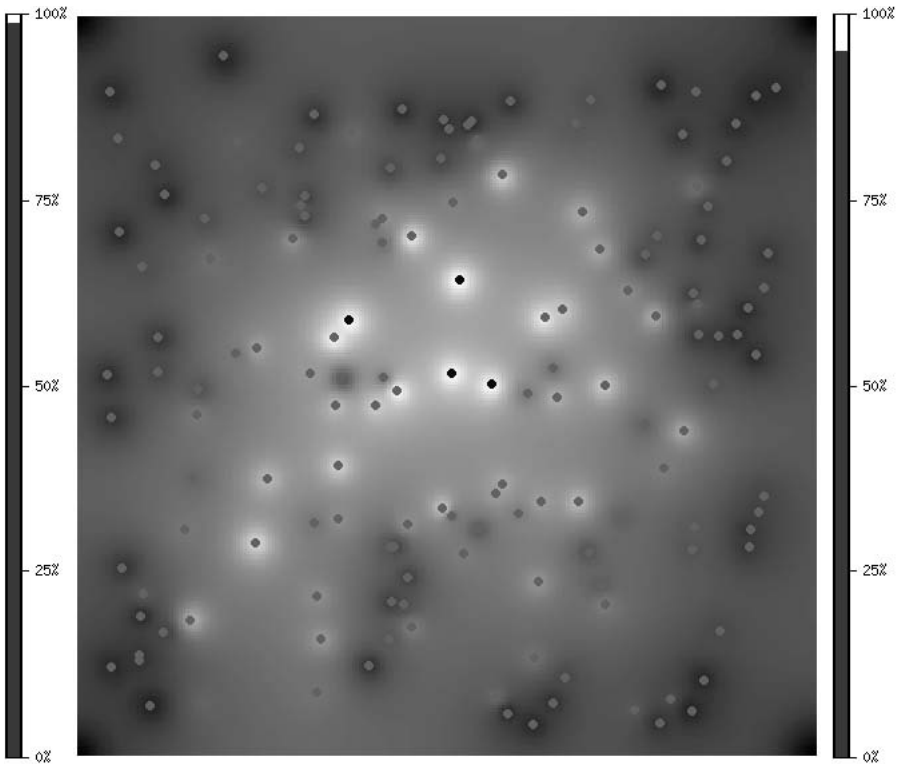


Fig. 1. Typical temperature mapping

References

1. Jones, C., Sivalingam, K., Agrawal, P., Chen, J.: A Survey of Energy Efficient Network Protocols for Wireless Networks. *Wireless Networks*, Vol. 7(4) (2001) 343–358
2. Ye, W., Heidemann J., Estrin, D.: An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks. *IEEE Infocom 2002* (2002)
3. Schurgers, C., Tsiatsis, V., Ganeriwal, S., Srivastava, M.: Topology Management for Sensor Networks: Exploiting Latency and Density. *ACM MobiHoc 2002* (2002)
4. Xu, X., Heidemann, J., Estrin, D.: Geography-informed Energy Conservation for Ad Hoc Routing. In: *Proceedings of MobiCom 01*, Rome (2001) 16–21
5. Wu, J., Wu, B., Stojmenovic, I.: Power-aware broadcasting and activity scheduling in ad hoc wireless networks using connected dominating sets. *Wirel. Commun. Mob. Comput.* (2003) 3:425–438
6. Ramanathan, R., Rosales-Hain, R.: Topology Control of Multihop Wireless Networks Using Transmit Power Adjustment. In: *Proc. IEEE INFOCOM 2000*, Tel Aviv (2000) 404–413
7. Turau, V., Weyer, C., Witt, M.: Ein robustes Datenmonitoring-Verfahren für Sensornetzwerke. In: Paul Molitor (editor) et al.: *it – Information Technology*, Oldenbourg, Vol. 47, No. 2 (2005)
8. Witt, M., Turau, V.: BGR: Blind Geographic Routing for Sensor Networks. Accepted for publication at: *Third Workshop on Intelligent Solutions in Embedded Systems*, Hamburg (2005)

On the Feasibility and Meaning of Security in Sensor Networks

Zinaida Benenson and Felix C. Freiling

Department of Computer Science, RWTH Aachen University, Germany

Abstract. This paper is an invitation for the participants of "Fachgespräch Sensornetze" to discuss security issues in sensor networks in relation to particular projects in which the participants are involved. The central question to be discussed is: In what sense are the applications constructed by the participants secure? To structure the discussion, we give a taxonomy of adversary classes for sensor networks and give an overview over methods for securing sensor networks against these adversaries.

1 Introduction

Sensor networks provide unique opportunities of interaction between computer systems and the environment. Their deployment can be described at high level as follows: The sensor nodes measure environmental characteristics which are then processed in order to detect events. Upon event detection, some actions are triggered. This very general description applies to extremely security-critical military applications as well as to such benign ones (in terms of security needs) as habitat monitoring.

Considering the Internet as an example, it is extremely difficult to add security to systems which were originally designed without security in mind. The goal of security is to "protect right things in a right way" [1]. Thus, careful analysis is needed concerning which things to protect against which threats and how to protect them. This analysis is only possible in context of a particular class of applications. Therefore, we invite the workshop participants to start the analysis of *realistic* security requirements of their projects. In the following, we give a framework for this analysis.

We first give an overview of security goals in sensor networks, i.e., "what to protect" (Section 2). Then we describe the adversary classes (Section 3), i.e., "against whom to protect" and the existing solutions to various security problems (Section 4), i.e., "how to protect". We outline open problems and summarize in Section 5.

2 Security Goals in Sensor Networks

A sensor network can be considered as a highly distributed database. Security goals for distributed databases are very well studied: The data should be accessible only to authorized users (Confidentiality), the data should be genuine (Integrity), and the data should be always available on the request of an authorized user (Availability). All these requirements also apply to the sensor networks and their users. Here, the distributed database,

as well as the sensor network, are considered as a single entity from the user's point of view. Therefore, we call these security issues *outside security*. To outside security belong, e.g., query processing [7, 11, 13], access control [3] and large-scale anti-jamming services [14].

The internal organization of a distributed database and of a sensor network are quite different. Outside security, as well as all other types of interactions between the user and the corresponding system, is based on the interactions between the internal system components (servers or sensor nodes, respectively). We call security issues for such interactions *inside security*. In sensor networks, inside security realizes robust, confidential and authenticated communication between individual nodes [9, 12]. This also includes in-network processing [5, 15], routing [4, 10] and in-network data storage [6].

Aside from necessitating the distinction between inside and outside security, sensor networks differ from conventional distributed databases in other obvious ways: A distributed database consists of a small number of powerful servers, which are well protected from physical capture and from network attacks. The servers use resource-demanding data replication and cryptographic protocols for inside and outside security. In contrast, a sensor network consists of a large number of resource-constrained, physically unprotected sensor nodes which operate unattended. Therefore, security measures for distributed databases cannot be directly applied to sensor networks. So even if a sensor network can be considered as a distributed system (e.g., as an ad hoc network), sensor networks have some additional features which make security mechanisms for distributed systems inapplicable. Apart from the obvious resource constraints, single sensor nodes are relatively unimportant for the properties of the whole system – at least, if the inherent redundancy of sensor networks is utilized in their design.

To summarize, security goals in sensor networks are similar to security goals in distributed databases (outside security) and distributed systems (inside security). However, many standard mechanisms (e.g., public key infrastructures or agreement protocols) are not applicable because they require too many resources or do not scale to hundreds or thousands of nodes. New approaches are needed to ensure security of sensor networks. These must exploit the natural features of sensor networks: inherent redundancy and broadcast communication.

Before discussing the protection techniques, we should determine against which threats to protect, which brings us to the adversaries.

3 Adversary Models for Sensor Networks

Adversary models should be determined with respect to applications. Who are adversaries and what goals do they have? A military sensor network has other security requirements than a network for habitat monitoring. The adversaries can be classified according to the following parameters: goals, interference, presence, and available resources. We treat each parameter in turn.

Goals. Which of the three classical security goals (Confidentiality, Integrity, Availability) does the adversary try to violate? If the data are valuable (legitimate users have to pay) or privacy relevant, the adversary would try to gain unauthorized access. If the

data are critical (building or perimeter security), the adversary would try to modify data, such that the alarm is not raised in case of intrusion. Also a denial-of-service attack can successfully disable the network (violating Availability).

Interference. A *passive* adversary eavesdrops on the network traffic and analyzes it (online or offline). *Active* adversaries come in several flavors:

- A *fail-stop* adversary attacks sensors such that they completely break down. The sensors can be destroyed or drained of energy.
- A *disturbing* adversary can try to partially disturb protocols, even if he does not have full control over any sensors. He can selectively jam the network, or fool some sensors into measuring fake data. For example, he can hold a lighter close to a temperature sensor [13] or re-arrange the topology of the sensor network by throwing sensors around.
- A *malicious* adversary can run arbitrary programs on a sensor node. This can be achieved by exploiting some software bug, or by probing out cryptographic keys and other secret information and then cloning the node. The problem of *node capture* is typical for a malicious adversary.

Presence. A *local* adversary can influence a small localized part of the network [3], for example he has one receiver which can only eavesdrop on several meters, or can manipulate only the sensor node which is the closest to him (for example, it is installed in his office). A *partially present* adversary is either mobile (a car with receiver driving around) or managed to install his own sensor nodes in the sensor field and coordinates them [2]. A *global* adversary is present in the whole network.

Available resources. There are several resource classes to consider: funding, equipment, expert knowledge, time. In the world of tamper resistance, the adversaries are divided into three classes: clever outsiders, knowledgeable insiders and funded organizations [1]. Commodity sensor networks are likely to be attacked by clever outsiders (who are probably just trying things out) and possibly by knowledgeable insiders, if a substantial gain from the attack can be expected.

Interesting issues arise in interplay of the above parameters. For example, a global adversary need not to be a funded organization. A hacker could subvert the entire sensor network by exploiting some software bug. Or, if a local adversary manages to capture a sensor node and read out its cryptographic keys, he can turn into a partially present or global adversary, depending on how many sensor nodes he is able to buy and deploy as clones of the captured node.

4 Protecting Sensor Networks

For passive adversaries, encryption techniques often suffice to ensure inside security. Symmetric key encryption techniques will be favored over asymmetric ones because of the computational advantage and the comparatively small key sizes. The problems arise in the setup phase of the network where shared secrets need to be distributed either by the manufacturer at production time or by clever protocols at deployment time [2, 8].

For stronger adversaries, active attacks like impersonation and node capture must be taken into account. Ideally, sensor nodes should be made tamper proof to prevent node capture, e.g., by applying technology known from smart cards or secure processing environments. There, memory is shielded by special manufacturing techniques which makes it more difficult to physically access the stored information [1]. Similarly, sensor nodes could be built in a way that they loose all their data when they are physically tampered with by unauthorized entities.

For large sensor networks, cost considerations will demand that sensor nodes are not tamper proof. Therefore, node capture must be taken into account. A first step to protect a sensor network from node capture against a local or partially present adversary is to use locally distributed protocols that can withstand the capture of a certain fraction of nodes in the relevant parts of the network. For example it is possible to devise access control protocols that work even if up to t out of n nodes in the communication range of the adversary are captured [3]. While these protocols can exploit broadcast communication, they are still relatively resource intensive.

A very general approach to counter node capture is to increase the effort of the adversary to run a successful attack. For example, data may be stored at a subset of nodes in the network and continuously be moved around by the sensors to evade the possible access by the adversary. This makes it harder for the adversary to choose which node to capture. In the worst case, the adversary must capture much more than t out of n nodes to successfully access the data in question.

A similar technique that exploits the inherent redundancy of a sensor network and shields against even global adversaries is to devise it as a virtual minefield. A certain fraction of sensors has special alerting software enabled which scans the communication in its vicinity and reacts to local and remote manipulations by issuing a distress signal in its environment or otherwise cause an unpleasant experience to the adversary. Thus, these sensors act as "mines" in the network which the adversary tries to avoid since capturing them needs more resources than capturing a normal sensor node. If it is not possible for the adversary to distinguish these special sensors from normal sensors, the ratio between the fraction of "mines" and the effort to capture them determines the incentive of the adversary to attack the system. For example, if 10% of the sensors are virtual mines and it takes 1000 times more effort to capture a mine than to capture a normal node, the adversary will waste a lot of resources if he needs to capture even a small subset of sensors without raising an alarm.

5 Summary and Open Problems

We have described security goals, adversary models and protection mechanisms which are relevant and specific for sensor networks. There are a lot of interesting problems and open questions in this area:

– *Realistic* adversary models should be derived with respect to existing and future applications. Here, experiences with GSM and WLAN security (and security failures) can be used as a guideline, but every application needs to define its own adversary model to be able to talk about security.

– As cross-layer integration is especially important for resource-constrained sensor nodes, careful design decisions must be taken concerning which security means to put into which layer. For example TinySec [9], a link layer encryption and message integrity protection mechanism, is integrated into the radio stack of MICA Motes.
– Building secure sensor networks, especially with respect to active adversary, remains a challenge. Can it be done by combining existing solutions, such as random key predistribution, secure routing, secure data aggregation, or would it be too expensive in terms of energy?

Overall, we speculate that probabilistic algorithms which exploit the redundancy of the sensor network to cause high effort for the adversary will be good candidates to establish security in such networks. In a sense, these algorithms mimic guerrilla tactics: evasion and disguise. They can be simple, yet unpredictable. However, their simplicity implies that they are not suitable to establish perfect security. The security goals of sensor networks will be probabilistic and depend on the strength of the adversary.

References

1. R. J. Anderson. *Security Engineering: A Guide to Building Dependable Distributed Systems*. John Wiley & Sons, Inc., 2001.
2. R. J. Anderson, H. Chan, and A. Perrig. Key infection: Smart trust for smart dust. In *ICNP*, pages 206–215, 2004.
3. Z. Benenson, F. C. Gärtner, and D. Kesdogan. An algorithmic framework for robust access control in wireless sensor networks. In *Second European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN)*, January 2005.
4. J. Deng, R. Han, and S. Mishra. A performance evaluation of intrusion-tolerant routing in wireless sensor networks. In *2nd IEEE International Workshop on Information Processing in Sensor Networks (IPSN 2003)*, April 2003.
5. T. Dimitriou and D. Foteinakis. Secure and effi cient in-network processing for sensor networks. In *First Workshop on Broadband Advanced Sensor Networks (BaseNets)*, 2004.
6. A. Ghose, J. Grossklags, and J. Chuang. Resilient data-centric storage in wireless ad-hoc sensor networks. In *MDM '03: Proceedings of the 4th International Conference on Mobile Data Management*, pages 45–62. Springer-Verlag, 2003.
7. L. Hu and D. Evans. Secure aggregation for wireless networks. In *SAINT-W '03: Proceedings of the 2003 Symposium on Applications and the Internet Workshops (SAINT'03 Workshops)*, page 384. IEEE Computer Society, 2003.
8. J. Hwang and Y. Kim. Revisiting random key pre-distribution schemes for wireless sensor networks. In *SASN '04: Proceedings of the 2nd ACM workshop on Security of ad hoc and sensor networks*, pages 43–52. ACM Press, 2004.
9. C. Karlof, N. Sastry, and D. Wagner. Tinysec: A link layer security architecture for wireless sensor networks. In *Second ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SensSys 2004)*, November 2004.
10. C. Karlof and D. Wagner. Secure routing in wireless sensor networks: Attacks and countermeasures. *Elsevier's Ad Hoc Network Journal, Special Issue on Sensor Network Applications and Protocols*, September 2003.
11. B. Przydatek, D. Song, and A. Perrig. SIA: Secure information aggregation in sensor networks. In *ACM SenSys 2003*, Nov 2003.

12. H. Vogt. Exploring message authentication in sensor networks. In *Security in Ad-hoc and Sensor Networks (ESAS), First European Workshop*, volume 3313 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 19–30. Springer, 2004.
13. D. Wagner. Resilient aggregation in sensor networks. In *SASN '04: Proceedings of the 2nd ACM workshop on Security of ad hoc and sensor networks*, pages 78–87. ACM Press, 2004.
14. A. Wood, J. Stankovic, and S. Son. JAM: A mapping service for jammed regions in sensor networks. In *In Proceedings of the IEEE Real-Time Systems Symposium*, December 2003.
15. S. Zhu, S. Setia, and S. Jajodia. Leap: efficient security mechanisms for large-scale distributed sensor networks. In *Proceedings of the 10th ACM conference on Computer and communication security*, pages 62–72. ACM Press, 2003.

Interval-based Clock Synchronization for Ad-Hoc Sensor Networks

Lennart Meier*

Computer Engineering and Networks Laboratory
Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich
CH-8092 Zurich, Switzerland

Abstract. Clock synchronization is a crucial basic service in typical sensor networks, since the observations of distributed sensors more often than not need to be ordered ("*a* happened before *b*") or otherwise related ("*a* and *b* happened within a time window of size *x*") in time. Ad-hoc sensor networks exhibit characteristics which make the use of traditional clock-synchronization algorithms infeasible. More appropriate algorithms have been presented recently.
In this paper, we argue that interval-based synchronization is particularly suitable for ad-hoc sensor networks. Interval-based algorithms maintain lower and upper bounds on time instead of time estimates. We discuss the benefits of the interval-based approach for ad-hoc sensor networks and present recent results.

1 Introduction

Clock synchronization is an important service in typical ad-hoc sensor networks. For example, the correct evaluation of distributed sensor data may require knowledge about the chronology of the sensor observations [13]. In addition, energy consumption can be reduced by synchronous power-on and shutdown of the wireless-communication circuits of a sender–receiver pair [3, 4].

There has been extensive work on clock synchronization in infrastructure-based networks [10, 16, 11]. Ad-hoc (and thus wireless) sensor networks pose some substantially different challenges. *Robustness:* There is no stable connectivity between nodes. *Energy efficiency:* Synchronization can only be achieved and maintained by communication. Communication is expensive in terms of energy, which typically is a scarce resource for sensor nodes. *Ad-hoc deployment:* The clock-synchronization service must not rely on any a-priori configuration or on infrastructure.

The conclusion is that algorithms for infrastructure-based networks cannot be directly applied in ad-hoc sensor networks. Algorithms particularly suitable for such networks have been proposed recently [5, 6, 13, 15, 17, 18]. Most of the proposed algorithms let nodes maintain single-value time estimates. Interval-based synchronization uses guaranteed bounds on time. It was first proposed in [8] and was further studied in [14]. In [1, 9], it was proposed as particularly suited for ad-hoc sensor networks.

* The author was supported by the National Competence Center in Research on Mobile Information and Communication Systems (NCCR MICS), a center supported by the Swiss National Science Foundation under grant number 5005-67322.

1.1 Overview

In Sect. 2, we define the system model and state the problem we want to solve. In Sect. 3, we discuss the particular suitability of interval-based synchronization for ad-hoc sensor networks. We present recent results and ongoing work in this area in Sect. 4.

2 System Model and Problem Statement

In this section, we give a model that captures those aspects of an ad-hoc sensor network that are essential to our analysis. We then state the problem of internal and external clock synchronization as we understand it.

2.1 Clock model

Each node of the network is equipped with a local clock h; the reading of node N_i's clock h_i at real time t is denoted as $h_i(t)$. The drift of a clock h_i at time t is defined as the deviation of its speed from the ideal speed 1 and is thus given by

$$\rho_i(t) = \frac{\mathrm{d}h_i(t)}{\mathrm{d}t} - 1 \quad . \tag{1}$$

The quality of synchronization that can be achieved depends on the assumptions about the nodes' clocks. We suppose that $\rho_i(t)$ is limited by a constant $\rho^{\max}$ according to

$$-\rho^{\max} \leq \rho_i(t) \leq \rho^{\max} \quad \forall t \quad . \tag{2}$$

We require $\rho_i(t) > -1$ for all times t. This means that a clock can never stop ($\rho_i(t) = -1$) or run backward ($\rho_i(t) < -1$). Thus, for two events a, b with $t_a < t_b$ occuring at node N_i (whose clock's drift ρ_i is bounded according to (2)), node N_i can compute bounds $\Delta_i^l[a,b]$, $\Delta_i^u[a,b]$ on the real-time difference $\Delta[a,b] := t_b - t_a$ as

$$\Delta_i^l[a,b] := \frac{h_i(t_b) - h_i(t_a)}{1+\rho^{\max}} \qquad \Delta_i^u[a,b] := \frac{h_i(t_b) - h_i(t_a)}{1-\rho^{\max}} \quad .$$

2.2 Problem statement

We define the problem of internal synchronization as follows: Given an event occurring at node N_j at local time $h_j(t)$, we are interested in tight bounds $H_i^l(t)$, $H_i^u(t)$ on the local time $h_i(t)$ of another node N_i at time t, such that $H_i^l(t) \leq h_i(t) \leq H_i^u(t)$. In the context of a sensor network, this situation arises when the observations of multiple sensor nodes have to be combined.

The problem of external synchronization consists in providing all nodes in the network with a common system time that is provided from outside the system, e.g. via a GPS receiver.

3 Guaranteed Bounds in Ad-Hoc Sensor Networks

Clock-synchronization algorithms face two problems: The information a node has about the local time of another node degrades over time due to clock drift (see Fig. 1), and its improvement through communication is hindered by message-delay uncertainty. The influence of drift and delay uncertainty can to a large extent be studied separately. A third problem arises from the fact that it is not always clear which node's time shall be used as the reference.

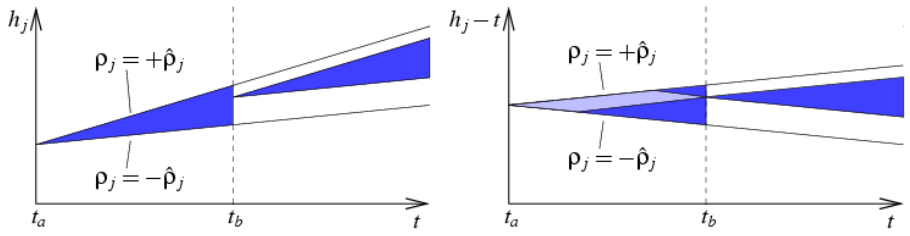


Fig. 1. Graphical representation of the knowledge of node N_i about the local time h_j of node N_j as a function of real time t. The shaded area is the region in which h_j can lie. The two nodes communicate at events a and b. On the right, $h_j - t$ is plotted against t; additionally, the information about past values of h_j that N_i gathers at event b is shown as a lighter-shaded area.

Most of the work on synchronization in ad-hoc networks has concentrated on delay uncertainty; recent algorithms reduce it to a few microseconds [2, 5, 7, 12]. They then achieve good synchronization by continued and frequent communication, which keeps the impact of clock drift negligible.

In settings with *sporadic* communication, the impact of clock drift has to be taken into account explicitly. Sporadic communication is typical for ad-hoc sensor networks where nodes may fail, be temporarily out of reach or abstain from communication to save energy. Our interval-based approach is particularly suited for such settings. Note that we do not neglect delay uncertainty: Methods as in [2, 5, 7, 12] can be used to exchange time bounds with negligible delay uncertainty. Delay and drift uncertainty are orthogonal issues.

Interestingly, the use of guaranteed bounds has not received much attention, although it has a number of advantages over using time estimates: (a) Guaranteed bounds on the local times at which sensor events occurred allow to obtain guaranteed bounds from sensor-data fusion. (b) The concerted action (sensing, actuating, communicating) of several nodes at a predetermined local time of a specific clock always succeeds: each node can minimize its uptime while guaranteeing its activity at the predetermined time. (c) The combination of several bounds for a single local time is unambiguous and optimal, while the reasonable combination of time estimates requires additional information about the quality of the estimates. Note that interval-based synchronization naturally solves the problem of choosing reference nodes in large networks.

The influence of the clock drift on the quality of synchronization may dominate over the influence of the message delays. This is the case in those ad-hoc sensor networks where communication is sporadic not only in the sense of unpredictable, but also in the sense of *infrequent*. With decreasing frequency of communication, the uncertainty due to clock drift increases, while the uncertainty due to message delays remains constant. *A numeric example:* Suppose the message delay contributes 1 millisecond to a node's uncertainty, and the clock drift is bounded by $\rho^{max} = 100$ppm. After 5 seconds, the drift's contribution to the uncertainty equals that of the delay. After one hour, it is 720 times larger. In such settings, neglecting the delay uncertainty is acceptable.

4 Recent Results

In [8], a simple algorithm for interval-based external synchronization was proposed: algorithm IM lets two communicating nodes intersect their time intervals. In [1], a model for the path-based analysis of interval-based clock synchronization was used to show that algorithm IM is worst-case optimal. Furthermore, a new algorithm was presented, the Back-Path Interval-Synchronization Algorithm (BP-ISA). The BP-ISA extends algorithm IM by letting each node keep a history of the intervals from the last communication with every other node. The BP-ISA was shown to be worst-case optimal and to perform significantly better than algorithm IM in the average case. This is due to the typical drift diversity of the nodes' clocks.

In [9], the algorithm for internal synchronization from [13] was improved. Furthermore, it was shown that for optimal synchronization, nodes need to store, communicate and use their entire histories. Clearly, this is infeasible in a realistic scenario. But typically, time information degrades quickly and can thus be discarded without a loss in synchronization quality. Current work is focusing on quantifying the trade-off of synchronization overhead and quality.

Another issue that has not been addressed so far is how node mobility affects interval-based synchronization. Simulation results suggest that mobility has only positive effects. This is due to the special nature of interval-based time information, which makes the combination of two nodes' time information unambiguous and optimal.

5 Conclusion

In this paper, we argued that interval-based synchronization is particularly suited for ad-hoc sensor networks. Most importantly, it naturally solves the problem of choosing reference nodes in large networks. We presented recent advances in interval-based synchronization for ad-hoc sensor networks. Open questions about the overhead–quality trade-off and about the effects of node mobility remain to be investigated.

References

1. Philipp Blum, Lennart Meier, and Lothar Thiele, *Improved interval-based clock synchronization in sensor networks*, Proceedings of the Third International Symposium on Information Proces sing in Sensor Networks (IPSN '04), 2004, pp. 349–358.
2. Philipp Blum and Lothar Thiele, *Clock synchronization using packet streams*, DISC 2002, Brief Announcements (Dahlia Malkhi, ed.), 2002, pp. 1–8.
3. Benjie Chen, Kyle Jamieson, Hari Balakrishnan, and Robert Morris, *Span: An energy-efficient coordination algorithm for topology maintenance in ad hoc wireless networks*, Mobile Computing and Networking, 2001, pp. 85–96.
4. IEEE Computer Society LAN MAN Standards Committee, *IEEE 802.11: Wireless LAN medium access control and physical layer specifications*, August 1999.
5. Jeremy Elson, Lewis Girod, and Deborah Estrin, *Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts*, SIGOPS Oper. Syst. Rev. **36** (2002), no. SI, 147–163.
6. Saurabh Ganeriwal, Ram Kumar, and Mani B. Srivastava, *Timing-sync protocol for sensor networks*, Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems (SenSys '03), ACM Press, 2003, pp. 138–149.
7. Jason Hill and David Culler, *MICA: A wireless platform for deeply embedded networks*, IEEE Micro **22** (2002), no. 6, 12–24.
8. Keith Marzullo and Susan Owicki, *Maintaining the time in a distributed system*, Proceedings of the second annual ACM symposium on Principles of distributed computing, ACM Press, 1983, pp. 295–305.
9. Lennart Meier, Philipp Blum, and Lothar Thiele, *Internal synchronization of drift-constraint clocks in ad-hoc sensor n etworks*, Proceedings of the Fifth ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc 2004), 2004.
10. David L. Mills, *Bibliography on computer network time synchronization*, available on-line at http://www.eecis.udel.edu/~mills/bib.html.
11. _____, *Internet time synchronization: The network time protocol*, IEEE Transactions on Communications **39** (1991), no. 10, 1482–1493.
12. Michael Mock, Reiner Frings, Edgar Nett, and Spiro Trikaliotis, *Clock synchronization in wireless local area networks*, Proceedings of the 12th Euromicro Conference on Real Time Systems, June 2000, pp. 183–189.
13. Kay Römer, *Time synchronization in ad hoc networks*, Proceedings of the 2nd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing, ACM Press, 2001, pp. 173–182.
14. Ulrich Schmid and Klaus Schossmaier, *Interval-based clock synchronization*, Real-Time Systems **12** (1997), no. 2, 173–228.
15. Mihail L. Sichitiu and Chanchai Veerarittiphan, *Simple, accurate time synchronization for wireless sensor networks*, IEEE Wireless Communications and Networking (WCNC 2003), vol. 2, IEEE, 2003, pp. 1266–1273.
16. Barbara Simons, Jennifer L. Welch, and Nancy A. Lynch, *An overview of clock synchronization*, Fault-Tolerant Distributed Computing (Barbara B. Simons and Alfred Z. Spector, eds.), Lecture Notes in Computer Science, vol. 448, Springer, 1990, pp. 84–96.
17. Fikret Sivrikaya and Bülent Yener, *Time synchronization in sensor networks: A survey*, IEEE Network **18** (2004), no. 4, 45–50.
18. Jana van Greunen and Jan Rabaey, *Lightweight time synchronization for sensor networks*, Proceedings of the 2nd ACM international conference on Wireless sensor networks and ap plications (WSNA '03), ACM Press, 2003, pp. 11–19.

Analyse des Kommunikationsaufwands für konsistentes Zeitbewusstsein

Carsten Buschmann und Stefan Fischer

Institut für Telematik, Universität zu Lübeck
Ratzeburger Allee 160, 23538 Lübeck
{Buschmann|Fischer}@itm.uni-luebeck.de

Abstract. In diesem Beitrag vergleichen wir zwei grundsätzlich verschiedene Ansätze zur Etablierung eines gemeinsamen Zeitverständnisses in Sensornetzwerken sowie ihre Kombination quantitativ im Hinblick auf den durch sie verursachten zusätzlichen Kommunikationsbedarf. Dabei variieren wir gezielt einzelne Parameter und untersuchen die Effizienz der drei Ansätze in verschiedenen Szenarien. Ausgehend von simulativen Vergleichen mit Hilfe von Ns-2 entwickeln wir ein Modell, das den Kommunikationsaufwand beschreibt. Mit Hilfe dieses Modells wird deutlich, dass das kombinierte Verfahren TICTAC durchaus Vorteile gegenüber den anderen beiden bringt.

1 Einleitung

Mit drahtlosen Sensornetzen sollen häufig verteilte Phänomene oder bewegte Objekte beobachtet werden [1], [2]. Dazu wird ein gemeinsames Zeitverständnis der beteiligten Geräte benötigt. Es ist immer dann erforderlich, wenn Daten nicht nur lokal verarbeitet werden, sondern an andere Geräte weitergeleitet sollen, um dort mit anderen Daten verschmolzen und weiterverarbeitet zu werden. Dieses so genannte In-Network-Processing ist eine wichtige Voraussetzung für den effizienten Einsatz von Sensornetzen.

2 Grundlegendes zum konsistenten Zeitbewusstsein

Eine grundlegende Möglichkeit ein solches einheitliches Zeitverständnis herzustellen ist das Synchronisieren der Uhren aller Geräte. Ohne Hardwareunterstützung muss die Synchronisation über spezielle Protokolle erfolgen. Prinzipiell wird dabei ausgehend von einem bestimmten Gerät dessen Zeit an alle anderen Geräte verteilt. Diese stellen dann ihre interne Uhr auf die Uhrzeit des Ausgangsgerätes (des Zeitgebers) um, so dass im Anschluss alle Uhren bis auf einen gewissen Fehler synchronisiert sind. Eine Analyse möglicher Fehlerquellen findet sich z.B. in [3]. Nach einer gewissen Zeit, dem so genannten Synchronisationsintervall, muss der Synchronisationsvorgang wiederholt werden, um ein Auseinanderlaufen der Uhren zu korrigieren. Bei der Zeitsynchronisation entsteht bei jedem Synchronisationsvorgang durch das Fluten der Uhrzeit zusätzlicher Datenverkehr (Overhead), während bei der normalen Kommunikation im Sensornetz kein Overhead anfällt. Grundlegend

arbeiten die meisten Verfahren zur netzweiten Zeitsynchronisation nach diesem Schema. Einzelne Publikationen stellen darüber hinaus spezielle Aspekte in den Vordergrund [4], [3].

Eine prinzipiell andere Herangehensweise stellt das Umrechnen der Zeiten in das lokale Zeitsystem des Empfängergerätes bei jedem Kommunikationsvorgang dar, wie in [5] von Römer vorgeschlagen. Dabei werden bewusst die unterschiedlichen Zeitbasen der verschiedenen Geräte beibehalten, stattdessen wird beim Versenden eines Datenpaketes ein Zeitstempel mitgeschickt, der das Umrechnen in die Zeitbasis des Empfängers erlaubt. Naturgemäß entsteht bei diesem Verfahren bei jedem Datenpaket, das zwischen Sensorknoten ausgetauscht wird, ein zusätzlicher Kommunikationsaufwand durch den Zeitstempel.

Im direkten Vergleich der beiden Verfahren ergibt sich als Bilanz, dass die Zeitsynchronisation durch das Verteilen der Zeit im Netz einen gewissen Grundaufwand mit sich bringt, der von der Größe des Sensornetzes, dem Synchronisationsintervall sowie der Größe der benötigten Pakete anhängig ist. Bei der Umrechnung der Zeiten hingegen gibt es keinen prinzipbedingten Grundaufwand, dafür fällt bei jedem Kommunikationsvorgang durch den zusätzlich übertragenen Zeitstempel Overhead an. Der Gesamtaufwand hängt also sowohl netzwerkweit wie auch pro Knoten von der Anzahl der versendeten Datenpakete ab. Dies legt nahe, dass die netzwerkweite Zeitsynchronisation bei hohem Kommunikationsaufkommen im Netz besonders geeignet ist. Dem entgegen ist die Umrechnung von Zeiten bei geringem Datenverkehr im Netz prinzipiell im Vorteil, da hier kein Grundaufwand anfällt.

3 TICTAC: Ein kombiniertes Verfahren – kombinierte Vorteile?

Neben diesem recht offensichtlichen Ergebnis stellt sich die Frage, wie sich die Situation darstellt, wenn das Verkehrsaufkommen im Sensornetz regional und zeitlich schwankt. Um dieser Frage nachzugehen, bietet sich ein simulativer Vergleich der beiden Verfahren an. Um eine weitere Vergleichsgröße zu erhalten, haben wir zusätzlich ein neues theoretisches Verfahren entwickelt, das die Vorteile beider Ansätze kombiniert. Die Grundidee dabei ist, dass es in Sensornetzen Regionen gibt, in denen das Kommunikationsaufkommen temporär ansteigt, um danach wieder auf das normale Niveau zurückzufallen. Dies könnte der Fall sein, wenn an einer bestimmten Stelle das zu beobachtende Phänomen aktiv wird. Daraufhin steigt der Kommunikationsbedarf beispielsweise durch Koordination zwischen den Knoten oder Datenfusion zeitweise an.

Das neue kombinierte Verfahren TICTAC (Traffic Induced Control of Time And Communication) geht davon aus, dass dieser Anstieg an Kommunikation in Grenzen vorhersagbar ist. Bei normalem, d.h. geringem Verkehrsaufkommen wird das Verfahren von Römer [5] angewandt. Ist zu erwarten, dass die Kommunikation an einer Stelle des Netzes steigt, wird einer der Knoten in der betroffenen Region eine lokale Synchronisation der Uhren einleiten. Der Einfachheit gehen wir zunächst davon aus, dass der erste Knoten, der vermehrte Kommunikation vermutet, mit der Synchronisation beginnt. Dazu flutet er seine momentane Uhrzeit an die Nachbarn innerhalb einer gewissen (in Hops gemessenen) Entfernung. Die Steuerung dieses

Flutungsvorganges erfolgt mit Hilfe eines speziellen Feldes im Synchronisationspaket, das bei jedem Weiterleiten dekrementiert wird und die Anzahl der noch verbleibenden Weiterleitungsschritte angibt. Erhält ein Sensorknoten ein solches Synchronisationspaket mit einer Null im diesem Feld, wird er seine Uhr noch der des Zeitgebers anpassen, sich aber anders verhalten als diejenigen Knoten, die ein solches Paket mit einem höheren Wert bekommen haben. Einerseits wird er das Paket nicht weiterleiten, darüber hinaus wird er aber auch weiterhin Datenpakete versenden, die wie beim Verfahren von Römer noch einen Zeitstempel mit der Versanduhrzeit enthalten. Diese Knoten bilden somit einen Ring um die Flutungszone, der es ermöglicht, dass Knoten außerhalb die aus der Flutungszone kommenden Daten korrekt in ihren lokalen zeitlichen Kontext einordnen können. Empfangen Knoten in dem Ring Daten von außerhalb (sie können dies am von ihrer eigenen Uhr abweichenden Versandstempel erkennen), rechnen sie alle Zeitdaten in ihr eigenes und somit das Zeitsystem in der Flutungszone um. Erhalten Knoten innerhalb des Ringes Datenpakete mit zusätzlichem Zeitstempel, können sie diesen ignorieren, da das Paket nur aus dem Ring stammen kann. Knoten innerhalb des Ringes verhalten sich genau so, als wäre das gesamte Sensornetz synchronisiert, außerhalb des Ringes wird das Verfahren von Römer angewandt.

Es steht zu erwarten, dass TICTAC sich hinsichtlich Initialaufwand und Overhead pro Kommunikationsvorgang zwischen der Zeitsynchronisation und dem Verfahren von Römer einordnet. Der Initialaufwand hängt maßgeblich davon ab, wie groß die Region ist, in der die Uhren synchronisiert werden. Dabei steigt der entstehende Aufwand in etwa quadratisch mit der Anzahl der Hops. Je größer dieser Wert ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Hochverkehrsregion komplett von der Flutungszone abgedeckt wird. Der Grad dieser Abdeckung ist wiederum ein Gradmesser für die mögliche Ersparnis im Verlauf des Betriebs des Sensornetzes nach einer lokalen Synchronisation. Je nachdem, wie viel intensiver das Kommunikationsaufkommen in der Hochverkehrsregion ist, desto mehr Overhead durch versendete Zeitstempel fällt prozentual in diese Region und kann somit potenziell in der Flutungszone eingespart werden.

4 Simulativer Vergleich der Verfahren

Um diese analytischen Vorüberlegungen zu untermauern, haben wir zunächst simulativ untersucht, welches der drei Verfahren unter welchen Bedingungen besondern effizient arbeitet. Dazu haben wir mit dem Netzwerksimulator Ns-2 [6] eine Serie von Simulationen durchgeführt, bei denen das Netz in zwei Regionen aufgeteilt ist: im Großteil des Netzes herrscht über die gesamte Simulationsdauer ein gleich bleibender, geringer Verkehr. In einem kleinen Teil des Netzes herrscht zu Beginn für eine begrenzte Zeit ein stärkerer Verkehr, danach herrscht auch hier wie im Rest des Netzes der geringere Verkehr. Genauere Informationen zu den Simulationen und Ergebnissen können [7] entnommen werden.

Für alle drei Verfahren wurde während der Simulationen der entstehende Kommunikationsaufwand gemessen. Legt man die resultierenden Kurven der drei Verfahren für ein festgelegtes Set von Parametern in einem Diagram übereinander,

lassen sich Aussagen darüber ableiten, zu welchem Simulationszeitpunkt welches Verfahren den geringsten Overhead verursacht hat (Abbildung 1).

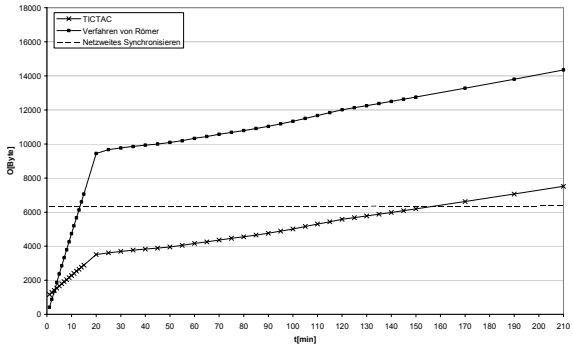


Abbildung 1. Entwicklung des Overheads in den Simulationen

Es ist klar zu erkennen, dass sich über die Simulationszeit grundsätzlich 3 zeitliche Bereiche identifizieren lassen. Bis etwa zum Zeitpunkt von 3 Minuten hat das Verfahren von Römer am wenigsten Mehraufwand verursacht. Danach lohnt sich der Einsatz von TICTAC, da hier der Aufwand langsamer ansteigt. Somit werden im Bereich bis etwa 160 Minuten am wenigsten zusätzliche Daten versendet. Danach ergibt sich für die Zeitsynchronisation im gesamten Netzwerk die günstigste Bilanz, wenn nicht bereits vorher eine Resynchronisation nötig wurde.

Offensichtlich sind diese Ergebnisse jedoch massiv von den Parametern des Szenarios abhängig. Um diese Zusammenhänge zu untersuchen, haben wir 3 Parameter variiert und die Varianten simulativ untersucht: (1) die Dauer, während der in einem Teil des Netzes höherer Verkehr herrscht (t_{HT}), (2) die dazugehörige Verkehrsrate bei hohem Verkehr sowie (3) die Verkehrsrate bei geringem Verkehr.

5 Modellentwicklung

Aus diesen Erkenntnissen haben wir dann ein mathematisches Modell entwickelt, das Aussagen über die Effizienz der drei Verfahren für beliebige Kombinationen der drei oben genannten Parameter erlaubt. An dem Diagramm ist leicht zu erkennen, dass sich der Verlauf der Kurven als Gerade mit einem Knick zum Zeitpunkt t_{HT}, somit also zwei Steigungen α und β sowie einem potentiellen Ordinatenabschnitt b, modellieren lässt (siehe Abbildung 2).

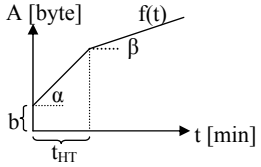


Abbildung 2. Allgemeine Funktion zur Beschreibung des Kommunikationsaufwandes

Ausgehend von dieser Beobachtung haben wir zunächst eine allgemeine Geradengleichung für mit α, β, t_{HT} und b als Parametern aufgestellt:

$$f(t) = \begin{cases} \alpha t + b & t \le t_{HT} \\ \beta(t - t_{HT} + 1) + \alpha t_{HT} + b & t > t_{HT} \end{cases} \quad (\mathbf{1})$$

Die Anpassung dieser allgemeinen Form an die verschiedenen Verfahren ergibt sich aus der passenden Bestimmung der drei Parameter. Detaillierte Informationen dazu können [7] entnommen werden.

Anhand des Modells lassen sich nun auch diejenigen Parameterkombinationen identifizieren, die die Nutzung eines bestimmten der drei Verfahren nahe legen. Erhöhter Verkehr innerhalb eines relativ begrenzten Netzbereiches führt dazu, dass sich TICTAC gewinnbringend einsetzen lässt. Je intensiver und länger dieser ist, desto größer der Vorteil gegenüber dem Verfahren von Römer. Geringer Verkehr im Rest des Netzes sowie häufig erforderliche Resynchronisation begünstigen TICTAC gegenüber der netzweiten Synchronisation. Diese Ergebnisse sind dabei weitest gehend unabhängig von der Größe des Netzes.

Da sich herausgestellt hat, dass TICTAC durch seine positiven Eigenschaften durchaus eine Daseinberechtigung hat, scheint seine Weiterentwicklung zu einem praktisch einsetzbaren Protokoll viel versprechend. Das erweiterte Modell könnte dann verwendet werden, um in einem Sensornetz dynamisch Entscheidungen über die Auswahl eines geeigneten Verfahrens oder über Parameter (wie z.B. die Größe des Flutungsbereiches) zu treffen.

Literatur

1. Szewczyk, R., Polastre, J., Mainwaring, A., Culler, D.: Lessons from a Sensor Network Expedition. In: Springer Lecture Notes in Computer Science 2920. First European Workshop on Wireless Sensor Networks, S. 307-322. January 2004.
2. K. Römer: Tracking Real-World Phenomena with Smart Dust, IEEE European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN) 2004, Springer LNCS, pp. 28-43, Berlin, Germany, January 2004.
3. Jeremy Elson, Lewis Girod, Deborah Estrin: Fine-Grained Network Time Synchronization using Reference Broadcasts, in Proceedings of the 5th Symposium on Operating Systems Design and Implementation, Boston, December 2002
4. Saurabh Ganeriwal, Ram Kumar, Mani B. Srivastava: Timing-sync protocol for sensor networks, in Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems, pp. 138 - 149 , Los Angeles, 2003
5. K. Römer: Time Synchronization in Ad Hoc Networks, ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc) 2001, pp. 173-182, Long Beach, USA, October 2001.
6. "Ns-2: Network simulator-2," http://www.isi.edu/nsnam/ns/
7. C. Buschmann, D. Pfisterer, S. Fischer: Kommunikationsaufwand von Verfahren zur Errichtung eines konsistenten Zeitbewusstseins – Eine quantitative Analyse, eingereicht für Praxis in der Kommunikation, Sonderheft Sensornetze, 2005

Energieeffizienz durch Duty Cycle Anpassung

Mario Neugebauer[1,2], Jörn Plönnigs[1], Klaus Kabitzsch[1]

[1] Technische Universität Dresden
Institut für Angewandte Informatik
{mn7,jp14,kk10}@inf.tu-dresden.de

[2] SAP Research Group Dresden
Dürerstrasse 24, 01307 Dresden

Zusammenfassung In diesem Artikel wird ein Ansatz zur Anpassung des Duty Cycle basierend auf dem Standard IEEE 802.15.4 vorgestellt. Grundlage der Anpassung sind Verkehrsbeobachtungen von assoziierten Sensor-Knoten. Anhand eines Beispielszenarios mit verschiedenen Ankunftsraten wird die Anpassung bewertet. Der vorgeschlagene Ansatz ist für langsam veränderliche Prozesse mit geringen Gradientenänderungen geeignet.

1 Einleitung

Aspekte zum energieeffizienten Einsatz von einzelnen Sensorknoten sowie von ganzen Netzwerken werden auf allen Schichten des OSI Modells untersucht (z. B. [1, 4, 2]). Eine Möglichkeit Energie einzusparen besteht im Anpassen des Duty Cycles. Beispiele dafür sind die Protokolle TRAMA [6] und LCS [7]. Sie nutzen zusätzliche Signalisierung um die aktiven Phasen entsprechend dem auftretenden Verkehr einzuplanen. Im sendungswilligen Knoten muss dabei im Vorraus bekannt sein, welcher Verkehr in nächster Zeit zu übertragen ist. Bei TRAMA wird zudem die Möglichkeit geschaffen, Pakete kollisionsfrei zu übermitteln.

In diesem Beitrag werden Ansätze zur Anpassung des Duty Cycles aus vorangegangenen Arbeiten aufgegriffen [8, 9] und in das bereits standardisierte Protokoll IEEE 802.15.4 [3] eingebracht. Als Grundlage der Duty Cycle Anpassung wird der aufgetretene Verkehr an einem Relay-Knoten beobachtet und bewertet. Die Bewertung kann zu einer Änderung des Duty Cycles führen. Der vorgeschlagene Algorithmus eignet sich insbesondere in Umgebungen, in denen langsame Prozesse (Temperatur, Feuchte, Luftdruck, Niederschlag, etc.) mit geringen Gradientenänderungen überwacht werden müssen. Gleichwohl kann die Anpassung bei Prozessen die sich durch häufige Gradientenänderungen auszeichnen, eingesetzt werden. Jedoch ist dann mit erhöhten Verzögerungszeiten zu rechnen.

Durchgeführte Simulationen zeigen, dass die Anpassung je nach angenommener Ankunftsrate und Parametrierung zu unterschiedlichen Arbeitszyklen führen. Werden die maximal erreichbaren Verzögerungszeiten mit den Ankunftraten in Beziehung gesetzt, ergeben sich allerdings vergleichbare Größenordnungen.

Im zweiten Abschnitt werden die für die Arbeit wesentlichen Mechanismen des Medienzugriffs bei IEEE 802.15.4 kurz dargestellt. Anschliessend wird der Anpassungsalgorithmus beschrieben und mit einem Beispielszenario bewertet.

2 Arbeitszyklus IEEE 802.15.4

In Abbildung 1 ist die Organisation des Medienzugriffs unter Verwendung des Beacon-enabled Modus dargestellt. Beacon-enabled bedeutet, dass von einem Koordinator, zum dem verschiedene Sensor-Knoten assoziiert sind, eine Signalisierungsnachricht per Broadcast gesendet wird. Diese Nachricht enthält Informationen über die Dauer bis zum nächsten Beacon und die Dauer der aktiven Phase. Innerhalb der aktiven Phase dürfen die assoziierten Sensor-Knoten auf das Medium zugreifen. Entweder ist ihnen dafür ein spezieller Zeitslot zugewiesen oder aller Sensor-Knoten müssen mit CSMA um den Zugriff konkurrieren. Die Zeitdifferenz zwischen dem Ende der aktiven Phase und dem Beginn des nächsten Beacon soll hier als passive Phase bezeichnet werden.

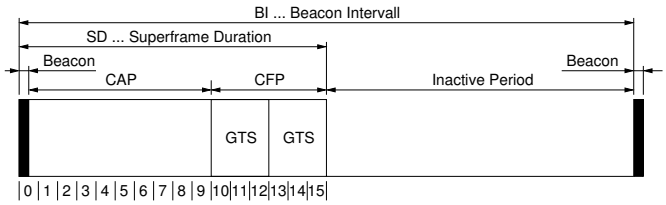


Abbildung 1. Struktur des Arbeitszyklus bei IEEE 802.15.4 mit Beacon-enabled Modus

Ein Vorteil des Protokolls ist, dass mit den zur Verfügung stehenden Parametern ein Verhältnis von aktiv:passiv zwischen 1:0 und 1:16384 realisiert werden kann. Mit entsprechender Parametrierung lässt sich der Arbeitszyklus beeinflussen. Das wird in diesem Beitrag zur Anpassung ausgenutzt.

3 Anpassung des Arbeitszyklus

Das Grundprinzip der Anpassung des Arbeitszyklus ist in Abbildung 2 dargestellt. Als System werden in der Darstellung diejenigen Bestandteile verstanden, die ohne die zusätzliche Anpassung ohnehin im Sensor-Netz vorhanden sind. Redundanzen zu vermeiden und damit Energie einzusparen ist das Ziel der Veränderung des Duty Cycles.

Die Idee der Duty Cycle Anpassung ist, die von den assoziierten Knoten empfangenen Nachrichten aufzuzeichnen. Zur Bewertung des Verkehrs stehen anschliessend verschiedene Charakteristika (Anzahl der eingetroffenen Nachrichten, Ausnutzung der aktiven Phase, Anzahl der Wiederholungen bei bestätigten Nachrichten) zur Verfügung. Beispielsweise wäre es möglich, ähnlich dem Konzept von T-MAC [8], die Dauer der Nutzung einer aktiven Phase zu registrieren. Das liesse einen Schluss auf Kürzungsmöglichkeiten zukünftiger aktiver Phasen zu. Hier wird der Ansatz verfolgt, über eine Dauer von mehreren Beacon Intervallen die angekommenen Nachrichten aufzuzeichnen. Darauf basierend entscheidet ein Zweipunkt-Regler (Duty Cycle Anpassung in Abbildung 2) ob die Beacon-Nachrichten in veränderten Abständen gesendet werden müssen. Sind nur wenige Nachrichten von den assoziierten Knoten aufgetreten,

erhöht sich die Beacon Order und damit der Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenen Beacon Nachrichten. Treten viele Nachrichten auf, veranlasst der Regler die Beacon Order, und damit die Dauer zwischen zwei Beacons zu verkürzen. Eine ausführliche

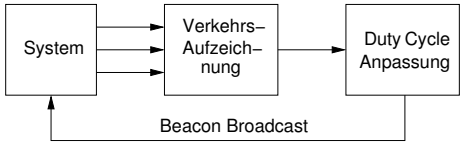


Abbildung 2. Grundprinzip der Anpassung des Duty Cycles

Beschreibung mit den allen Parametrierungsmöglichkeiten ist in [5] zu finden.

4 Bewertung

Für die Bewertung der Anpassung werden exponentialverteilte Ankünfte mit drei verschiedene Ankunftsraten angenommen:

$$\lambda_1 = 0.01\, s^{-1}$$
$$\lambda_2 = 0.1\, s^{-1}$$
$$\lambda_3 = 1\, s^{-1}.$$

Grundlage dieser Annahme sind Analysen von typischen, in Gebäuden gemessenen, physikalischen Grössen. Diese Vorarbeiten erlauben, für die in Abschnitt 1 genannten Grössen exponentialverteilte Ankünfte anzunehmen.

In Abbildung 3 ist für die Ankunftsrate λ_1 die mittlere erreichte Beacon Order dargestellt. Je nach Parametrierung der Grenzen des Zweipunktregler werden unterschiedliche Beacon Order Werte, und damit aktiv zu passiv Verhältnisse, erreicht. Liegen die oberen und unteren Schwellwerte des Zweipunktreglers nah beieinander im unteren Bereich (z. B. $b_u = 2$,$b_l = 2$), erzielt die Anpassung eine vergleichsweise geringe Beacon Order. Je grösser die obere Schranke gewählt wird, desto grösser ist auch die erreichte mittlere Beacon Order.

Ein Vergleich der mittleren erreichten Beacon Order Werte bei unterschiedlicher Ankunftsrate ist in Abbildung 4 dargestellt. Die oberste Kurvenschar ist die in Abbildung 3 dargestellte. Mit den Ankunftsraten $lambda_2$ bzw. λ_3 ergeben sich die mittleren bzw. unteren Kurvenscharen. Deutlich wird bei dieser Darstellung, dass je nach Ankunftsrate vom Anpassungsalgorithmus unterschiedliche Beacon Order Werte eingestellt werden. Eine ausführliche Diskussion der Ergebnisse ist [5] zu entnehmen.

5 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde ein Ansatz zur Anpassung des Arbeitszyklus vorgestellt, als Grundlage dient der Standard IEEE 802.15.4. Für die Anpassung wird das Verkehrsauf-

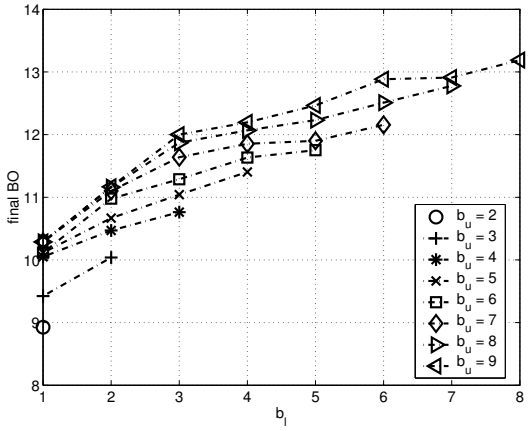


Abbildung 3. Mittlere erreichte Beacon Order bei angenommener Ankunftsrate λ_1.

kommen an einem Koordinatorknoten aufgezeichnet. Anschliessend werden die Aufzeichnungen mit einem Zweipunktregler bewertet, der je nach Verkehrsaufkommen die Arbeitszyklus erhöht oder verringert. Anhand der mittleren sich einstellenden Beacon Order wird der Anpassungsalgorithmus bewertet. Für unterschiedliche Ankunftsraten ergeben sich dabei je nach Parametrierung des Zweipunktreglers verschiedene mittlere Beacon Order Werte. Der Algorithmus kann insbesondere für langsam veränderliche Prozesse eingesetzt werden. In der weiteren Arbeit soll untersucht werden, wie sich der Algorithmus bei variablen Ankunftsraten verhält. Modifikationen für den Einsatz in Multi-hop Szenarien werden ebenfalls Gegenstand zukünftiger Entwicklungen sein.

Literatur

1. Linda Briesemeister and Günter Hommel. Localized Group Membership Service for Ad Hoc Networks. In *International Workshop on Ad Hoc Networking (IWAHN)*, pages 94–100, AUG 2002.
2. Jonathan Hui, Zhiyuan Ren, and Bruce H. Krogh. Sentry-based power management in wireless sensor networks. In Feng Zhao and Leonidas Guibas, editors, *Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*, volume 2634 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 458–472, Palo Alto, CA, USA, April 2003. Springer-Verlag.
3. Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE Std 802.15.4. Technical report, IEEE, May 2003.
4. Neha Jain, Dilip K. Madathil, and Dharma P. Agrawal. Energy Aware Multi-path Routing for Uniform Resource Utilization in Sensor Networks. In *Information Processing in Sensor Networks - IPSN 2003*, volume 2634 of *LNCS*, pages 473–487, Palo Alto, CA, USA, April 2003.
5. Mario Neugebauer, Jörn Plönnigs, and Klaus Kabitzsch. A New Beacon Order Adaptation Algorithm for IEEE 802.15.4 Networks. In *Proceedings of the 2nd European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN 2005)*, Istanbul, Turkey, January 2005.

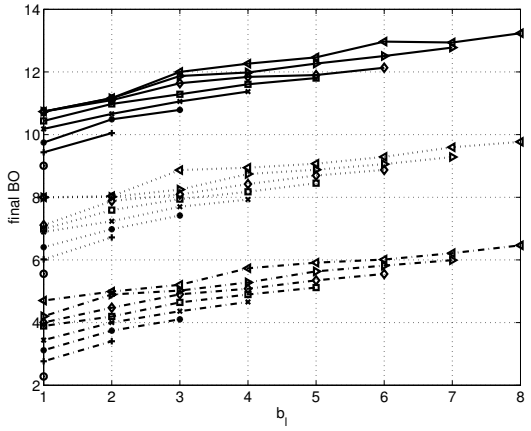


Abbildung 4. Vergleich der mittleren erreichten Beacon Order Werte mit unterschiedlichen Ankunftsraten (λ_1 oben, λ_2 mitte, λ_3 unten

).

6. V. Rajendran, K. Obraczka, and J. J. Garcia-Luna-Aceves. Energy-Efficient, Collision-Free Medium Access Control for Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the First International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pages 181–192, Los Angeles, USA, November 2003.
7. Godfrey Tan and John Guttag. A Locally Coordinated Scheduling Algorithm. In *27th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks*, Tampa, USA, November 2002.
8. Tijs van Dam and Koen Langendoen. An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems - (Sensys 03)*, pages 171–180. ACM Press, 2003.
9. Wei Ye, John Heidemann, and Deborah Estrin. An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the IEEE Infocom*, pages 1567–1576, New York, NY, USA, June 2002. USC/Information Sciences Institute, IEEE.

Sensor-Based Localization-Assistance for Mobile Nodes

Falko Dressler

Dept. of Computer Science 7, University of Erlangen-Nuremberg
Martensstr. 3, 91058 Erlangen, Germany
dressler@informatik.uni-erlangen.de
http://www7.informatik.uni-erlangen.de/

Abstract – Navigation of mobile robots requires high-quality localization mechanisms. Typical indoor techniques lack of such precise functionality. The focus of this paper is to demonstrate our ongoing research work in the area of localization in sensor networks. We employ these mechanisms for sensor-based localization assistance for mobile nodes, particularly our robot systems. The used methodology is discussed and the according expectations are shown.

1 Introduction

In recent years, many efforts have been made in developing algorithms and methodologies for building efficient localization mechanisms for indoor and outdoor environments. GPS is a de-facto standard for precise outdoor localization. Unfortunately, such an approach fails in indoor environments. Even if the same scheme can be used (pseudolite arrays [5]), it suffers from multipath propagation and other properties of signal dispersion. Mechanisms based on wireless LAN are only useful for detecting a particular room due to the low accuracy of about 5m. Much higher localization qualities are required for navigation issues.

Out goal is to use an installed sensor network for multiple reasons. First, it should be employed for the primary task of gathering environmental information. Secondly, and this is the main focus of this paper, we also use the network for localization of mobile nodes. In an ongoing research project, we connected a sensor network consisting of a couple of Mica2 motes to some mobile robot systems. Using the "quality" of a particular link, the distance to a sensor mote can be estimated. Therefore, given a uniform distribution of sensor nodes with a minimum density, we are able to approximate the current location of the robot system.

First studies to use the capabilities of sensor networks for localization have been done by the group of Estrin and Heidemann [1] and Savvides et al. [6]. Nevertheless, they only concentrated on an inherent localization problem in sensor networks. On the other hand, we are about to include mobility aspects and the application / assistance of fixed sensor motes for mobile systems as proposed by Hu et al. [4].

2 Motivation and Research Objectives

Among others, we are focusing on self-organization, task-allocation, and energy-aware communication in mobile wireless sensor networks. Sensor networks are composed of multiple, independent autonomously working nodes. These individual entities form a self-organizing compound that is able to solve required tasks described at a higher level. Before we concentrate on the application of the sensor networks for localization issues, our ongoing research activities in the research fields of sensor networks and coordination of mobile autonomous systems are briefly described.

2.1 ROSES – Robot Assisted Sensor Networks

The development and the control of self-organizing, self-configuring, self-healing, self-managing, and adaptive communication systems and networks are the primary research aspects of our Autonomic Networking group [3]. We are studying these aspects in the area of autonomous sensor/actuator networks, i.e. a combination of mobile robot systems and stationary sensor networks [2]. The introduction of mobility as well as the limited resources of typical sensor nodes leads to new problems, challenges, and solution spaces in terms of efficient data management and communication. We distinguish between sensor assisted teams of robots and robot assisted mobile sensor networks. The former means that robots might use the sensor network for more accurate localization and navigation or as a communication infrastructure. The latter means the employment of robot systems for maintenance in sensor network or the utilization of robots to provide communication relays.

Research Goals:
Energy efficient operation, communication, and navigation
Sensor network assisted localization and navigation of the robots
Utilization of the robots as a communication relay between a sensor network and a global network, e.g. the Internet
Quality of service aware communication in heterogeneous mobile networks with dynamic topology
Optimized task allocation and communication based on application and energy constraints
Secure communication and data management in mobile sensor networks

In order to address these objectives, we work on novel models for energy and application aware communication, combine different localization techniques for optimized high-precision navigation, integrate mobile robots and stationary sensor nodes to autonomous sensor/actuator networks, and research on bio-inspired communication methods. In our lab, we use the Robertino[1] robot platform as well as the Mica2 sensor motes running TinyOS[2].

[1] Robertino was developed at the Fraunhofer Institute for Autonomous Intelligent Systems AIS
[2] Mica motes and TinyOS were developed at the University of Berkeley

Current Activities:
We equip our mobile robot systems with a modular control system allowing them to act completely autonomous. In order to achieve this goal, modules for accessing the sensor facilities, for movement, localization and navigation, and task allocation are work in progress. Mostly finished is the connection of a Mica2 mote for intercommunication with the sensor network.

3 Localization using Sensor Information

The objective of this paper is to analyze the quality and performance of the localization based on a pre-installed sensor network. We base our work on preliminary results described in [1, 4, 6].

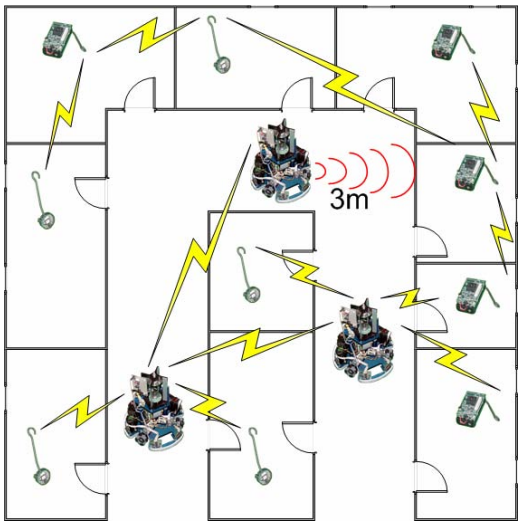


Fig. 1. Lab environment for localization tests consisting of Mica2 and Mica2dot sensor motes and some mobile robot systems (Robertino)

The lab environment used for our tests is shown in Fig. 1. For interconnecting the robot system to the Mica2 motes, the serial interface-board including a single Mica2 mote is employed. The program `xlisten` was ported to the Robertino system in order to query the motes and to receive the sensor information. The methodology of the localization mechanism is described in the following.

3.1 Signal Quality

The signal quality, i.e. the strength of the received signal, can be used to estimate the distance between two corresponding nodes. It was shown that this signal quality

allows a good approximation if used in rooms without interfering walls. This assumption is provided in our scenario where multiple sensor motes are deployed in a small area. Based on the received signal quality towards to multiple motes, a triangulation can be initiated. The localization method, therefore, is based on the following data:

addresses (IDs) of neighboring sensor motes
(statically configured) location of each node
distance to each node (signal quality)

3.2 Autonomic Re-Programming

The error introduced by signal fading and other effects on the physical layer is quite high. Therefore, additional measures have to taken in order to increase the accuracy of the localization mechanism. Besides additional hardware solutions such as laser-based distance meters, we want to use the internal possibilities provided by the employed sensor motes. Namely, we want to reprogram the motes according to the requirements of the current measurement.

The signal strength of the sender can be adjusted in software. This feature is used to gradually reduce the signal strength at each sender until it can no longer be received at the mobile robot system. By modeling the transmission range of all sensor motes in the neighborship, the precise location can be estimated using this adaptive re-programming. Obviously, this methodology requires a working ad hoc routing in order to reach the sensor motes being modified even if the direct connection got lost. This localization method is based on the following information:

addresses (IDs) of neighboring sensor motes
(statically configured) location of each node
radio model of all involved motes
signal strength at the sender when the connection is lost

4 Conclusions

The programming and test of the described scenario is current work in progress done in our group. The perceived quality in our lab tests will show the potentials and drawbacks of the localization based on sensor networks. Even in this simple scenario, multipath propagation and other properties of radio transmission will introduce a noticeable error. Further work is to include dynamics due to the inter-node relationship during movement.

References

1. N. Bulushu, D. Estrin, L. Girod, and J. Heidemann, "Scalable Coodination for Wireless Sensor Networks: Self-Configuring Localization Systems," Proceedings of 6th

International Symposium on Communication Theory and Applications (ISCTA'01), Ambleside, Lake District, UK (2001)
2. F. Dressler and G. Fuchs, "ROSES - RObot assisted SEnsor networkS," Dept. of Computer Sciences, University of Erlangen-Nuremberg, Erlangen, Germany, Poster (2004)
3. F. Dressler, "Efficient and Scalable Communication in Autonomous Networking using Bio-inspired Mechanisms - An Overview," *Informatica - Special Issue on Ant Colony & Multi-Agent Systems* (2005) (accepted for publication)
4. L. Hu and D. Evans, "Localization for Mobile Sensor Networks," Proceedings of Tenth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (2004)
5. M. Matsuoka, S. M. Rock, and M. G. Bualat, "Rover, Go Your Own Way - Self-Calibrating Pseudolite Array," in *GPS World*, (2004) 14-22
6. A. Savvides, C.-C. Han, and M. B. Strivastava, "Dynamic fine-grained localization in Ad-hoc networks of sensors," Proceedings of 7th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCOM'01), Rome, Italy (2001) 166-179