

Diss. ETH Nr. 18668

# Adaptive Sensor Selection Algorithms for Wireless Sensor Networks

A dissertation submitted to  
ETH ZURICH

for the degree of  
Doctor of Sciences

presented by

**Silvia Santini**

Dottore in Ingegneria delle Telecomunicazioni

University of Rome “La Sapienza”

born November 15, 1978

citizen of Italy

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. Friedemann Mattern, examiner  
Prof. Dr. Wendi Heinzelman, co-examiner  
Prof. Dr. Kay Römer, co-examiner

2009

# Abstract

A wireless sensor network is a collection of tiny, autonomously powered devices – commonly called sensor nodes – endowed with sensing, communication, and processing capabilities. Once deployed over a region of interest, sensor nodes can collect fine-grained measurements of physical variables, like the temperature of a glacier or the concentration of a pollutant. To report their readings to one or more data sinks, sensor nodes communicate using their integrated radio-transceivers and build ad-hoc – possibly multi-hop – relay networks. Thanks to the potentially large number of nodes they are composed of and their ability to operate unattended for long periods of time, wireless sensor networks allow monitoring the environment at an unprecedented spatial and temporal scale.

However, enabling a wireless sensor network to reliably report large quantities of data over long periods of time is still a challenging goal. In particular, since the operation of the radio is known to be the major factor of energy consumption on sensor nodes, limiting communication is crucial for increasing the lifetime of the network. On the other hand, meeting the requirements of wireless sensor network applications may require sensor nodes to collect and report large amounts of sensor readings. The efficient operation of a wireless sensor network thus requires careful scheduling of node participation in sensing and communication. Beyond the role that medium access control and routing protocols may play in this context, so-called sensor selection algorithms can provide for significant communication savings by identifying subsets of the deployed nodes that are sufficient to comply with the application requirements.

This thesis argues for endowing sensor selection algorithms with the ability to dynamically adapt to the observed data and to the local topology of the network. The presented work offers novel sensor selection strategies that can continuously tune their parameters in a distributed fashion, thereby relying on no or only little a priori knowledge about the phenomena of interest. In particular, the thesis first addresses the

sensor selection problem in the time domain by considering scenarios in which sensor nodes autonomously adapt their data reporting rate. To this end, nodes report their sensor readings along with a forecasting model, which the sink can in turn use to estimate future readings. Nodes can thus suppress data communication as long as the estimation error at the sink does not grow beyond a pre-specified, application-dependent threshold. Since the choice of a proper forecasting model is instrumental in allowing for high communication savings, this thesis proposes a generic and lightweight procedure to perform adaptive model selection on sensor nodes. The proposed algorithm concurrently maintains and evaluates the performance of a set of models on the nodes and lets them report to the sink the model with the lowest expected communication overhead. Second, the thesis addresses the sensor selection problem in the spatial domain, in particular for applications requiring spatial coverage of a region of interest. It proposes a novel sensor ranking strategy to efficiently schedule the activation of sensor nodes across the deployment region. Information about the local network topology is used to determine the actual relevance of a node for the current sensing task. The resulting ranking of the nodes, properly combined with randomization techniques, is then used to select subsets of nodes whose activation can guarantee compliance with specific application requirements.

The sensor selection strategies proposed in this thesis require little memory and computational resources, and are thus implementable on resource-constrained wireless sensor network platforms. Their practical feasibility is evaluated by means of simulations, experiments on a small-scale deployment, and in the context of a concrete application scenario, namely the monitoring of noise pollution levels in urban environments.

The contribution of this thesis is therefore threefold: it describes the design of novel temporal and spatial sensor selection algorithms; it provides an implementation of these algorithms on simulators and state-of-the-art wireless sensor network platforms; and it describes a thorough performance evaluation based on simulations, real-world experiments, and a specific application scenario. Taken together, these contributions constitute a step towards enabling long-term environmental monitoring applications using wireless sensor networks.

# Kurzfassung

Ein drahtloses Sensornetz ist ein Verbund kleiner elektronischer Geräte – sogenannte Sensorknoten –, welche über eine Energiequelle sowie über Daterfassungs-, Kommunikations- und Rechenfähigkeiten verfügen. Ausgebracht in der Umgebung können Sensorknoten Messungen einer physikalischen Grösse, z.B. der Temperatur eines Gletschers, durchführen. Um die einzelnen Messergebnisse eines jeden Sensorknotens einzusammeln, bilden diese mittels ihres integrierten Funkmoduls ein Ad-hoc-Kommunikationsnetz, über welches dann die jeweiligen Nachrichten, möglicherweise über mehrere Zwischenstationen, zu einer bzw. zu mehreren Datensenken verschickt werden. Dank der grossen Anzahl ausgebrachter Knoten und ihrer Fähigkeit, für lange Zeit wartungsfrei operieren zu können, ermöglichen Sensornetze eine detaillierte Vermessung verschiedenster physikalischer Grössen.

Trotz aller technischer Fortschritte stellt der Betrieb eines Sensornetzes über einen längeren Zeitraum hinweg jedoch noch immer eine Herausforderung dar. Während eine detaillierte Messung und die zeitnahe Übermittlung von Daten oft Hauptanforderungen an eine Sensornetzanwendung sind, sollte gleichzeitig das Funkmodul als Hauptenergieverbraucher möglichst selten verwendet werden. Der effiziente Betrieb eines Sensornetzes setzt daher eine sorgfältige Planung der einzelnen Sensorknotenaktivitäten – d.h. dem Erheben von Messdaten sowie deren Übermittlung – voraus. In diesem Zusammenhang können sogenannte Sensor-Selektionsalgorithmen eine wichtige Rolle spielen. Indem sie in Abhängigkeit von den jeweiligen Qualitätsanforderungen der Sensornetzanwendung lediglich eine Untermenge von Sensorknoten auswählen, welche zu einem gegebenen Zeitpunkt messen bzw. kommunizieren müssen, können sie signifikante Energieeinsparungen erreichen und so unabhängig von den eingesetzten Medienzugriffs- und Routing-Protokollen die Lebensdauer des Sensornetzes merklich verlängern.

Diese Arbeit erweitert bestehende Sensor-Selektionsalgorithmen um die Fähigkeit, sich an den konkreten Datenverlauf und die lokale Topologie des Netzes anzupassen und dabei kein – bzw. nur ein Minimum

an – A-priori-Wissen über das zu beobachtende Phänomen zu nutzen. Statt dessen werden die Selektionsparameter stetig und in einem verteilten Verfahren angepasst. In einem ersten Schritt wird ein Verfahren vorgestellt, welches es Sensorknoten erlaubt, ihre Datenübertragungsrate selbständig an das beobachtete Phänomen anzupassen. Dazu übertragen die Knoten der Datensinke zusätzlich zu den aktuellen Messwerten ein Vorhersagemodell, welches die Senke ihrerseits für die Abschätzung zukünftiger Messwerte nutzen kann. Solange die Senke sukzessive Messwerte innerhalb gegebener Fehlergrenzen abschätzen kann, können Sensorknoten von einer Übertragung dieser Messwerte absehen. Das vorgestellte Verfahren ermöglicht es den Knoten, mehrere Kandidaten für das zu verwendende Modell gleichzeitig vorzuhalten und in jeder Situation das jeweils beste Modell dynamisch auszuwählen. In einem zweiten Schritt betrachtet diese Arbeit die räumliche Auswahl von Sensorknoten in Anwendungen, die einen bestimmten Teilbereich eines Gebiets mit ihren Messungen abzudecken versuchen. Dabei wird eine neue Strategie, welche die Rangordnung von Sensorknoten für eine spezifische Messaufgabe anhand von Informationen über die lokale Topologie des Netzes berechnet, präsentiert. Diese Rangordnung, kombiniert mit passenden Randomisierungsverfahren, erlaubt schliesslich die Auswahl einer Untermenge von Sensorknoten, deren Aktivierung zur Erfüllung der Anwendungsanforderungen ausreicht.

Die in dieser Arbeit vorgeschlagenen Sensor-Selektionsalgorithmen beanspruchen nur wenig Rechenleistung und Speicher, was ihren Einsatz auch auf äusserst ressourcenbeschränkten Sensorknoten ermöglicht. Der praktische Einsatz der Algorithmen wurde sowohl mit Hilfe umfangreicher Simulationen als auch durch praktische Experimente mit prototypischer Hardware und im Rahmen eines spezifischen Anwendungsszenarios, der Überwachung von Umgebungslärm, untersucht.

Die vorliegende Arbeit liefert somit drei Hauptbeiträge: Sie schlägt neue Algorithmen für die zeitliche und räumliche Sensorselektion vor; sie beschreibt eine Implementierung dieser Algorithmen auf Simulatoren und auf aktuellen Sensorknoten; und sie bietet eine detaillierte Leistungsanalyse der Algorithmen basierend auf Simulationen, Experimenten und der Diskussion eines konkreten Anwendungsszenarios. Zusammengefasst stellen diese Beiträge einen wichtigen Schritt zur Realisierung langlebiger Anwendungen zum Überwachen der Umwelt mittels drahtloser Sensornetze dar.

# Riassunto

Una rete di sensori è un sistema costituito da minuscoli dispositivi, detti nodi sensore, che vengono tipicamente alimentati a batterie e dispongono di un processore, una o più memorie dati, sensori di vario tipo nonché un trasmettitore. Una volta distribuiti su di un'area che si vuole monitorare, i nodi sensore acquisiscono campioni di variabili fisiche, come la temperatura di un ghiacciaio o la concentrazione di un agente inquinante. Per comunicare i dati raccolti ad una stazione base i nodi sensore formano una rete ad-hoc, e generalmente multi-hop, utilizzano i loro trasmettitori. Una rete di sensori può operare autonomamente per lunghi periodi e supportare un elevato numero di nodi, permettendo così di acquisire misure ad elevata granularità, sia spaziale che temporale, di una o più variabili fisiche.

Rendere una rete di sensori capace di far pervenire alla stazione base grandi quantità di dati durante lunghi periodi di tempo è tuttavia ancora un problema aperto. In particolare, l'utilizzo del trasmettitore comporta un elevato dispendio di energia per i nodi sensore e limitarne la frequenza di attivazione è dunque necessario per prolungare la durata operativa della rete. Allo stesso tempo, molte delle applicazioni nel contesto delle quali le reti di sensori trovano il loro utilizzo richiedono frequenti comunicazioni con la stazione base per permettere ai nodi sensore di inviare regolarmente i dati acquisiti. Una attenta pianificazione delle attivazioni dei singoli nodi è quindi necessaria al fine di operare in modo efficiente una rete di sensori. In questo contesto, i cosiddetti algoritmi di selezione dei sensori permettono di limitare il numero di comunicazioni totali con la stazione base individuando adeguati sottoinsiemi di nodi la cui attivazione permette di soddisfare i requisiti dell'applicazione. Tali algoritmi, tuttavia, presuppongono spesso la disponibilità di informazioni sulle caratteristiche dei fenomeni che si vogliono osservare.

Questa tesi propone quindi di eliminare, o ridurre, la necessità di tale conoscenza pregressa dotando gli algoritmi di selezione dei sensori della capacità di adattarsi continuamente alla dinamica del segnale misurato

e alla topologia della rete. La tesi si rivolge in un primo tempo al problema della selezione dei sensori nel dominio del tempo considerando algoritmi che permettono ai nodi sensori di stabilire autonomamente la frequenza con cui comunicano i loro dati alla stazione base. A questo scopo i nodi inviano, insieme al dato misurato, un modello di predizione che permette di stimare il valore dei prossimi campioni. La comunicazione con la stazione base può quindi essere sospesa fin quando l'errore di stima, cioè la differenza tra il valore effettivamente misurato e quello stimato dal modello, non supera una predeterminata soglia di tolleranza. Considerando che una adeguata scelta del modello di predizione è cruciale per massimizzare i risparmi in termini di comunicazione, questa tesi propone una procedura generica per effettuare la scelta di tale modello in modo adattivo e direttamente sui nodi sensori. L'algoritmo proposto mantiene un set di modelli e ne valuta continuamente le prestazioni permettendo così al nodo di selezionare, e comunicare alla stazione base, solo il modello in grado di garantire il maggior risparmio in termini di comunicazione. La tesi considera poi anche il problema della selezione dei sensori nel dominio dello spazio ed in particolare nel contesto di applicazioni che richiedono copertura spaziale di una specifica regione. La tesi introduce quindi una nuova strategia di selezione dei nodi in grado di garantire, entro predefiniti limiti di errore, la copertura della regione da monitorare. A questo scopo vengono utilizzate informazioni sulla topologia della rete ed applicate adeguate tecniche di randomizzazione.

Gli algoritmi di selezione dei sensori presentate in questa tesi richiedono una quantità di memoria dati e capacità di calcolo compatibili con le più comuni piattaforme sperimentali attualmente disponibili. Le prestazioni degli algoritmi presentati sono inoltre dimostrate da esperimenti su simulatore e piccole reti di sensori nonché dall'analisi di uno specifico scenario applicativo: il monitoraggio del rumore ambientale.

I risultati di questa tesi possono essere riassunti nella somma di tre contributi. Il primo consiste nella progettazione di nuove tecniche di selezione dei sensori. Il secondo nella implementazione di tali tecniche su simulatori e su nodi sensori. Ed il terzo nella valutazione delle prestazioni degli algoritmi tramite simulazioni ed esperimenti, nonché l'accurata analisi di uno specifico scenario applicativo. Considerati nel loro insieme, questi contributi costituiscono un passo verso la realizzazione di reti di sensori capaci di monitorare fenomeni ambientali per lunghi periodi di tempo e senza alcun intervento umano.