

Zeitsynchronisation in drahtgebundenen Rechnernetzen

Der Fakultät für Informatik und Elektrotechnik
der Universität Rostock zur Erlangung des
akademischen Grades eines

Dr.-Ing.

vorgelegte Dissertation von
Henning Putnies
geb. am 23.04.1990 in Stralsund

Rostock, 9. März 2021

Kurzzusammenfassung

Zeitsynchronisation ist essentiell für koordiniertes Agieren in verteilten Systemen. Als Beispiele lassen sich die verteilte Datenerfassung oder die automatisierte Industrieproduktion nennen.

Bestehende Protokolle sind entweder wenig genau, z.B. NTP (Network Time Protocol), oder bieten zwar eine hohe Genauigkeit, benötigen hierfür jedoch spezialisierte Hardware, z.B. PTP (Precision Time Protocol), was zu hohen Kosten führt.

Als Folge dessen wird in dieser Forschungsarbeit zunächst eine umfangreiche Analyse des Standes der Technik auf dem Gebiet der Zeitsynchronisation vorgenommen. Insbesondere wird hierbei evaluiert, inwiefern die Adaption neuer Algorithmen und Verfahren aus dem Bereich der drahtlosen Netzwerke auf drahtgebundene Netzwerke möglich ist.

Ausgehend von dieser Analyse werden neuartige Verfahren für die Zeitsynchronisation in drahtgebundenen Netzwerken vorgestellt. Erstens wird die Synchronisation mittels Broadcast-Nachrichten untersucht, was zu einer deutlichen Verbesserung der Skalierbarkeit führt (PSPI-Sync bzw. Precise, Scalable, and Platform Independent Clock Synchronization). Zweitens wird zum ersten Mal eine Untersuchung vorgenommen, inwiefern sich PTP mittels linearer Optimierung (LP) verbessern lässt (PTP-LP). Dies führt zu einer Verbesserung der Synchronisationsgenauigkeit und dazu, dass unter Umständen auf spezialisierte Hardware im Verbindungsnetzwerk verzichtet werden kann. Drittens wird, zum ersten Mal im Bereich der Zeitsynchronisation, eine Kombination aus LP und Broadcast-Nachrichten vorgestellt (SLMT bzw. Clock Synchronization Using Linear Programming, Multicasts, and Temperature Compensation), was eine Verbindung der jeweiligen Genauigkeits- und Skalierbarkeitsvorteile ermöglicht. Viertens wird, ebenfalls zum ersten Mal im Bereich der Zeitsynchronisation, eine Kombination aus LP und Temperaturkompensation vorgestellt. Dies führt zu einer weiteren Verbesserung der Synchronisationsgenauigkeit. Hierbei wurden zwei grundlegende Temperaturkompensationsansätze untersucht: SLMT-IMM als Verbindung aus SLMT und einem IMM (Interacting-Multiple-Model-Kalman-Filter) und SLMT-TH als Kombination von SLMT und einer Heuristik (Temperature Heuristic).

Zur Bewertung der Ansätze werden umfangreiche Untersuchungen durchgeführt: numerische Simulationen, Netzwerksimulationen mittels OMNeT++ (hierfür wurden die selbst entwickelten Java-Erweiterungen von OMNeT++ eingesetzt), sowie Messungen auf realen Geräten. Die Untersuchungen zeigen sowohl Nachteile der Ansätze als auch deren vielversprechendes Potential. So kann die Synchronisationsgenauigkeit in bestimmten Szenarien gegenüber dem Stand der Technik um mehrere Größenordnungen verbessert werden.

Abstract

Time (or clock) synchronization is essential for coordinated activities in distributed systems. Typical example applications are distributed data acquisition or industrial automation.

Existing synchronization protocols are either not very precise, e.g. NTP (Network Time Protocol), or require specialized hardware to offer high accuracy, e.g. PTP (Precision Time Protocol), which leads to high costs.

Initially, this thesis provides an extensive analysis of the state of the art in the research field of time synchronization. In particular, it evaluates the possibility of adapting new algorithms and methods from the field of wireless networks to the wired domain.

Based on this analysis, several new time synchronization methods for wired networks are proposed. Firstly, broadcast-based synchronization is examined, which leads to significant scalability improvements (PSPI-Sync or Precise, Scalable, and Platform Independent Clock Synchronization). Secondly, for the first time, this thesis examines, if PTP can be extended with linear programming (LP), which improves the accuracy (PTP-LP). Consequently, specialized hardware might not be needed in the network. Thirdly, for the first time in the synchronization domain, a combination of LP and broadcast messages is proposed (SLMT or Clock Synchronization Using Linear Programming, Multicasts, and Temperature Compensation), which allows combining the respective accuracy and scalability advantages. Fourthly, this thesis proposes combining LP and temperature compensation, also for the first time in the field of time synchronization. This further improves the synchronization accuracy. Basically, two temperature compensation approaches are proposed: SLMT-IMM as a combination of SLMT and an IMM (Interacting Multiple Model Kalman Filter) and SLMT-TH as a combination of SLMT and a (temperature) heuristic.

An extensive evaluation examines the approaches. It is based on numerical simulations, network simulations using OMNeT++ (the self-developed Java extensions for OMNeT++ are used for this), as well as measurements on real devices. The evaluation shows both disadvantages of the approaches and their promising potential. It is shown that the synchronization accuracy can be improved by several orders of magnitude in certain scenarios compared to the state of the art.