# Technologien für die intelligente Automation

Technologies for Intelligent Automation

Band 10

**Reihe herausgegeben von**
inIT - Institut für industrielle Informationstechnik
Lemgo, Deutschland

Ziel der Buchreihe ist die Publikation neuer Ansätze in der Automation auf wissenschaftlichem Niveau, Themen, die heute und in Zukunft entscheidend sind, für die deutsche und internationale Industrie und Forschung. Initiativen wie Industrie 4.0, Industrial Internet oder Cyber-physical Systems machen dies deutlich. Die Anwendbarkeit und der industrielle Nutzen als durchgehendes Leitmotiv der Veröffentlichungen stehen dabei im Vordergrund. Durch diese Verankerung in der Praxis wird sowohl die Verständlichkeit als auch die Relevanz der Beiträge für die Industrie und für die angewandte Forschung gesichert. Diese Buchreihe möchte Lesern eine Orientierung für die neuen Technologien und deren Anwendungen geben und so zur erfolgreichen Umsetzung der Initiativen beitragen.

Weitere Bände in der Reihe http://www.springer.com/series/13886

Mohammad Elattar

# Reliable Communications within Cyber-Physical Systems Using the Internet (RC4CPS)

Springer Vieweg

Mohammad Elattar
Institut für industrielle Informationstechnik
Hochschule Ostwestfalen-Lippe
Lemgo, Germany

ISSN 2522-8579 ISSN 2522-8587 (electronic)
Technologien für die intelligente Automation
ISBN 978-3-662-59792-7 ISBN 978-3-662-59793-4 (eBook)
https://doi.org/10.1007/978-3-662-59793-4

Springer Vieweg


This Springer Vieweg imprint is published by the registered company Springer-Verlag GmbH, DE part of Springer Nature.
The registered company address is: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

# Abstract

An important requirement to realize cyber-physical systems (CPSs) in critical infrastructures such as power grids is communication reliability where such reliability is usually measured in terms of communication service unavailability. With this regard, applications proposed for smart grids have reliability requirements of 99-99.9999%. To achieve this, most power utilities rely on dedicated networks and/or leased lines. The alternative for such solutions is the Internet which represents a global, cost-effective network for CPSs that span large geographical areas. Unfortunately, the reliability of today's Internet is inadequate and varies over time. A widely adopted approach in other domains to enhance reliability utilizes mainly redundancy in terms of communication paths and transmitted data. However, this requires knowledge about the topology to ensure disjointness of used paths, which is difficult in case of the Internet. Even with such knowledge, most of the available multipath (MP) communication protocols are throughput-oriented or proposed for dedicated networks and, therefore, cannot be utilized directly. Nevertheless, MP communication is still expected to improve the communication reliability of the Internet.

In this dissertation, data duplication and dynamic MP selection during runtime when using multiple end-to-end (e2e) paths are proposed to improve the communication reliability for Internet-based CPSs. With this regard, the problem of paths selection is formulated as an optimization problem to select the minimum number of e2e paths and limit the redundant data by the needed reliability. The multiple e2e paths are realized using different access internet service providers and MP communication protocols. In addition, real world measurements to investigate the reliability gains of MP communication in the Internet were conducted. The obtained results proved the existence of e2e paths that traverse completely different networks and, consequently, are likely to be disjoint. They also showed that the concurrent unavailability of different subsets of paths with two and three paths was 0%. Those results motivated proposing the Reliable Multipath Communication for Internet-based CPSs (RC4CPS) approach. It is an e2e approach that utilizes the inherent redundancy of the Internet and the concept of MP communication protocols to improve reliability. It also provides online monitoring and dynamic MP selection that considers the diversity and unavailability probability of e2e paths to maximize the reliability gains. RC4CPS was first implemented in MATLAB for initial evaluations and, then, using the iPRP (Parallel Redundancy Protocol for IP Networks) MP transport protocol. The resulting protocol, called iPRP-RC4CPS, incorporates the RC4CPS features and extends the original iPRP implementation, proposed for dedicated WAN networks, to support the Internet. The evaluation results carried out using both implementations of RC4CPS in the Internet indicated the ability of iPRP-RC4CPS to achieve 0% unavailability while selecting the minimum number of e2e paths.

# Zusammenfassung

Eine wichtige Voraussetzung für die Realisierung von cyber-physischen Systemen (CPS) in kritischen Infrastrukturen wie Stromnetzen ist die Kommunikationszuverlässigkeit. Die Zuverlässigkeit wird üblicherweise im Hinblick auf die Nichtverfügbarkeit von Kommunikationsdiensten gemessen. In diesem Zusammenhang haben die für Smart Grids vorgeschlagenen Anwendungen Zuverlässigkeitsforderungen von 99-99,9999%. Um diese zu erreichen, sind die meisten Energieversorger auf dedizierte Netze und/oder Mietleitungen angewiesen. Die Alternative für solche Lösungen ist das Internet, das ein globales, kosteneffektives Netzwerk für CPS darstellt, die große geographische Gebiete umfassen. Leider ist die Zuverlässigkeit des heutigen Internets unzureichend und variiert im Laufe der Zeit. Ein weit verbreiteter Ansatz in anderen Bereichen zur Verbesserung der Zuverlässigkeit verwendet Redundanz in Bezug auf Kommunikationspfade und übertragene Daten. Dies erfordert jedoch Kenntnisse über die Topologie des Netzwerks, um die physische Trennung der verwendeten Pfade sicherzustellen, was im Falle des Internets schwierig ist. Selbst mit diesem Wissen sind die meisten der verfügbaren Multipath (MP) -Kommunikationsprotokolle durchsatzorientiert oder für dedizierte Netzwerke entwickelt worden und können daher nicht direkt verwendet werden. Dennoch wird erwartet, dass MP-Kommunikation die Kommunikationszuverlässigkeit des Internets verbessern wird.

In dieser Dissertation werden Datenduplikation und dynamische MP-Auswahl zur Laufzeit bei Verwendung mehrerer end-to-end-Pfade (e2e) vorgeschlagen, um die Kommunikationszuverlässigkeit für internet-basierte CPS zu verbessern. In dieser Hinsicht wird das Problem der Pfadauswahl als ein Optimierungsproblem formuliert, um die minimale Anzahl von e2e-Pfaden auszuwählen und die redundanten Daten durch die erforderliche Zuverlässigkeit zu begrenzen. Die e2e-Pfade werden unter Verwendung verschiedener Internetdienstanbieter und MP-Kommunikationsprotokolle realisiert. Darüber hinaus wurden reale Messungen zur Untersuchung der Zuverlässigkeits-gewinne der MP-Kommunikation im Internet durchgeführt. Die erhaltenen Ergebnisse beweisen die Existenz von e2e-Pfaden, die völlig unterschiedliche Netzwerke durchlaufen und folglich wahrscheinlich physisch getrennt sind. Sie zeigten auch, dass die gleichzeitige Nichtverfügbarkeit von verschiedenen Kombinationen aus 2 und 3 Pfaden 0% betrug. Diese Ergebnisse motivierten den Ansatz des Reliable Communication for Cyber-Physical Systems (RC4CPS) vorzuschlagen. RC4CPS ist ein e2e-Ansatz, der die inhärente Redundanz des Internets und das Konzept der MP-Transportprotokolle nutzt, um die Zuverlässigkeit zu verbessern. Es bietet eine Online-Überwachung und eine dynamische MP-Auswahl, die die Pfad-diversität und die Wahrscheinlichkeit der Nichtverfügbarkeit berücksichtigt, um die Zuverlässigkeits-gewinne zu maximieren. RC4CPS wurde in MATLAB für erste Auswertungen und dann unter Verwendung des iPRP-MP-

Transportprotokolls (Parallel Redundancy Protocol for IP-Networks) implementiert. Das resultierende Protokoll, das als iPRP-RC4CPS bezeichnet wird, enthält die RC4CPS-Funktionen und erweitert die ursprüngliche iPRP-Implementierung, die für dedizierte WAN-Netzwerke entwickelt wurde, um den Einsatz im Internet zu unterstützen. Die Auswertungsergebnisse, die unter Verwendung beider Implementierungen von RC4CPS im Internet durchgeführt wurden, zeigen die Fähigkeit von iPRP-RC4CPS, 0% Nichtverfügbarkeit zu erreichen, während die minimale Anzahl von e2e Pfaden ausgewählt wurde.

# Contents

# Abbreviations

| | |
|---|---|
| 5G | 5th Generation |
| ACK | Acknowledgment |
| AGC | automatic generation control |
| AM | Attributes Matrix |
| AMI | Advanced Metering Infrastructure |
| AMPTCP | Augmented MPTCP |
| ANS | Autonomous System Number |
| API | Application Programming Interface |
| AS | Autonomous System |
| ASN | Autonomous System Number |
| CAN | Controller Area Network |
| CC | Congestion Control |
| *cc* | Correlation coefficient |
| CCC | Coupled Congestion Control |
| CDF | Cumulative Distribution Functions |
| CI | Confidence Interval |
| CMT/RP-SCTP | Resource Poolingenabled CMT-SCTP |
| CMT-SCTP | Concurrent Multipath Transfer SCTP |
| CPS | Cyber-physical System |
| cTCP | Concurrent TCP |
| CWAMPTCP | Congestion Window Adaptation MPTCP |
| DA | Distribution Automation |
| DARPA | United States Defense Advanced Research Projects Agency |
| DAR-SCTP | Dynamic Address Reconfiguration SCTP |
| DBAS | Deployable Bandwidth Aggregation System |
| DCC | Data and Control Center |
| DE | Diversity Estimator |
| DNP3 | Distributed Network Protocol 3 |
| DR | Demand Response |
| DSM | Demand-side management |
| DSR | Dynamic Source Routing |
| DTLS | Datagram Transport Layer Security Session |
| e2e | End-to-end |
| E2EMPT | End-to-End Multipath Transfer |
| ECN | Explicit Congestion Notification |
| EGM | Extended Gilbert model |
| EtherCAT | Ethernet for Control Automation Technology |
| FEC | Forward Error Correction |
| FIP | Factory Instrumentation Protocol |
| FMTCP | Fountain-Code-Based MPTCP |
| FPS-SCTP | Forward Prediction Scheduling SCTP |
| FTP | File Transfer Protocol |
| G-DBAS | Green DBAS |

| | |
|---|---|
| HMM | Hidden Markov Model |
| i.i.d. | Independent and identically distributed |
| IA | Inter-arrival |
| ICD | iPRP Control Daemon |
| ICMP | Internet Control Message Protocol |
| IED | Intelligent Electronic Device |
| IMD | iPRP Monitoring Daemon |
| IMMS | Initial Monitoring for Model Selection |
| IND | iPRP Network subcloud Discriminator |
| IP | Internet Protocol |
| IPC | Interprocess Communication |
| IPD | iPRP Path-selection Daemon |
| iPRP | The Parallel Redundancy Protocol for IP Networks |
| iPRP_CAP | iPRP capability message |
| IRD | iPRP Receiver Daemon |
| ISD | iPRP Sender Daemon |
| ISP | Internet Service Provider |
| LACP | Link Aggregation Control Protocol |
| LAN | Local Area Network |
| LG | Looking Glass |
| LIA | Linked Increases Algorithm |
| LISP | Locator/Identifier Separation Protocol |
| LTE | Long-Term Evolution |
| M&E | Monitoring & Estimation |
| M/TCP | Multipath Transmission Control Protocol |
| M2M | Machine-to-Machine |
| MAP/EPA | Manufacturing Automation Protocol/Enhanced Performance Architecture |
| MC | Markov Chain |
| MP | Multipath |
| MPLS | Multiprotocol Label Switching |
| MPLOT | Multi-Path LOss-Tolerant |
| MPRTP | Multipath RTP |
| MPTCP | Multipath TCP |
| MPTCP-SPA | MPTCP Slow Path Adaptation |
| MPTS-AR | Multipath Transport System Based on Application-Level Relay |
| MTC | Machine-Type Communication |
| M-TCP | Multipath TCP |
| MuniSocket | Multiple Network Interface Socket |
| NAN | Neighborhood-area Network |
| NASPI | The North American Synchro-Phasor Initiative |
| NAT | Network Address Translator |
| NC-MPTCP | Network Coding Based MPTCP |
| NCC | Network Coordination Centre |
| NGMN | Next Generation Mobile Networks |
| NSP | Network service provider |
| OLIA | Opportunistic Linked Increases Algorithm |
| OPERETTA | Optimal Energy Efficient Bandwidth Aggregation System |
| OS | Operating system |

| | |
|---|---|
| OSI | Open System Interconnection |
| PC | Personal computer |
| PDU | Protocol data unit |
| PLC | Programmable logic controller |
| PMTUD | Path MTU Discovery |
| PMU | Phasor Measurement Unit |
| PROFIBUS | PROcessFIeld Bus |
| PROFINET | Process Field Net |
| PRP | Parallel Redundancy Protocol |
| PRR | Ping-Receive Routine |
| PSN | Probe sequence number |
| PSockets | Parallel Sockets |
| PSR | Ping-Send Routines |
| PSW | Pattern start window |
| pTCP | Parallel TCP |
| PUM | Path Usage Method |
| PW | Pattern window |
| QoS | Quality of Service |
| QoS-MPTCP | QoS-oriented MPTCP |
| RC4CPS | Reliable Multipath Communication for Internet-based CPSs |
| RI2N/UDP | UDP-based Redundant Interconnection with Inexpensive Network |
| RIPE | Abbreviated from French for "European IP Networks" |
| R-M/TCP | Rate-based M/TCP |
| RMTP | Reliable Multiplexing Transport Protocol |
| RON | Resilient Overlay Network |
| RP | Resource Pooling |
| RT | Real-time |
| RTP | Real-Time Transport Protocol |
| RTT | Roundtrip time |
| RTU | Remote terminal unit |
| SCADA | Supervisory Control and Data Acquisition |
| SC-MPTCP | Systematic Coding MPTCP |
| SCTP | Stream Control Transmission Protocol |
| SDN | Software-defined Networking |
| SN | Sequence Number |
| SNSID | Sequence-Number-Space ID |
| SR | Selection Routine |
| SSR | Subflow Sender Reports |
| TCP | Transmission Control Protocol |
| TTL | Time-to-Live |
| UC | Unavailability Calculator |
| UDP | User Datagram Protocol |
| UMTS | Universal Mobile Telecommunications System |
| UP | Unavailability Predictor |
| VN | Virtual node |
| WAN | Wide Area Network |

| | |
|---|---|
| WASA | Wide Area Situational Awareness |
| WAVSM | Wide-area Voltage Stability Monitoring |
| WRR | Weighted Round-Robin |
| WSN | Wireless Sensor Network |