Kabel-Fehlerortung mit SynUTC

ULRICH SCHMID
Technische Universität Wien
Institut für Automation
Treitlstraße 3, A-1040 Wien
Email: s@auto.tuwien.ac.at

4. Februar 1998

Zusammenfassung

Das vorliegende Dokument faßt kurz die Eigenschaften eines Kabel-Fehlerortungssystems zusammen, das mit den Ergebnissen unseres Forschungsprojektes SynUTC realisiert werden kann. Bei dieser Darstellung wird insbesondere versucht, auf jene Aspekte hinzuweisen, die nach derzeitigem Wissensstand patentrechtlichen Neuigkeitscharakter haben könnten.

1 Projektergebnisse von SynUTC

Im Projekt *Synchronized Universal Time Coordinated for Distributed Real-Time Systems* (SynUTC)[1] wurde eine universelle Soft- und Hardware entwickelt, die netzwerkgekoppelte Computer mit hochauflösenden, hochgenau zueinander und auf Weltzeit synchronisierten lokalen Uhren versieht. Anders als bei herkömmlichen Verfahren basierend auf einer zentralen Uhr ist hier jeder Rechner mit einer eigenen lokalen Uhr ausgerüstet, die allein durch den Austausch von Synchronisationsnachrichten über das verbindende Datennetzwerk miteinander synchronisiert werden. Der Bezug zur Weltzeit wird dadurch hergestellt, daß an mindestens einen der Rechner ein GPS Satellitenempfänger mit Zeitausgang angeschlossen ist.

Für darauf aufbauende Anwendungen sind —neben der Möglichkeit, zu jedem beliebigen Zeitpunkt die aktuelle Uhrzeit lesen zu können— vor allem die diversen (unabhängigen) Zeitstempel-Funktionen interessant: Zum Zeitpunkt der Zustandsänderung eines digitalen Eingangs wird der Stand der lokalen Uhr in ein zugeordnetes Register gespeichert, wodurch ein solcher Zeitstempel (zeitlich relativ unkritisch aber natürlich noch vor der nächsten Zustandsänderung) per Software ausgelesen und weiterverarbeitet werden kann. Weiters stehen Möglichkeiten zur Auslösung von Interrupts bzw. eines Pulses an einem digitalen Ausgang bei Erreichen eines bestimmten Zeitpunkts zur Verfügung.

Wichtigste Eigenschaften des Gesamtsystems:

- Problemlose Überbrückung von LAN-Distanzen (typisch km-Bereich) unter alleiniger Ausnutzung des vorhandenen Datennetzwerks (keine zusätzlichen Verbindungen nötig). Die Eignung eines bestimmten Netzwerks hängt dabei nicht vom deterministischen Anteil der Nachrichtenverzögerungszeit δ (der automatisch gemessen wird), sondern lediglich vom maximalen *Delay-Jitter* ($\delta_{\max} - \delta_{\min}$) ab.
- Hohe Auflösung (Granularität) der lokalen Uhren von $2^{-24} \approx 60$ ns.
- Hohe Synchronisationsgenauigkeit der lokalen Uhren zueinander (genannt *Precision*), die linear vom Delay-Jitter des zugrundeliegenden Netzwerks und der verwendeten Taktfrequenz der lokalen Uhren abhängt; mit Ethernet und 10–20 MHz Taktfrequenz ist etwa 1 μs (worst-case, mit deutlich besserem average-case) zu erreichen.

[1] Gefördert vom Österreichischen Fonds zur Förderung der Wissenschaftlichen Forschung (FWF) unter Projektnummer P10244-ÖMA, dem Jubiläumsfonds der OeNB unter Projektnummer 6454, der Auftragsforschung des BMfWV unter Zl.601.577/2-IV/B/9/96 und dem START-Projekt Y41-MAT.

- Im Normalfall hohe Synchronisationsgenauigkeit aller lokalen Uhren zur Weltzeit (genannt *Accuracy*), auch bei den Rechnern ohne GPS-Empfänger. Darüberhinaus Bereitstellung einer zuverlässigen worst-case Qualitätsinformation (maximale Abweichung) über die momentane Accuracy einer lokalen Uhr.

  Die Accuracy der lokalen Uhr eines Rechners ist (natürlich) noch besser, wenn ein GPS-Empfänger an dem Rechner direkt[2] angeschlossen ist.

- Exzellente Fehlertoleranz-Eigenschaften, v.a.
  - korrekte Uhren werden durch fehlerhafte Rechner/Uhren nicht beeinträchtigt,
  - (längerer) Ausfall/Fehlverhalten von GPS-Empfängern verschlechtert lediglich (allmählich) die Accuracy,
  - mehrere Selbsttest- und Datensicherungsmechanismen.

- Möglichkeit des Aufbaus redundanter Systemarchitekturen, v.a.
  - redundante (mehrfache) Netzwerkverbindungen,
  - redundante Ausführung der lokalen Uhren,
  - Anschluß mehrerer GPS-Empfänger.

Realisierungstechnisch betrachtet muß jeder Rechner über folgende Komponenten verfügen, um diese Features bieten zu können:

- *CPU/Microcontroller* für die Ausführung der Synchronisations-Software, die jedoch ohne Probleme parallel zu anderen Berechnungen laufen kann.
- *Speicher* zur Übergabe von Datenpaketen an den Netzwerk-Controller (sowie für sonstige Dinge).
- *DMA-fähiger Netzwerkcontroller* für ein geeignetes Netzwerk, der das Senden/Empfangen von Datenpaketen aus/in den Speicher ohne Mithilfe der CPU erledigen kann.
- *UTCSU-ASIC*, das den primären Hardware-Support für die Uhrensynchronisation (v.a. die Uhr und diverse Zeitstempelmechanismen) bereitstellt. Durch den Einsatz von Rate-Synchronisation wird trotz hoher Genauigkeitsanforderungen kein hochgenauer Quarzoszillator benötigt.

An zumindest einen Rechner muß darüberhinaus ein GPS-Empfänger mit 1 pps Zeitausgang angeschlossen sein.

Das gesamte Verfahren beruht auf theoretisch gesicherten Grundlagen und kann durch die durchgeführten mathematisch-formalen Analysen den Anspruch erheben, seine Leistungsmerkmale —von Implementierungsfehlern abgesehen— auch garantiert zu erbringen. Die theoretischen Grundlagen und Konzepte wurden/werden in einer Reihe namhafter wissenschaftlicher Zeitschriften und Konferenzen publiziert. Die wichtigsten bereits erschienenen Arbeiten sind:

- [SS97] (erschienen März 1997): Prinzipieller Algorithmus, mathematische Analyse von Precision und Accuracy.
- [SSHL97] (erschienen Mai 1997): Konzepte und Beschreibung der Funktionalität des UTCSU-ASICs[3]

Es entstehen natürlich laufend weitere Ergebnisse, die sukzessive publiziert werden; vermutlich gegen Ende 1997 werden z.B. folgende Arbeiten erscheinen:

[2] Übrigens existiert für "stand-alone" Konfigurationen (ohne Netzwerk) die Möglichkeit, die lokale Uhr mit dem 1 pps Zeitausgang eines GPS-Empfängers phase-locked zu synchronisieren.

[3] Es gibt übrigens ein Patent von H. Kopetz (TU Wien) auf einen Vorläufer-Chip unserer UTCSU. Wir haben in einer vermutlich Dezember 1997 zu publizierenden Arbeit [HSS97] detailliert dargelegt, warum die UTCSU unseres Erachtens nach völligen Neuheitscharakter beanspruchen kann.

- [Scho97]: Prinzipieller Algorithmus und mathematische Analyse für Rate-Synchronisation (unabdingbar für hohe Synchronisationsgenauigkeit trotz low-cost Quarzen).
- [Sch97]: Beschreibung und Analyse eines konkreten Synchronisations-Algorithmus.

Neben den theoretisch/konzeptuellen Grundlagen wurde/wird eine Prototyp-Realisierung von Hard- und Software entwickelt, die primär der experimentellen Evaluation dient. Zwar wurden die konkreten Implementierungen natürlich nicht aus der Hand gegeben, allerdings wurden/werden zum Teil sehr detaillierte Implementierungsbeschreibungen publiziert:

- [Loy96] (erschienen April 1996): Detaillierte Implementierungsbeschreibung des UTCSU-ASICs.
- [HSS97] (erscheint vmtl. Dezember 1997): Detailkonzept eines UTCSU-basierenden, hochgenauen, low-cost Uhrensynchronisations-M-Moduls.

2 Perspektiven der Kabel-Fehlerortung

Die grundsätzliche Idee ist im Entwurf der Patentschrift vom 5.5.1997 im Prinzip korrekt festgehalten. Sie besteht darin, möglichst nahe an jedem Fehlerortungs-Sensor einen (Mikro-)Rechner —in der im vorigen Abschnitt beschriebenen Konfiguration und im folgenden *Zeitstempel-Einheit* (ZE) statt wie ursprünglich Controller genannt— zu plazieren. Dessen primäre Aufgabe ist es, die von den angeschlossenen Fehlerortungs-Sensoren gelieferten digitale Signale, die (eventuell) einen Kabelfehler signalisieren, zeitzustempeln. Aufgrund der Tatsache, daß die lokalen Uhren untereinander und v.a. mit der Weltzeit hochgenau synchronisiert sind, können die an den beiden Kabelenden erfaßten Zeitstempel zur Berechnung des Fehlerortes herangezogen werden. Die dafür notwendige (aber zeitlich unkritische) Übertragung der Zeitstempel zu einer geeigneten Auswertestation ist über das Datennetzwerk natürlich problemlos möglich.

Diese Technik ist sowohl für stationäre als auch mobile Fehlerortung geeignet (wenn auch für letztere höhere Anforderungen gelten dürften).

Die konkreten Vorzüge dieser Lösungsidee sind folgende:

- Unser Ansatz erlaubt die Konstruktion kleiner, billiger und robuster ZEs, die neben der Stromversorgung lediglich Anschlüsse für die zu überwachenden Fehlerortungs-Sensoren und einen Netzwerkanschluß benötigen. Diese können somit leicht in EMV-dichte Gehäuse eingebaut und daher in unmittelbarer Nähe der Fehlerortungs-Sensoren montiert werden.
- Die "Skalierbarkeit" unseres Ansatzes ist insoferne optimal, als die Installation eines zusätzlichen Fehlerortungs-Sensors im schlimmsten Falle das Hinzufügen einer weiteren ZE bedingt. Falls in der Nähe bereits eine ZE mit noch freien Zeitstempeleingängen existiert (deren Anzahl ist reine Auslegungssache), ist die Angelegenheit noch einfacher.
- Unser Ansatz verlangt es —im Gegensatz zu allen anderen mir bekannten Lösungen— <u>nicht</u>, jede ZE mit einem eigenen GPS-Empänger auszurüsten. Ein oder mehrere GPS-Empfänger können somit an möglichst günstigen Orten montiert werden und stellen allen ZEs im System ihre Zeitinformation über das Datennetzwerk zur Verfügung.

  Im Falle der stationären Fehlerortung hat dies einige Vorteile, die den Nachteil der (etwas) schlechteren Accuracy der Zeitstempel von ZEs ohne "eigenen" GPS-Empfänger vermutlich aufwiegen:

  - Jeder GPS-Empfänger braucht eine eigene Dachantenne (mit freier Sicht des gesamten Himmels), was die Anzahl geeigneter Montageplätze i.A. stark einschränkt. Existierende Systeme mit wenigen ZEs erfordern einen hohen Verkabelungsaufwand, da die vielen Signale der Fehlerortungs-Sensoren sternförmig an die zentralen Einheiten herangeführt werden müssen. Auf der anderen Seite, falls die örtlichen Gegebenheiten viele ZEs überhaupt zulassen, erfordern existierende Lösungen einen "Wald" von GPS-Antennen.

– Die Fehlertoleranz-Eigenschaften von Lösungen mit dedizierten GPS-Empfängern sind ungenügend, da eine ZE i.A. völlig ausfällt, wenn der zugehörige GPS-Empfänger ausfällt. Nun ist es schon einmal fraglich, wie gut GPS-Empfänger in der Nähe von Fehlerortungs-Sensoren überhaupt funktionieren. Darüberhinaus ist anzunehmen, daß die Fehlerortung gerade dann besonders gefordert ist, wenn die lokalen Umgebungsbedingungen (Gewitter usw.) extrem schlecht sind — und unter solchen Umständen ist die Verfügbarkeit von korrekter Information von einem GPS-Empfänger noch fraglicher als sonst.

  Unser Ansatz ist in der Lage, durch die gegenseitige Synchronisation der lokalen Uhren aller ZEs zumindest einige Zeit auch völlig ohne GPS-Information auszukommen — insbesondere ist auch jederzeit bekannt, wie gut die Accuracy der Zeitstempel tatsächlich ist. Alternativ könnte dem Problem natürlich auch mit hochgenauen lokalen Oszillatoren in traditionellen Lösungen abgeholfen werden, allerdings würde dies die Kosten und den Wartungsaufwand beträchtlich erhöhen. Man beachte hierbei übrigens auch, daß Lösungen mit wenigen ZE in Punkto Fehlertoleranz grundsätzlich problematisch sind, da bei einem einzigen Ausfall viele Fehlerortungs-Sensoren nicht mehr überwacht werden können.

– Es ist bei existierenden Lösungen i.A. nicht möglich, zur Erhöhung der Verfügbarkeit mehrere GPS-Empfänger parallel zu betreiben (und wenn doch, so profitiert nur eine einzige ZE davon).

- Unser Ansatz erlaubt es, im Falle wesentlich erhöhter Anforderungen in Punkto Fehlertoleranz redundante Komponenten einzusetzen: Eine ZE kann intern redundant aufgebaut werden (mehrere UTCSUs parallel), mehrere ZE's können denselben Fehlerortungs-Sensor überwachen, und auch das Datennetzwerk kann redundant ausgelegt werden; die Möglichkeit des Einsatzes mehrerer GPS-Empfänger wurde bereits im vorigen Punkt dargelegt.

3 Notwendige Adaptierungen der SynUTC-Ergebnisse

Darüber muß natürlich noch im Detail nachgedacht werden; einige offensichtliche Punkte sind folgende:

- Erhöhung Synchronisationsgenauigkeit

  Bei einer Signalausbreitungsgeschwindigkeit von ca. 150 m/μs sollte man tunlichst versuchen, eine (average case) Accuracy von 100 *ns* oder besser zu erreichen. Dies ist insbesondere für den mobilen Einsatz in Meßwägen wichtig. Einige Ideen dazu:

  – Verwendung von DGPS/Common View, um eine GPS-Zeitreferenz mit einer Accuracy im 10 ns-Bereich zu bekommen.

  – Verringerung der Granularität der lokalen Uhren (= Erhöhung Taktfrequenz), um die Quantisierungsunsicherheit von dzt. 60 ns zu verringern. Dies kann übrigens auch durch freilaufende, mitgesampelte "Microticks" erreicht werden.

  – Verwendung eines (Glasfaser-)Netzwerks mit möglichst kleinem Delay-Jitter, ev. durch Design eines speziellen Controllers (LON?)

- Entwicklung einer robusten ZE durch Erweiterung der NTI um CPU und Netzwerk-Controller.

- Design der Software-Umgebung (Betriebssystem) für die ZE.

Literatur

[Loy96] D. Loy. *GPS-Linked High Accuracy NTP Time Processor for Distributed Fault-Tolerant Real-Time Systems*, PhD thesis, Faculty of Electrotechnics, Technische Universität Wien, April 1996.

[HSS97] M. Horauer, U. Schmid, K. Schossmaier. *NTI: A Network Time Interface M-Module for High-Accuracy Clock Synchronization*, to appear in Proc. 6th International Workshop on Parallel and Distributed Real-Time Systems (WPDRTS '98), Springer LNCS, 1998.

[Sch97] U. Schmid. *Orthogonal Accuracy Clock Synchronization*, manuscript submitted for publication, 1997.

[SS97] U. Schmid, K. Schossmaier. *Interval-based Clock Synchronization*, J. Real-Time Systems 12(2), March 1997, p. 173–228.

[SSHL97] K. Schossmaier, U. Schmid, M. Horauer, D. Loy. *Specification and Implementation of the Universal Time Coordinated Synchronization Unit (UTCSU)*, J. Real-Time Systems 12(3), May 1997, p. 295–327.

[Scho97] K. Schossmaier. *An Interval-Based Framework for Clock Rate Synchronization*, Proc. 16th ACM PODC, 1997, p. 169–178.