

Schedulinganalysen für FlexRay – Warum?

Dr. Kai Richter, Symtvision GmbH

FlexRay wird in der Zukunft eine wichtige Rolle in Automobil-Netzwerken einnehmen und ist vielfach als Ersatz oder Nachfolger von CAN im Gespräch. Zu den populärsten Argumenten gehören: hohe Bandbreite, deterministische Schedules und Ausfallsicherheit (im Redundanzbetrieb). Die Einsatzmöglichkeiten sind Vielfältig und werden bei allen OEMs diskutiert. Mit dem BMW X5 ist bereits ein Serienfahrzeug auf dem Markt, in dem ein FlexRay-Bus im Fahrwerks-Bereich die vier Steuergeräte der aktiven Dämpfung (active suspension) untereinander und mit dem zentralen Gateway verbindet. Insgesamt erscheint die breite Einführung von FlexRay in sicherheitsrelevanten Bereichen wie „Fahrwerk“ sehr wahrscheinlich, um die mehr und mehr in grenzwertigen Lastbereichen betriebenen CAN-Busse abzulösen.

Für das Design zukünftiger FlexRay-Schedules existieren allerdings kaum ausgereifte (und erprobte) Strategie, denn es steht eine Vielzahl von Parametern einer Vielzahl von Kriterien und möglichen Anwendungsfällen gegenüber. Insbesondere gilt es abzuwägen, wann und wo sich der Umstieg wirklich lohnt, und wie er geeignet umgesetzt werden kann. Hier gibt es viele offene Fragen.

Mit dem Titel „Schedulinganalysen für FlexRay – Warum?“ widmet sich dieser Beitrag einem Thema, dass gerade im Umfeld von FlexRay oft zu unrecht als wenig relevant eingestuft wird. Tatsächlich wird FlexRay nicht selten fälschlicherweise als Lösung aller Timingprobleme angesehen. Dabei werden längst nicht alle aus CAN bekannten Timing- und Scheduling-Probleme durch den Einsatz von FlexRay automatisch gelöst. Im Gegenteil, der Einsatz von FlexRay wirft eine Reihe neuer Fragen auf.

Als Anbieter von einzigartigen Scheduling-Analyse-Lösungen für OSEK, CAN und FlexRay sowie der Tool-Suite SymTA/S adressieren wir 7 Kernfragen zum FlexRay-Timing / -Scheduling.

1 Wie deterministisch ist das FlexRay-Scheduling wirklich?

FlexRay basiert auf dem Schedulingprinzip „TDMA = Time Division Multiple Access“. Im statischen Segment werden Frames so immer zu definierten Zeitpunkten auf dem Bus übertragen, eine gegenseitige Verdrängung wie bei CAN existiert nicht (das dynamische Segment wird in Abschnitt 6 behandelt). Zusammen mit den COM-Tasks des Senders und des Empfängers ergeben sich vollständig vorhersagbare Antwortzeiten für Frames, und es existiert kein ernstzunehmender Jitter; ein Riesen-Vorteil gegenüber CAN.

Jedoch sind die Frames „nur“ die Signal-Container. Wesentlich für die Korrektheit eines Systems ist das Timing der Signale an den Ein- und Ausgängen der Software-Komponenten. Damit rückt das RTE (Run-Time Environment) als Schnittstelle zu den Frames (bzw. COM-PDUs) in den Mittelpunkt. Dort werden Signale geschrieben und gelesen, die Frames sind lediglich das „Transportmittel“. Zusätzlich ist das Task-Scheduling auf der ECU zu betrachten, weil dies die Zeitpunkte für den Zugriff auf das RTE wesentlich beeinflusst.

Die Schnittstelle zwischen COM und ECU-Task-Schedule kann synchronisiert und asynchron ausgelegt werden. Die Eigenschaften asynchroner Implementierungen sind relevant und werden im Abschnitt 5 behandelt. Wir betrachten hier zunächst die synchronisierten Systeme, mit denen sich (zumindest theoretisch) die kürzesten Antwortzeiten erreichen lassen. Dies gelingt aber nur dann, wenn man es richtig macht!

2 Wie synchronisiert man ECU-Applikationen mit FlexRay Schedules?

In einem synchronisierten System sind neben COM (ist bei FlexRay immer Bus-synchron) auch die Applikations-Tasks bzw. „start of ECU schedule table“ mit dem „FlexRay start of cycle“ synchronisiert. In der Folge ist der zeitliche Versatz zwischen den Frames, den COM-Tasks und

den Aktivierungen der Applikationstasks konstant. Idealerweise ist dabei der Task-Schedule so zu wählen, dass die Verweildauer eines Signals im RTE minimiert wird. Alternativ kann zu einem gegebenen Task-Schedule der FlexRay-Schedule oder die Lage der COM-Tasks optimiert werden.

Diese Aufgabe ist alles andere als trivial. Erstens kommt mit OSEK ein dynamisches, präemptives Scheduling auf der ECU zum Einsatz, das das Zeitverhalten der Applikationstasks und somit die Signal Input- und Output-Zeitpunkte beeinflusst. Zweitens führen insbesondere Interrupts und „chained tasks“ zu dynamischen Störungen im Scheduling.

Eine konstruktive Synchronisation wird nur dann sichergestellt, wenn Informationen zum Scheduling der Tasks und Interrupts auf der ECU bekannt sind. Dies kann zuverlässig nur eine Schedulinganalyse leisten. Anderenfalls ist das Optimierungspotential stark eingeschränkt; es besteht sogar die Gefahr einer erheblichen Verschlechterung des Timing, wenn z.B. bei ungünstigem Task- und Signal-Jitter nur jedes zweite Signal in einem FlexRay Frame landet, dafür dann aber doppelt übertragen wird. Dies ist in Abbildung 1 dargestellt.

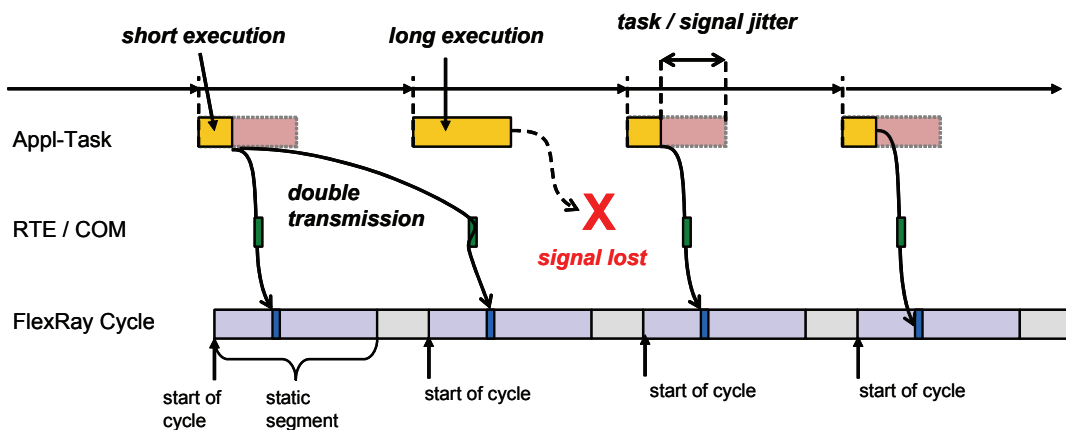


Abbildung 1 Signalverluste durch zu ungünstigen Task-Jitter

Fazit: Die zuverlässige Verkürzung von end-to-end Latenzen durch die Synchronisation von ECU-Schedules und dem FlexRay-Bus erfordert Schedulinganalysen der ECUs.

3 Gehört den voll-synchronen Systemen die Zukunft?

Theoretisch ließen sich durch den Umstieg auf voll-synchrone Systeme sämtliche Latenzen global optimieren. Diese globale Synchronisation wird nicht selten als endgültiges Ziel propagiert, speziell (aber nicht nur) im Bereich der Forschung. Ein Blick in die Entwicklungsprozesse der Automobilindustrie macht jedoch klar, dass ein derartig radikaler Umstieg nicht über Nacht zu erwarten ist. Vielmehr wird er sukzessive angegangen. Als Folge werden sowohl synchrone als auch asynchrone ECUs an einem FlexRay-Bus zu finden sein.

Zudem haben voll-synchrone Systeme auch ihren Preis. Denn die so gewonnene Vorhersagbarkeit und Optimierung geht zu Lasten der Flexibilität, weitere Funktionen aufzunehmen und dadurch den FlexRay- und/oder ECU-Schedule erneut "durcheinanderzubringen". Denn wenn auf dem FlexRay-Bus kein geeigneter Slot mehr frei ist, muss der Schedule geändert werden. Eine Änderung des Schedules erfordert wiederum die erneute Überprüfung und ggf. Anpassung der Synchronisation und der Schedules aller betroffener Tasks. Und dies ist umso kritischer, je stärker das ursprüngliche System bereits optimiert war.

Zum Vergleich: Auf einem CAN-Bus kann man notfalls immer noch ein weiteres Frame „dazwischen schieben“. Die Auswirkungen verteilen sich (mehr oder minder gleichmäßig) auf alle anderen Frames, ein komplettes Re-Design ist nicht notwendig.

Derartigen Effekten kann verschieden entgegengewirkt werden. Zum einen können explizit „Pufferzeiten“ bei der ECU-Synchronisation eingeplant werden, um ein mögliches „Verschieben“ von Frames nachträglich tolerieren zu können. So wird quasi durch absichtliche Nicht-Optimierung ein Stück der fehlenden Flexibilität zurückgeholt. Ebenso wirksam ist es, extra „Lücken“ im FlexRay Schedule zu lassen, die für spätere Erweiterungen genutzt werden können. Diese sollten idealerweise über das gesamte statische Segment verteilt sein. Damit sinkt aber auch die verfügbare Bandbreite von FlexRay.

Fazit: Voll-synchrone FlexRay-Systeme erfordern einen Trade-Off zwischen Optimierung und Flexibilität. Beides kann nur mit Schedulinganalysen sinnvoll bewertet werden.

4 Wieviel Bandbreite ist in der Praxis tatsächlich nutzbar?

Das FlexRay-Protokoll teilt das statische Segment in Slots identischer Größe. Zunächst ist für jedes Frame genau ein Slot pro FlexRay-Zyklus vorgesehen. Ergo werden alle Frames mit derselben Zykluszeit übertragen, unabhängig von der Periode der enthaltenen Signale. Dies führt schnell zu Ineffizienzen im Umgang mit der zur Verfügung stehenden Bandbreite.

Schnell veränderliche Signale können möglicherweise nicht so oft übertragen werden, wie es Änderungen gibt (Fall A). Hier fehlt Bandbreite an der richtigen Stelle. Andere Signale mit signifikant längeren Wechselzeiten werden dafür viel häufiger als nötig übertragen (Fall B), d.h. es wird Bandbreite „verschwendet“. Durch die statische Zuteilung ist eine Art Ausgleich nicht einfach realisierbar.

Zum Vergleich: Auf einem CAN-Bus wird die benutzte Bandbreite durch die „individuellen“ Perioden der Frames selbst bestimmt. Die zur Verfügung stehende Bandbreite verteilt sich also automatisch.

Eine solche Verbesserung der Bandbreitenverteilung erfordert bei FlexRay den Einsatz zusätzlicher Mechanismen. Das so genannte Cycle- oder Slot-Multiplexing erlaubt die abwechselnde Benutzung desselben Slot von verschiedenen Frames bzw. ECUs. Dadurch kann die Sendeperiode eines Frames vergrößert und der Slot für weitere Frames benutzt werden (Quasi-Undersampling). Dies führt zu einer Verbesserung der effektiven Auslastung im o.g. Fall B, erhöht aber für den asynchronen Fall und bei Synchronisations-Aussetzern die Latenz.

Soll ein Frame in einem FlexRay-Zyklus mehrfach gesendet werden (Fall A), müssen entsprechend mehrere Slots reserviert werden (Oversampling). Dies ist jedoch eingeschränkt durch die Zahl und Lage der verfügbaren Slots. Außerdem entstehen leicht Jitter, wenn die Slots nicht exakt dieselbe zeitliche Entfernung voneinander haben.

Fazit: Eine effiziente, an die Anforderungen der Signale angepasste Nutzung der FlexRay-Bandbreite erfordert den Einsatz zusätzlicher, das Scheduling beeinflussender Mechanismen. Schedulinganalysen können die Auswirkungen (Sync, MUX, Jitter) berücksichtigen.

5 Fragestellungen bei asynchronen FlexRay-Systemen

Es ist wahrscheinlich, dass insbesondere weniger sicherheits- und zeitkritische Systemteile auch nach einem Umstieg auf FlexRay asynchron bleiben werden, um der „Synchronisierungsfalle“ (Flexibilität, mangelnde Unterstützung dynamischen Verhaltens) zu entgehen. Solche ECUs können nach eigenen Kriterien optimiert werden, z.B. bezüglich CPU-Auslastung, ohne dabei auf die komplexen Synchronisationseffekte Rücksicht nehmen zu müssen. Langfristig ist also eine Koexistenz von synchronen und asynchronen Systemteilen am selben Bus zu erwarten.

In solchen Systemen sind die ECU schedule tables nicht mit dem FlexRay-Bus synchronisiert. Zusätzlich sorgen „clock skew“ Effekte für zeitliche Schwabungen und die tatsächlichen Latenzen von Signalen und Frames können während der Laufzeit stark schwanken. Im besten Fall wird ein soeben in das RTE geschriebene Signal sofort vom COM-Task ausgelesen und in einem Frame verschickt. Schlimmstenfalls wurde der COM-Task gerade „verpasst“ und es kommt

zu einer zusätzlichen Wartezeit, die genau der Periode des Frames entspricht. Je nach Ausprägung (z.B. große Makro-Perioden bei Frame-Multiplexing) liegen diese Wartezeiten sogar höher als bei vergleichbaren CAN-Systemen. Ähnliche Effekte entstehen auf der Empfangsseite.

Fazit: Asynchrone ECU-FlexRay-Anbindungen haben ein dynamisches, vom ECU-Scheduling abhängendes Zeitverhalten, das nur mit Schedulinganalysen systematisch erfasst werden kann.

6 Welche Bedeutung hat das dynamische FlexRay-Segment?

In Abschnitt 4 wurden bereits verschiedene Multiplexing-Strategien dargestellt, die eine bessere FlexRay-Ausnutzung bei sehr großen bzw. sehr kleinen Perioden (verglichen mit dem FlexRay-Zyklus) erlauben. Ähnlich wichtig wird die Frage nach der Ausnutzung bei dynamischen Kommunikationslasten, z.B. durch sporadische Frames, die nur selten gesendet werden und in kein periodisches Raster passen. Speziell für derartige sporadische oder dynamische Lasten wurde das dynamische Segment in FlexRay konzipiert, das das aus CAN bekannten Prioritäts-Scheduling teilweise abbildet.

Jedoch steckt auch hier der Teufel im Detail. Die Arbitrierung im dynamischen FlexRay-Segment ist (anders als bei CAN) nicht an „reine“ Prioritäten gebunden. Vielmehr teilt ein „Master“ in einer vorgegebenen Reihenfolge (hochprioritäre zuerst) den sendebereiten ECUs dynamische Slots zu. Im ungünstigen Fall (viele niederprioritäre Frames wollen gleichzeitig senden) entstehen so auch dann Idle-Zeiten auf dem Bus, wenn Frames sendebereit sind. Auch hier ist –wie im statischen Segment– ein Ausgleich nicht einfach realisierbar.

Die Auswirkungen dieses Effekts hängen dabei stark von der Art und Weise der Nutzung des dynamischen Segments ab. Im Fall von nur wenigen sporadischen Frames ist das Zeitverhalten überschaubar. Jedoch existieren auch Ideen, viele periodische Applikations-Daten im dynamischen Segment zu übertragen; oder umgekehrt für sporadische Daten einige Slots im statischen Segment zu vorzuhalten. Wie auch immer die tatsächliche Entscheidung getroffen wird, es sind eine Vielzahl komplexer Mechanismen beteiligt.

Fazit: Eine Scheduling-Analyse ist unverzichtbar, um überhaupt Aussagen über das Zeitverhalten von dynamischer und sporadischer Kommunikation treffen zu können.

7 Welche Use-Cases gibt es entlang der Supply-Chain?

Wurden bisher eher technische, das Zeitverhalten beeinflussende Eigenschaften von FlexRay dargestellt, widmet sich dieser Abschnitt den Entwicklungsprozessen, insbesondere der Schnittstelle zwischen OEMs und Zulieferern.

Prinzipiell existiert bei FlexRay eine Reihe von Fragestellungen, die bereits aus dem Entwurf von CAN und anderen Netzen bekannt sind. Was bei CAN die K-Matrix ist, ist bei FlexRay das Schedule-Design. Die Kernfragen sind ähnlich: Wer kann welche verifizierbaren Vorgaben, z.B. für Timing-Budgets von Tasks oder Signallaufzeiten (RTE-COM-Bus-COM-RTE) machen? Wie können diese sinnvoll definiert werden? Wie und in welcher Reihenfolge werden die Vorgaben umgesetzt? Technisch neu sind Fragen nach der Synchronisierung, die signifikante Auswirkungen auf das Timing haben, wie oben dargestellt.

Während derartige Fragestellungen im Bereich CAN erst in jüngerer Zeit Beachtung finden, bietet sich im Bereich FlexRay die Chance, die Zulieferprozesse von Anfang an einzubeziehen. Als wichtiger erster Schritt konnte FIBEX als standardisiertes (nicht-proprietäres) Austauschformat für FlexRay etabliert werden. Schon diese Möglichkeit des einfachen Austauschs von Design-Informationen lässt OEMs und Zulieferer vermehrt über mögliche Prozesse und Anwendungsszenarien diskutieren.

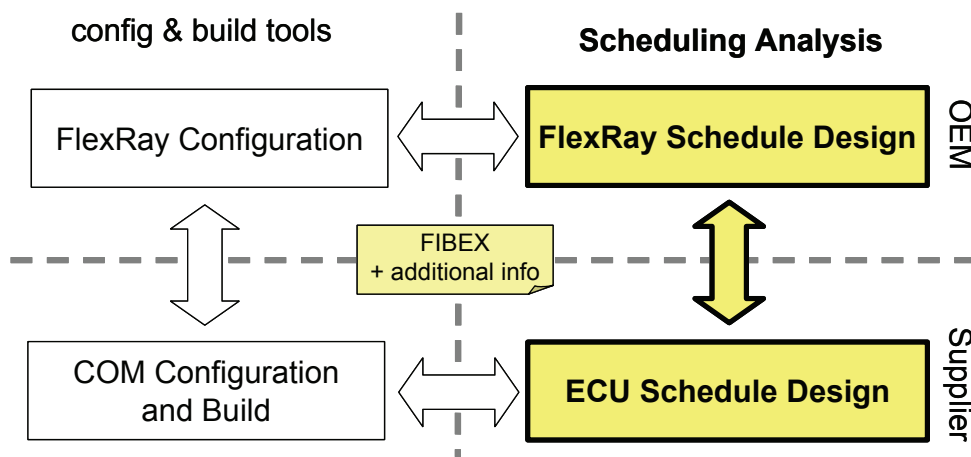


Abbildung 2 Anwendungsbeispiele für Schedulinganalysen im FlexRay-Umfeld

Abbildung 2 illustriert die typischerweise anfallenden Designschritte von OEMs und ECU- und BSW-Zulieferern. Hier werden viele der bereits genannten Abhängigkeiten deutlich. Z.B. kann COM erst dann optimiert werden, wenn ECU-Task-Schedule und FlexRay-Konfiguration feststehen. Aber es geht auch anders herum: ein Task-Schedule kann an eine vorgegebene COM-Konfiguration angepasst werden. Die tatsächliche Reihenfolge der Schritte ist dabei variabel und kann an strategische Vorgaben angepasst werden, z.B. top-down oder bottom-up, aber auch iterative Prozesse mit einer schrittweisen Optimierung sind möglich.

Fazit: Schedulinganalysen liefern entwurfsbegleitend wichtige Informationen zur Kommunikation zwischen OEMs und Zulieferern.

8 Zusammenfassung

Für das Design eines Flexray-Schedules hat heute kaum ein Automobilhersteller eine ausgereifte Strategie, denn es steht eine Vielzahl von Parametern einer Vielzahl von Kriterien und möglichen Anwendungsfällen gegenüber. Dazu kommt, dass Flexray oft fälschlicherweise als Lösung aller Timingprobleme angesehen wird. Dabei werden längst nicht alle aus CAN bekannten Timing-Probleme durch den Einsatz von FlexRay automatisch gelöst.

Sind Frames –die "Signal-Container"– im statischen Segment zwar völlig "timing-deterministisch", muss dies noch lange nicht für die enthaltenen Signale selbst gelten. In Zukunft wird die Synchronisation sendender und empfangender ECUs das End-to-End-Timing von Fahrzeugfunktionen und somit die Performanz ganzer Elektronikarchitekturen erheblich beeinflussen.

Aber nicht alle Hersteller sind sich einig, ein Gesamtsystem "global synchron" zu betreiben. Denn die so gewonnene Vorhersagbarkeit geht zu Lasten der Flexibilität, weitere Funktionen aufzunehmen und dadurch den FlexRay und/oder ECU-Schedule erneut "durcheinanderzubringen". Zudem ist kaum ein kompletter Umstieg "über Nacht" zu erwarten; vielmehr wird er sukzessive angegangen. Als Folge werden sowohl synchrone als auch asynchrone ECUs an einem FlexRay-Bus zu finden sein und nicht alle "reinen FlexRay-Trümpfe" lassen sich sofort ausspielen. In diesen Trade-Offs steckt viel Optimierungs- (und Vergeudungs-) Potential.

Effiziente und zielgerichtete Scheduling-Analysen bieten Vergleichsmöglichkeiten, wann und wo sich der Umstieg wie lohnt, wo nicht, und wo später, und adressieren somit Kernfragen strategischer Entscheidungen für alle relevanten Schritte im Entwicklungsprozess unter Einbeziehung der Zulieferkette.

Vortragender:

Dr. Kai Richter

Symtavision GmbH
Frankfurter Straße 3B
38122 Braunschweig

Tel.: 0531-886179-0

Fax: 0531-886179-29

info@symtavision.com

www.symtavision.com



SYMTA VISION