

CAN FD Netzwerk-Validierung

Simulation, Bewertungskriterien und automatisierte Auswertung

CAN FD richtet sich an die steigenden Anforderungen der Bandbreite in modernen Automobilsystemen. Aufgrund der einfachen Anpassung und der hohen Wiederverwendbarkeit des bereits bestehenden CAN-Protokolls, welches das wohl am stärksten verbreitete Netzwerkprotokoll im Fahrzeug darstellt, bietet die flexible Datenrate eine Lösung für den stetig wachsenden Informationsfluss. Dem Designer selbst jedoch stellt das Protokoll vor einige Herausforderungen. Das dynamische Verhalten eines Systems kann nicht durch manuelle Berechnungen vorausgesagt werden. Somit sind die Entwickler gezwungen Simulationen zu nutzen, um das Netzwerk bezüglich einer robusten Auslegung zu analysieren und Einflüsse neuer Komponenten unter Berücksichtigung zweier Hauptziele zu untersuchen: Verbesserung der Signalqualität und die korrekte Kommunikation mit präzisen Ergebnissen auch unter den sogenannten „Worst-Case“ Bedingungen. Die Simulation ist neben einer realen Messung die einzige Möglichkeit Asymmetrien eines Bits, die durch Auswirkungen der physikalischen Schicht entstehen, zu ermitteln. Um ein passendes Design für ein robustes CAN FD Netzwerk zu schaffen, werden Entwickler mit einer Vielzahl an Variationen konfrontiert. Diese verursachen wiederum eine erhebliche Menge an Daten. Aus diesem Grund ist die Automatisierung ein entscheidender Faktor den es zu berücksichtigen gilt.

Von Patrick Isensee (C&S group GmbH)

Die aufgeführte Methode zur Entwicklung robuster Netzwerke basiert auf einer virtuellen Prototyp-Implementierung von CAN FD Topologien, die definiert und entwickelt wurde, um Simulationen effizient nutzen zu können, während sich Zeit- und Kostenaufwand verringern. Es werden Kriterien zur Bewertung, sowie Anforderungen zur automatisierten Entwurfs- und Messdurchführung des gesamten Netzwerkes berücksichtigt. Außerdem wird ein Prozess beschrieben, der auf Simulation, Messung und Verifikation der Topologie basiert. Schwerpunkt ist hierbei das CAN FD Protokoll, das eine neue Version des klassischen CAN-Protokolls darstellt und die Übertragung größerer Nutzlasten auch bei höheren Frequenzen ermöglicht. Der aus den drei oben aufgeführten Schritten bestehende Validierungsprozess ist auch für weitere Protokolle wie z.B. FlexRay anwendbar.

Das Hauptziel ist es die Bedeutung und Vorteile, die Simulation heute aufgrund einer konstanten Steigerung der Qualität und Leistungsanforderung innerhalb von Fahrzeugnetzwerken hat, zu beschreiben. Eine Frage die Entwickler gerne stellen lautet: „*Warum sollte ich simulieren?*“. Hier die Antwort:

- Qualitätssicherung
- breitere Analyse im Vergleich zu Labor- und Prototypentests
- Reduzierung der Gesamtkosten
- Geringere Entwicklungszeiten

Eine Analyse der physikalischen Schicht ist der Schlüssel zu einem stabilen und sicheren Netzwerk.

CAN FD ist ein Baustein, um die Lücke zwischen den wachsenden Anforderungen hinsichtlich des Informationsaustausches von elektronischen Steuergeräten und den derzeit verfügbaren Technologien zu schließen. Dabei basiert es auf der bekannten CAN 2.0b Technologie, wobei noch zusätzliche Kriterien bei der Netzwerk-Validierung berücksichtigt werden müssen.

Validierung durch Simulation

Die erste und wichtigste Phase bei der Validierung eines modernen Topologie-Designs ist die Simulationsphase. Der Trend zeigt eine immer größer werdende Evaluierung von Fahrzeugnetzwerken unter Verwendung von Simulation. Mit der Notwendigkeit von Simulationen von CAN FD Netzwerken wird sich dieser Trend weiter verstärken. Das Hauptziel von Simulationen ist es, ein hohes Vertrauensniveau zur entwickelten Topologie zu erreichen. Sobald sich die Topologie bewährt hat, kann sie entweder im Labor oder direkt im Fahrzeug selbst implementiert werden.

Die Simulationen beinhalten genaue Modelle für Transceiver und Leitungen, sowie eine Simulationsumgebung, welche durch Skripte gesteuert werden kann, was eine Automatisierung ermöglicht. Eine vorausgehende Anforderung an die Simulation ist die Modellentwicklung. Sobald ein plausibles Modell besteht, kann die Validierung des Topologie-Designs durchgeführt werden.

a. Modellentwicklung

Die Entwicklung eines Modells ist ein wichtiger Schritt bei der gesamten Simulation. Diese muss mit Labormessungen vergleichbar sein und sollte den Kurvenverlauf des realen Devices widerspiegeln. Die Tests werden für ein Device mit seinen typischen Lastbedingungen ausgeführt. Auf der anderen Seite, sobald das Modell das gleiche Verhalten wie das reale Device zeigt, muss ein Test innerhalb eines Netzwerkes durchgeführt werden, der noch einmal aus einem Vergleich zwischen der Simulation und der realen Messung besteht.

b. Simulationsdurchführung

Das Ziel von Seiten des Designers ist es, eine Qualitätssicherung des eigenen Entwurfs zu erreichen. Im Rahmen des typischen Design-Prozesses ist dies nicht nur möglich, sondern auch quantifizierbar. Die Robustheit des Systems wird hier ausgewertet. Die endgültigen Ergebnisse sollten mit einigen spezifischen Labormessungen verglichen werden. Insbesondere in CAN FD Netzwerken ist die Verwendung von Simulationen zwingend erforderlich, da die Asymmetrie der Signalfanken eine entscheidende Rolle aufgrund der höheren Übertragungsgeschwindigkeit während der Datenphase spielt. Marginale Umweltbedingungen, wie erhöhte und niedrige Temperaturen, können zusätzlich die negativen Eigenschaften der Symmetrie verstärken, welche jedoch leicht durch eine Simulationen untersucht werden können.

Da CAN FD auf dem klassischen CAN basiert, ist die Arbitrierungsphase bei beiden Protokollen gleich anzusehen und somit sind alle bekannten Regeln und Grenzen nach wie vor gültig. Aus diesem Grund werden diese Regelungen hier nicht betrachtet. Ausschließlich die neuen Kriterien für die CAN FD Datenphase müssen analysiert werden, um die oben genannte Symmetrie beurteilen zu können. Die Asymmetrien der gemessenen Flanken eines Netzwerkes bestimmen im Wesentlichen die Wahl des Abtastzeitpunktes während der Datenphase.

Eine sogenannte „Round-Robin“ Kommunikation wird bei der Simulation der Topologie initiiert. Jeder Knoten handelt einmal als Sender, einer nach dem Anderen, und sendet ein einfaches Bitmuster auf den Bus. Ein Patterngenerator erzeugt über das gesamte System ein digitales Empfangssignal an dem TxD-Pin des Transceivers mit der erforderlichen Datenrate. Die resultierenden Signale auf der digitalen und analogen Seite werden für die nachfolgende Signalverarbeitung protokolliert. Mit allen gesammelten Signalen ist es nun möglich, sowohl

die Laufzeitverzögerungen als auch den differentiellen Signalpegel des CAN-Busses zu berechnen. Die Qualität jedes Signals wird an jedem Knoten innerhalb der Topologie analysiert.

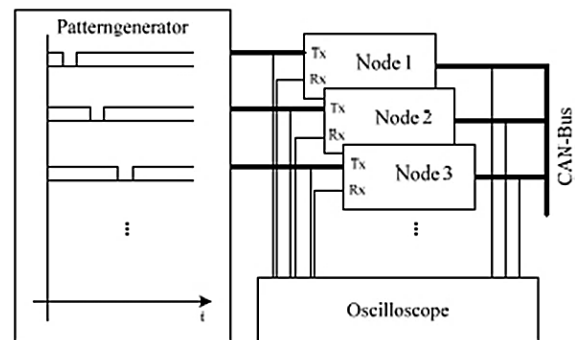


Bild 1: Simulationsaufbau

▪ Stimulus-Signal

Das Stimulus-Signal für das jeweils aktiv sendende Steuergerät ist eine einfache Kombination aus aufeinanderfolgenden Bits. Abhängig vom Testfall beinhaltet das Bitmuster ein oder mehrere rezessive Bits (logisch „1“), gefolgt von einem oder mehreren dominanten Bits (logisch „0“). Ein Worst-Case Szenario liegt vor, wenn nach fünf dominanten Bits ein rezessives Bit gesendet wird und anschließend weitere dominante Bits folgen. Diese Kombination führt nach einer maximal möglichen Aufladung aller Kapazitäten in dem Netzwerk zu einer Entladung der Kapazitäten während eines einzelnen Bits. Sobald Effekte wie z.B. analoges oder digitales Klingeln im Netzwerk auftreten, sollte dieses Szenario seinen schlimmsten Zustand ausgesetzt sein. Auf diese Weise liegt das rezessive Bit (t_{REC}) zwischen 2 dominanten Bits. Der Empfänger muss nun imstande sein das rezessive Bit, trotz gegebenenfalls starkem Klingeln, zu erkennen.

▪ Bewertungskriterien

Die wichtigsten Kriterien für eine korrekte Kommunikation sind zum einen die mittels Bit-Timing Einstellungen bewertete Takttoleranz (df) und zum anderen die fehlerfreie Abtastung eines jeden Bits. Während sich die Anforderungen an die Takttoleranz nur auf die Bit-Zeit konzentrieren und Topologieeffekte nicht berücksichtigt werden, befasst sich das sichere Abtasten eines jeden empfangenen Bits auf die unterschiedlichen Laufzeitverzögerungen einer dominant-zu-rezessiv und rezessiv-zu-dominant Flanke. Je höher die Baudrate ist, umso wichtiger wird die Symmetrie zwischen den Laufzeitverzögerungen beider Flanken. Dies führt zu einer besonderen Analyse der Zeitkomponenten, die bei einer Übertragung zwischen zwei Steuerge-

räten erforderlich ist. Die folgenden Zeiten werden in Bild 2 gezeigt:

- $t_{CC T}$ Verzögerung des Controllers von der internen Auslösung des übermittelnden Bits bis es am Ausgang abrufbar ist,
- $t_{TRX T}$ Sendeverzögerung von der Änderung des Eingangssignals bis zum Erkennen am Transceiver-Ausgang,
- t_{EMC} Störeffekte wie EMV-Jitter,
- t_{WIRE} Verzögerung der Leitung,
- $t_{TRX R}$ Empfangsverzögerung vom Überqueren der Threshold-Spannung bis zur Änderung am Transceiver-Ausgang,
- $t_{CC R}$ Verzögerung des Controllers von der Änderung des Eingangssignals bis zu der internen Erkennung.

Um die Stabilität von CAN FD zu garantieren, muss ein Sicherheitsabstand vor und nach dem Abtastzeitpunkt definiert werden.

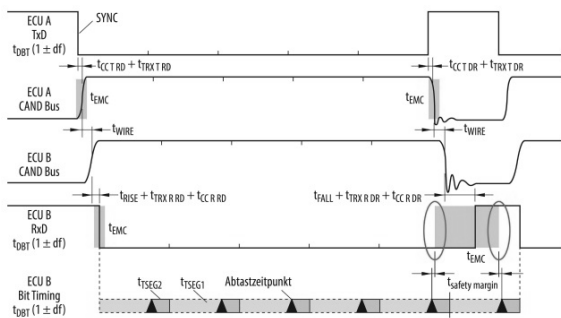


Bild 2: Verzögerungen und die daraus entstehende Asymmetrie bei Kommunikation zw. zwei Steuergeräten

Die gemessene rezessive Bit-Zeit t_{REC} wird als nominale Bit-Zeit minus aller folgender Parameter des Signals angenommen:

$$t_{REC} = t_{DBT} - (t_{TRX T DR} - t_{TRX T RD}) - (t_{TRX R DR} - t_{TRX R RD}) - (t_{FALL} - t_{RISE})$$

- t_{REC} rezessive Bit-Zeit
- t_{DBT} Bit-Zeit in der Datenphase
- TRX Transceiver
- T Sender (Transmitter)
- R Empfänger (Receiver)
- DR dominant-zu-rezessiv Flanke
- RD rezessiv-zu-dominant Flanke

Mit diesen Informationen werden folgenden Ungleichungen im Worst-Case Fall in Betracht gezogen:

- unter der Voraussetzung, dass ECU A schneller als ECU B ist, sollte am 5.Bit des beobachteten RxD-Signals folgendes gelten:

$$t_{REC} < t_{DBT} + t_{TSEG2}(1 + df_B) + t_{CC} - t_{CLK} - t_{safety\ margin}$$

- unter der Voraussetzung, dass ECU A langsamer als ECU B ist, sollte am 6.Bit des beobachteten RxD-Signals folgendes gelten:

$$t_{REC} > t_{TSEG2}(1 - df_B) + t_{CC} + t_{CLK} + t_{safety\ margin}$$

Mit beiden Ungleichungen ist t_{REC} zwischen einem minimal und maximal möglichen Wert begrenzt. Eine automatisierte Bewertung sollte in der Lage sein, zu erkennen, ob sich t_{REC} außerhalb der Grenzen befindet und dies im Bericht aufzeigen. Das Rücklesen der eigenen gesendeten Nachricht muss ebenfalls bei einer vollständigen Topologie-Validierung betrachtet werden. Hierbei kommt es speziell bei CAN FD und der damit einhergehenden höheren Baudrate zu dem Gebrauch der sog. „Transmitter Delay Kompensation“ und dem dabei verwendeten sekundären Abtastzeitpunkt (SSP). Mittels dieses Mechanismus werden Verzögerungszeiten des Senders kompensiert, da eine sichere Abtastung der Bits anders nicht möglich wäre. Dieser Spezialfall bringt zusätzlich einige Besonderheiten wie z.B. einen ggf. erheblichen Quantisierungsfehler mit sich. Außerdem ist zu beachten, dass die Bit-Time-Logic (BTL) beim Rücklesen bereits beim Senden startet und einige Ausdrücke wie die Laufzeitverzögerung der Leitung entfallen.

Eine weitere wichtige Messung stellt die Ermittlung der Settle-Time dar. Die interessante Flanke ist hierbei der Übergang vom dominanten zum rezessiven Zustand des Busses. Es kann entweder die Zeit des Signals von der höheren Schaltschwelle (0,9V) zur niedrigeren Schwelle (0,5V) gemessen werden oder aber dieselbe Messung unter Einbindung der fünf dominanten Bits vor dem Wechsel in den rezessiven Zustand, wobei hier die Verzögerung der steigenden Flanke mitberücksichtigt wird.

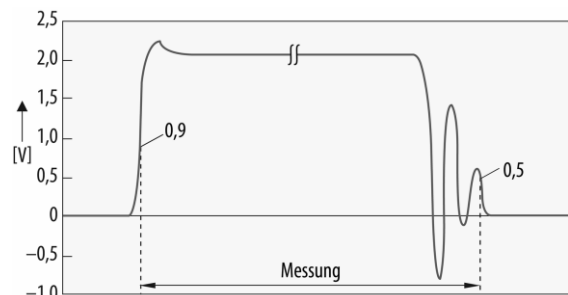


Bild 3: Settle-Time Messung am analogen Differenzsignal

Hier gilt es zu beobachten, ob das analoge Klingeln vor dem Abtastzeitpunkt gedämpft wurde und der Pegel somit unter +0,5V liegt. Die Grenzen in Bezug auf die Bit-Zeit in dieser Auswertung sind SP% bzw. 50% als Warnungsbereich.

$$\frac{t_{settle\ time}}{t_{DBT}} \begin{cases} > 50\% & \begin{matrix} > SP\% \rightarrow fail \\ and < SP\% \rightarrow warning \\ < 50\% \rightarrow pass \end{matrix} \end{cases}$$

Vertrauen durch Verifikation

Ein Designer wird immer Interesse daran haben einen hohen Vertrauensgrad für die Simulationsergebnissen zu erreichen, sodass der nächste Schritt in diese Richtung die Durchführung einiger Labormessungen ist. Einige Simulationen und Messungen können durchgeführt werden, um sowohl die Ergebnisse als auch die Kurvenverläufe zu vergleichen. Wichtig hierbei ist der genaue Aufbau der Simulation (Messpunkte, Stimuli, genaue Bauteile). Um die monotone Betrachtung der physikalischen Schicht zu durchbrechen, können in einem abschließenden Schritt weiterführende Messungen mit realen Steuergeräten herangezogen werden. Somit kann verifiziert werden, ob eine Kommunikation auch mit dem Senden und Empfangen echter Botschaften sichergestellt werden kann.

Effizienz durch Automatisierung

Wenn davon ausgegangen wird, dass bei der Durchführung einer Topologie-Bewertung 12 elektronischen Steuergeräte beteiligt sind, ist $n = 12$. Zur gleichen Zeit wird praktisch in Betracht gezogen, die Topologie bei 2 Mbit/s und 5 Mbit/s zu bewerten. Der Hersteller möchte nun seine Produkte in verschiedenen Anwendungen und auch in verschiedenen Teilen der Welt vertreiben, wodurch unterschiedliche Temperaturbereiche in Betracht gezogen werden müssen.

Im Automobil können die Temperaturbereiche in die Szenarien minimale-, typische- und hohe Temperatur unterteilt werden. Mit der Art von Tests wie am Anfang dieses Artikels beschrieben, werden insgesamt n^2 Signale erzeugt die ausgewertet werden müssen. Zusätzlich müssen die zuvor erwähnten Temperaturszenarien bei den Tests berücksichtigt werden. Für jedes Signal müssen vier Messungen für alle Kombinationen der steigenden und fallenden Flanken durchgeführt werden. Der gesamte Prozess ergibt damit insgesamt 3456 Messungen. Hinzu kommen verschiedene Bewertungskriterien für die Arbitrierungs- und Datenphase, welche gegebenenfalls unterschiedliche Stimuli benötigen. Dieser gesamte Prozess kann alleine oder in einem Team durchgeführt werden, jedoch ist sehr viel Zeit-

und Arbeitsaufwand nötig, um ein Ergebnis für die Analyse zu erhalten. Der Mensch als Fehlerquelle wurde hierbei noch nicht mitbetrachtet. Angenommen, dass eine oder mehrere Verbindungen Probleme zeigen: hier muss das Netzwerk verändert und das Design neu bewertet werden. Mit einem automatisierten System werden alle Messungen innerhalb weniger Stunden oder auch Minuten durchgeführt. Automatisierungen bieten nicht nur die Möglichkeit, Messungen mit einer Bewertung durchzuführen, sondern auch Abbildungen für jede Messung innerhalb des Ergebnisberichtes zu erstellen.

Zusammenfassung

Heutzutage sind Simulationen ein guter Ansatz, um Design-Probleme in einem frühen Stadium der Fahrzeugentwicklung zu bewältigen. Durch die höhere Datenrate wird die Asymmetrie bei der Validierung der Datenphase zum Schlüssel des Erfolgs und deren Auswertung macht mithilfe von automatisierter Simulationen den Unterschied hinsichtlich Effektivität und Effizienz. Mit der Automatisierung können nicht nur große Netzwerke ausgewertet werden, sondern auch Randbedingungen aufgrund von Fertigungstoleranzen und Temperaturkoeffizienten in Betracht gezogen werden. In einer automatisierten Simulationsumgebung kann eine Topologie mit der Einbeziehung verschiedener Bedingungen ausgewertet werden. Einzelne Teile der Topologie und Leitungen können unterschiedlichen Temperaturen ausgesetzt werden. Die Komponenten jedes Knotens lassen sich durch Fertigungstoleranzen begrenzen und Taktabweichungen können in einigen Knoten maximal und in anderen Knoten minimal eingestellt werden. Die Kostenreduzierung und die breite Analyse sind nur zwei wichtige Punkte, die das Netzwerk-Design besser als je zuvor machen.

Author	Patrick Isensee
Firma	C&S Group GmbH
Adresse	Am Exer 19b, 38302 Wolfenbuettel, Germany
Telefon	+49 5331 90 555 309
Fax	+49 5331 90 555 110
E-Mail	p.isensee@cs-group.de
Website	www.cs-group.de