

# Automatisierte Ermittlung von Worst-Case-Szenarien

## Spezifikationspunkt 3 für den MOST Optical Physical Layer

Dieser Artikel beschreibt einen Ansatz zur Bestimmung und Analyse von Worst-Case-Szenarien am MOST Optical Physical Layer Spezifikationspunkt 3, abhängig von Degradierungsmechanismen der optischen Polymerfaser.

Andreas Braun, Markus Becht, Dr. Oliver Bringmann und Prof. Dr. Wolfgang Rosenstiel

Optische Netze sind immun gegen Interferenzen anderer elektrischer Quellen; ein Einfluss auf die Signalintegrität existiert nicht. Jedoch haben Bandbreitenbeschränkungen des optischen Übertragungsmediums eine Wirkung auf die Signaleigenschaften und müssen in Spezifikationen für optische Verbindungen berücksichtigt werden. Der MOST150-Standard verwendet die identische optische Polymerfaser (POF), die auch bei MOST25 eingesetzt wird. Während bei MOST25 der Einfluss von POF-Bandbreiten-Beschränkungen vernachlässigbar war, erfordert die höhere Geschwindigkeit von MOST150 eine ausführliche Untersuchung.

Die Bandbreiten-Begrenzungs-Charakteristik der optischen Polymerfaser beeinflusst das übertragene Signal – in Abhängigkeit von der Faserlänge und der numerischen Apertur (NA) der POF. Weiterhin beeinflussen Sender-Eigenschaften wie die Start-NA und die Pulsgestalt des gesendeten optischen Signals das Signal, welches die Faser passiert. Um Fehler bei der Datenübertragung zu vermeiden, ist es wichtig, Kenntnisse von Worst-Case-Eingangsszenarien und ihren Einfluss auf die Signalparameter nach der Datenübertragung zu haben. Eine tiefgreifende Analyse von extremen Sender-Charakteristiken und ihren Ein-

flüssen auf die Signalübertragung durch die POF ermöglicht es, die Einschränkungen an optischen Emittlern anzugeben sowie Worst-Case-Input-Bedingungen für optische Empfänger vorauszusagen.

### Studie für Worst-Case-Szenarien

Die „MOST150 Optical Physical Layer“-Spezifikation liefert eine Definition der optischen Verbindung durch

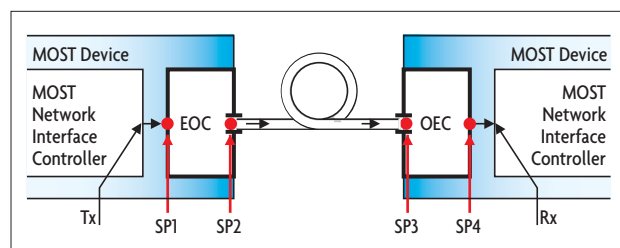


Bild 1. Definition der Spezifikationspunkte.

vier Spezifikationspunkte (SP1 bis SP4), die wichtige Schnittstellen markieren (Bild 1). Die optischen Eingangsparameter für den optisch/elektrischen Konverter (EOC) werden an SP3 spezifiziert. Das Signal an SP3 wird durch verschiedene Quellen beeinflusst. Zuerst kann sich das Ausgangssignal am elektrisch/optischen Konverter (EOC) Ausgang SP2 in den gegebenen Toleranzbereichen ändern. Das schließt Schwankungen in Pulsgestalt, zeitliche Verzerrungen, optische Ausgangsleistung und Start-Bedingungen ein. Das Transportmedium POF

kann das Datensignal ebenfalls stark beeinflussen. Der dominierende Einfluss ist die optische Dämpfung, die durch die POF und die optische Verbindung verursacht wird. Eine andere Schwächung der Signalqualität wird durch die Bandbreiten-Begrenzung der POF verursacht, was wiederum zur Verschlechterung der Übergangszeiten, zu Inter-Symbol-Interferenz (ISI) und zur Tastverhältnis-Verzerrung (DCD) führt. Für die Darstellung der Übertragungsfunktion der POF definiert die MOST-Spezifikation eine mathematische Darstellung der Übertragungsfunktion der POF, die basierend auf gründlichen Untersuchungen und theoretischen Betrachtungen bestimmt wurde.

Um ein tieferes Verständnis von Worst-Case-Szenarien an SP3 basierend auf SP2-Eingangsbedingungen zu erlangen, wurde eine Studie begonnen, deren Ziel es war, Worst-Case-Pattern für SP3 zu finden und Degradierungsmechanismen zu erklären. Für die Simulationen wurden die Faserlänge und der Start-NA laut den Worst-Case-Einstellungen des MOST150 Optical Physical Layer festgelegt.

Zur automatischen Bestimmung von Worst-Case-Szenarien für verschiedene Parametersätze wurde ein auf Matlab basierendes Programm entwickelt. Matlab ist eine numerische

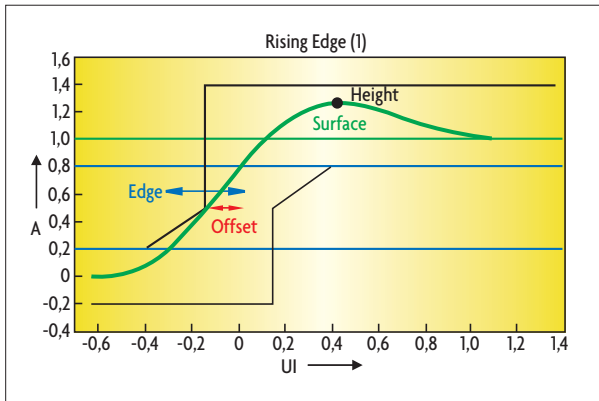


Bild 2. Pattern-Parameter.

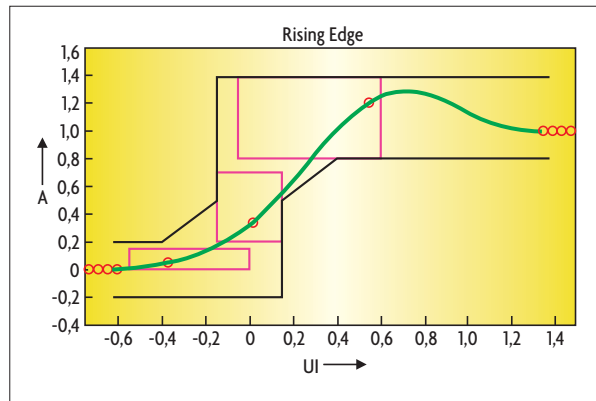


Bild 3. Polynomische Interpolation für eine ansteigende Flanke.

Rechenumgebung und Programmiersprache. Die Software erzeugt getrennte Pulsformen für steigende und fallende Flanken, wobei der gesamte, durch die „MOST Physical Layer“-Spezifikation gegebene Toleranzbereich genutzt wird. Diese Flanken lassen sich durch Zuhilfenahme gültiger MOST-Frames in DC-adaptiver Codierung (DCA) zu einem einzelnen Signal verbinden. Danach wird der Einfluss des Übertragungsmediums berechnet. Der Einsatz ganzer MOST-Frames garantiert, dass auch niedrige Frequenzen in die Berechnung eingeschlossen werden. Anschließend werden die SP3-Ergebnisse für Visualisierung und Analyse gespeichert. Diese Schritte werden iteriert, bis die gewünschte Parameter- oder Kreuz-Überdeckung erreicht ist. Die Überdeckung lässt sich anhand von Parametern zur Beschreibung der Pulsformen von steigender oder fallender Flanke bestimmen.

### SP3-Eingangspattern-Berechnung

Alle Pattern werden unter Verwendung von normalisierten Amplituden- und Zeitskalen erzeugt. Die Amplitude beruht auf den stationären High-Level- und Low-Level-Zuständen der optischen Signale (B1, B0). Eine spezifische Methode zur Erlangung dieser Parameter wird in der MOST-Spezifikation angegeben. Amplitudenwert 1 steht für den stationären Zustand B1; ein zusätzliches Überschwingen wird bis zu 1,4 erlaubt (Bild 2). Amplitude 0 vertritt den stationären Zustand B0, der nicht notwendigerweise Null bedeutet. Die Zeitskala wird in Einheits-

intervallen (UI) definiert, hergeleitet aus der Netzwerk-Bit-Rate. Wegen des Codierungs-Schemas ist die kürzeste Pulsbreite 2 UI. Zudem gibt es weitere Puls-Typen mit einer Pulslänge bis zu 6 UI. Die SP3-Eingangspattern-Berechnung wird in drei Hauptschritte unterteilt. Diese Schritte werden in den folgenden drei Abschnitten detailliert beschrieben.

### Erzeugung von steigenden und fallenden Flanken

Die erzeugten Übergänge stellen Pulsformen von einer Länge von 2 UI dar. Steigende Flanken beginnen mit der Amplitude 0 und enden mit der Amplitude 1, fallende Flanken fangen mit

Parameter definieren, um Flanken mit speziellen Eigenschaften zu erzeugen.

- ▶ Flanke: Übergangszeit zwischen 20 % und 80 % der normalisierten Amplitude.
- ▶ Oberfläche: Akkumulierte Leistung innerhalb der Oberfläche über oder unter der normalisierten Amplitude.
- ▶ Offset: Die Zeitabweichung zwischen Übergang und Nullpunkt auf der Zeitskala gemessen am Amplitudenlevel 0.5.
- ▶ Höhe, Tiefe: Maximale Amplitude der erzeugten steigenden oder fallenden Flanke.

Um Pulsformen zu erzeugen, werden Stützstellen am Anfang und Ende der Kurve fixiert, weitere Stützstellen dazwischen werden zufällig erzeugt. Um den Prozess der Stützstellenerzeugung zu kontrollieren, werden Felder definiert, in denen eine zufällige Koordinate pro Probe erzeugt wird. Dann werden durch die Stützstellen unter Einsatz von Matlab Polyfit-Kurven berechnet, wozu die

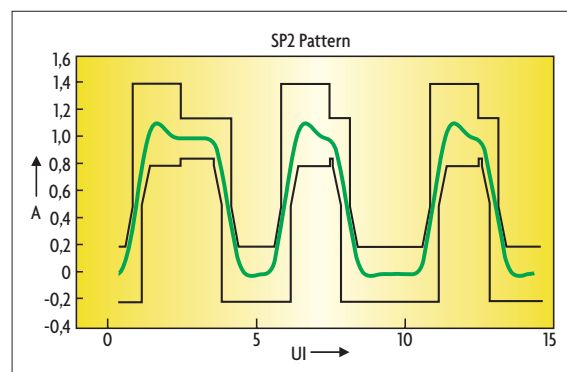


Bild 4. Erzeugtes SP2-Pattern.

1 an und enden mit dem Amplitudenlevel 0.

Die steigenden und fallenden Flanken werden durch vier Parameter beschrieben. Diese Parameter sind Flanke, Oberfläche, Offset und Tiefe für die fallende beziehungsweise Höhe für die steigende Flanke. Vor der Erzeugung einer Flanke lassen sich die minimalen und maximalen Werte dieser

grundlegende Polynom- und die Spline-Interpolation (Bild 3) genutzt wird. Die Zeitauflösung dafür wurde mit 30 Samples/UI gewählt. Nach einem Berechnungslauf wird die Pulsgestalt auf Übereinstimmung mit den spezifizierten SP2-Anforderungen und dem benutzerbestimmten Parameterbereich überprüft. Wenn alle Einschränkungen übereinstimmen, wird

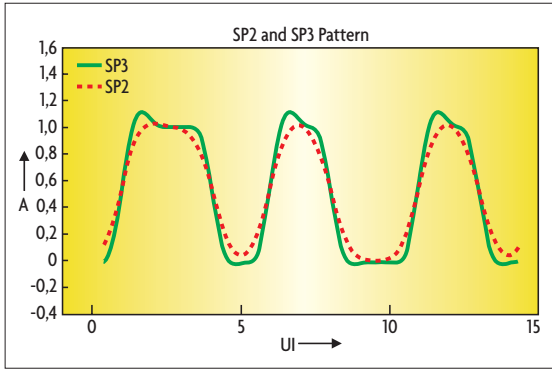


Bild 5. SP2- und SP3-Pattern.

die Pulsform akzeptiert, ansonsten durchläuft der Algorithmus bis zu 10 000 Probeläufe.

### ■ Kombination der ansteigenden und fallenden Flanken mit vorherbestimmtem Bit-Pattern

Um ein SP2-Pattern zu schaffen, werden Pulsfolgen von ansteigenden und fallenden Flanken aufeinander folgend verbunden. Die Signalform wird mittels einer Datei definiert, die eine binäre Datenfolge zur Verfügung stellt. Hierfür lassen sich MOST-Stress- sowie benutzerbestimmte Bit-Pattern verwenden. Das Bit-Pattern muss offset-frei und der Startpunkt muss dem Endpunkt gleich sein, um Dirac-Impulse während der FFT-Berechnung zu vermeiden. Für jedes SP2-Pattern (Bild 4) wird eine Pulsform von je ei-

ner steigenden und einer fallenden Flanke verwendet. Pulse des Signals, die größer als 2 UI sind, werden verbunden, indem die Lücken entweder mit „1“ oder „0“ zwischen den Flanken aufgefüllt werden.

Obwohl alle Bedingungen für SP2 erfüllt und zusätzlich definierten Bedingungen angepasst werden, könnte das resultierende Signal im Vergleich zu echten optischen im Netz verwendeten Sendern idealistisch sein. Zum Beispiel ist das Bandbreiten-Potential von optischen Sendern beschränkt – die berechneten Signale könnten jedoch diese natürliche Beschränkung leicht überschreiten. Trotz aller Anstrengungen, Worst-Case-Pattern gemäß der SP2-Spezifikation zu schaffen und unrealistische Pulsformen zu vermeiden, wird die letztendlich erzeugte Datenbank Szenarien enthalten, die manuell ausgeschlossen werden müssen.

### ■ Berechnung des SP3-Pattern

Eine Prognose für das Szenario am Faserausgang wird mittels des SP2-Pattern und der Übertragungseigenschaft der POF berechnet. Das erzeugte SP3-Pattern (Bild 5) lässt sich visualisieren und für die weitere Analyse verwenden. Ein Datensatz, der charakteristische Parameter für Eingangs- und Ausgangs-Parameter sowie die SP2-Flanken enthält, wird gespeichert.

Das erlaubt, SP3-Pattern zu vergleichen und auch mit einem beliebigen Bit-Pattern neu zu berechnen.

### ■ Simulation und Analyse

Das Simulationsprogramm kann mannigfaltige steigende und fallende Flanken auf einmal erzeugen. Danach werden verschiedene SP2-Pattern erzeugt, die alle Permutationen von steigenden und fallenden Flanken zusammen mit einem geladenen Bit-Pattern automatisch verwenden. Von diesem Satz von Eingangspattern lassen sich etwa 40 000 entsprechende SP3-Pattern durch einen modernen PC an einem Tag berechnen. Das führt bei Einsatz vieler PCs zur Berechnung von Millionen von verschiedenen SP3-Pattern innerhalb weniger Tage. Die resultierenden SP3-Pattern lassen sich nach der Simulation für die weitere Analyse und Visualisierung abspeichern.

Für die SP3-Pattern-Bewertung sind verschiedene Parameter definiert worden (siehe unten). Diese Parameter werden für jedes SP3-Pattern berechnet. Anschließend wird eine definierte Zahl von Worst-Cases für jeden Simulationslauf während der Simulation gespeichert. Kommt dabei eine verteilte Berechnung zum Einsatz, lassen sich die verschiedenen Simulationsergebnisse später automatisch zusammenführen.

- ▶ Flanken-Minimum: minimale Übergangszeit des SP3-Patterns.
- ▶ Flanken-Maximum: maximale Übergangszeit des SP3-Patterns.
- ▶ Delta-Flanke: beschreibt die maximale Degradierung in der Übergangszeit.
- ▶ Duty-Cycle: maximale Pulsbreite eines High- oder Low-Pulses des SP3-Pattern.
- ▶ Delta-Duty: beschreibt die maximale Änderung in der Pulsbreite.
- ▶ ISI Low: beschreibt die Amplituden-Abweichung des stationären Zustands der SP3-Pulsform B0.
- ▶ ISI High: beschreibt die Amplituden-Abweichung des stationären Zustands der SP3-Pulsform B1.

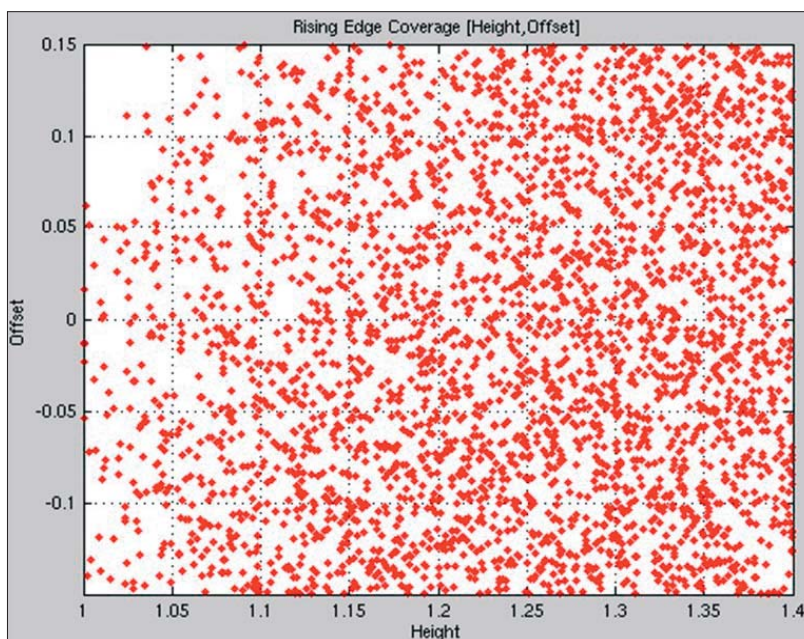


Bild 6. Kreuzüberdeckung der steigenden Flanken in Bezug auf Höhe und Offset.

Weil die Bestimmung des Worst-Case-Patterns analytisch nicht vorgenommen werden kann, müssen alle simulierten Signale in Bezug auf ihren

Überdeckungsbereich untersucht werden. Verschiedene Grafiken (z.B. Balkendiagramme) werden bereitgestellt, um den Überdeckungsbereich für die steigenden und die fallenden Flanken sowie für die Kreuzüberdeckung der verbundenen Flanken zu analysieren und zu visualisieren (Bild 6). Im Falle von Lücken bei der Überdeckung lassen sich zusätzliche Simulationsläufe mit begrenzten Erzeugungsparametern für Flanken durchführen, um die Überdeckung zu verbessern.

### ■ Ergebnisse

Die Simulation wurde für Worst-Case-POF-Bedingungen durchgeführt, um extreme Eingangsbedingungen für den optischen Empfänger zu finden. Die gewählte Grenzfrequenz repräsentiert die maximale spezifizizierte Faserlänge von 15 m und eine numerische Apertur von 0,5 für die Startbedingung am Fasereingang.

Anhand der Tiefpass-Charakteristik der POF ist die Degradierung in

den Übergangszeiten sichtbar. In Extremszenarien wurden große ISI beobachtet. Hier sind langsame Übergangszeiten die Grundursache für reduziertes Amplituden-Schwingen bei kurzen Pulsen, längere Pulse erreichen dagegen noch volle Amplituden-Ausschwünge. Diese Effekte können negativen Einfluss auf die Umwandlung im optischen Empfänger im Anschluss an die POF haben. Das Signal/Rausch-Verhältnis wird direkt durch ISI degradiert, zusätzlicher Jitter lässt sich in der optisch-elektrischen Umwandlung durch langsame Übergänge und ISI erzeugen. Ein direkter Einfluss auf das zeitliche Signalverhalten durch die Bandbreiten-Beschränkungen der POF wurde ebenfalls entdeckt. Die ausführlichen Ergebnisse der Simulation geben Hinweise auf die Degradationsmechanismen und Worst-Case-Szenarien. Sie liefern auch SP3-Testpattern, die für Tests von realen optischen Empfängern verwendet werden können.

*bg*



**Dipl.-Ing. Andreas Braun**

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Systementwurf in der Mikroelektronik (SiM) am FZI Forschungszentrum Informatik in Karlsruhe.



**Dipl.-Ing. Markus Becht**

ist bei Harman Becker Automotive Systems GmbH als Senior Engineer im Bereich Advanced Networking tätig.



**Dr. rer. nat. Oliver Bringmann**

ist Bereichsleiter im Forschungsbereich Intelligent Systems and Production Engineering am FZI Forschungszentrum Informatik in Karlsruhe.



**Prof. Dr. Wolfgang Rosenstiel**

ist Professor am Wilhelm-Schickard-Institut der Universität Tübingen und Direktor am FZI Forschungszentrum Informatik in Karlsruhe.