

Vorverzerrung und Entzerrung

Zwei wichtige Werkzeuge für eine zuverlässige serielle Datenübertragung verstehen

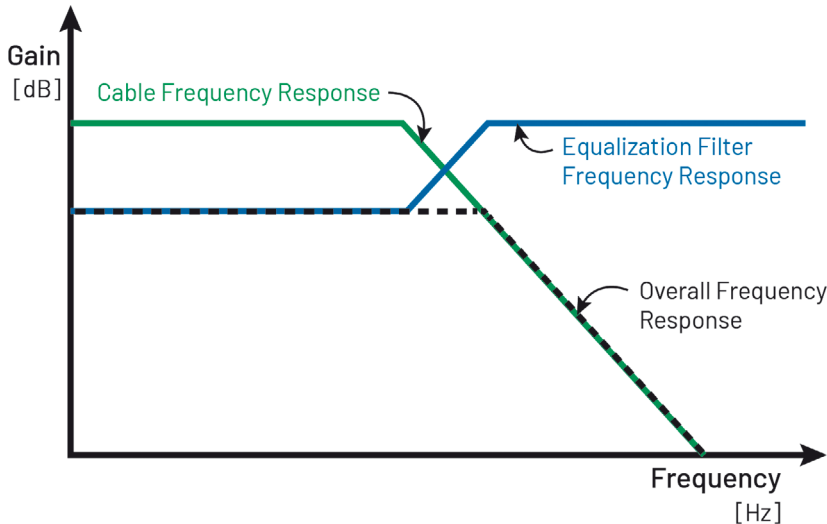


Bild 1: Beispiel für Entzerrung im Frequenzbereich

Seit den Anfängen der seriellen leitungsgebundenen Kommunikation in den 1980er Jahren mussten Entwickler eine grundlegende technische Herausforderung meistern: Übertragungskanäle, die Signale systembedingt dämpfen und verfälschen. Reale Kabel sind nicht perfekt; sie dämpfen hochfrequente Signalanteile, verursachen Verzerrungen und können über lange Strecken die Übertragung von Daten erheblich verlangsamen oder beeinträchtigen.

Während Fehlerkorrekturverfahren wie beispielsweise CRC (Cyclic Redundancy Check) helfen können, fehlerhafte Daten nachträglich zu rekonstruieren, besteht ein wirkungsvollerer Ansatz darin, die Ursache statt ausschließlich Symptome zu behandeln. Genau hier setzen Vorverzerrung und Entzerrung an. Obwohl beide Maßnahmen dasselbe Problem adressieren, setzen sie an beiden Enden der Kommunikationsstrecke an und gehen mit unterschiedlichen Kompromissen einher. Das Verständnis der Funktionsweise beider Verfahren und ihrer jeweiligen Einsatzbereiche bildet eine wesentliche Grundlage für die Entwicklung zuverlässiger Hochgeschwindigkeitssysteme.

Entzerrung: Signale am Empfänger korrigieren

Entzerrung ist ein empfängerseitiges Verfahren, das darauf abzielt, durch Kabel verursachte Verzerrungen zu kompensieren. Das Prinzip ist einfach. Wenn der Übertragungskanal sich wie ein Tiefpassfilter verhält, setzt man am Empfänger einen komplementären Hochpassfilter ein, um die ursprüngliche Wellenform wiederherzustellen. Im Idealfall kompensieren sich beide Effekte vollständig, sodass das ursprüngliche Signal weitgehend rekonstruiert wird.

In der Praxis muss das Verhalten des Übertragungskanals jedoch bekannt sein oder abgeschätzt werden. Zu diesem Zweck senden Systeme vor den eigentlichen Daten häufig eine bekannte Präambel. Aus der Verzerrung der Präambel schätzt der Empfänger die Kanalantwort und passt den Entzerrungsfilter entsprechend an. Obwohl dieses Verfahren die Bitfehlerquote deutlich verbessert, hängt es stark von den bekannten Eigenschaften des Übertragungskanals (Kabellänge, Datenrate und Netzwerktopologie) ab, und eine Neukalibrierung kann erforderlich sein, wenn sich einer dieser Parameter ändert. Bild 1 zeigt ein Beispiel für Entzerrung im Frequenzbereich.

Vorverzerrung: Das Signal vor der Übertragung vorbereiten

Die Vorverzerrung adressiert dieselbe grundlegende Problematik, erfolgt jedoch auf der Senderseite. Da Kabel hohe Frequenzanteile am stärksten dämpfen, werden diese durch die Vorverzerrung gezielt angehoben, bevor das Signal in die Leitung eingespeist wird. Während sich das Signal ausbreitet, dämpft der Übertra-

gungskanal die angehobenen Frequenzanteile systembedingt, sodass sie beim Eintreffen am Empfänger wieder in etwa ihren ursprünglichen Pegel erreichen.

Diese Technik korrigiert das Signal bereits vor der Übertragung und verringert dadurch dessen Empfindlichkeit gegenüber dem Tiefpassverhalten realer Übertragungsleitungen. Im Gegensatz zur Entzerrung erfordert die Vorverzerrung keine digitale Signalverarbeitung und lässt sich leicht an unterschiedliche Datenraten und Netzwerktopologien anpassen. Bild 2 zeigt die Vorverzerrungsfilterung im Zeitbereich.

Welche Methode sollte man verwenden?

Im Idealfall nutzt ein System beide Verfahren, die sich gegenseitig ergänzen, damit das Übertragungssystem auch unter realen Bedingungen zuverlässig arbeitet: Die Vorverzerrung erhält die Signalintegrität über den Übertragungskanal hinweg, während die Entzerrung verbleibende Verzerrungen am Empfänger korrigiert. Aber in kostensensiblen Systemen wie RS-485-Netzwerken (insbesondere in Multidrop-Topologien oder bei Installationen mit variablen Kabellängen und Datenraten müssen Entwickler häufig eines der beiden Verfahren auswählen.

Unterschiede

Der folgende Vergleich zeigt die Unterschiede:

Flexibilität der Datenrate

- Vorverzerrung: Unterstützt beliebige Datenraten mit demselben Transceiver ohne Anpassungen am Vorverzerrungstreiber.
- Entzerrung: Muss für eine spezifische Datenrate ausgelegt sein. Derselbe Filter ist nicht für zwei unterschiedliche Datenraten verwendbar.

Netzwerktopologie

- Vorverzerrung: Unterstützt Punkt-zu-Punkt- und Multidrop-Netzwerke.
- Entzerrung: Arbeitet gut in Punkt-zu-Punkt-Netzwerken; in Multidrop-Netzwerken ist die Kalibrierung schwierig, da die Abstände zwischen den Knoten variieren können.

Variabilität der Kabellänge

Vorverzerrung: Die Kabellänge kann innerhalb eines bestimmten Bereichs beliebig gewählt werden. Größere Kabellängen lassen sich durch Herabsetzen der Datenrate kompensieren.

- Entzerrung: Muss im Voraus bekannt sein, oder der Filter muss kalibriert werden. Ändert sich das Kabel, muss der Filter neu kalibriert werden.

Autor:
Bryson Barney
Analog Devices
www.analog.com

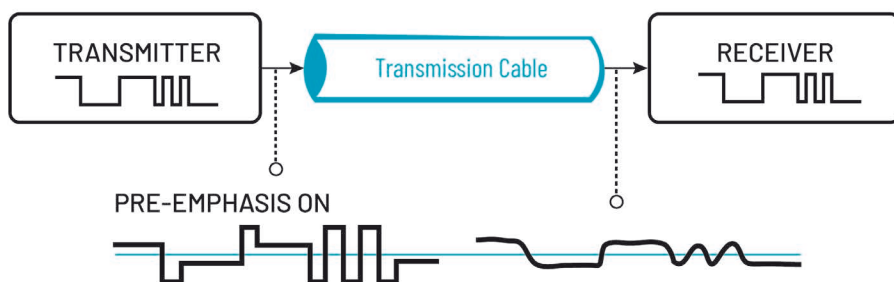


Bild 2: Vorverzerrungsfilterung im Zeitbereich

Verarbeitungsanforderungen

- Vorverzerrung: Die Vorverzerrung erfolgt über den analogen Treiber des Transceivers und nicht mittels digitaler Signalverarbeitung.
- Entzerrung: Obwohl Entzerrung auch mit analoger Schaltungstechnik möglich ist,

wird sie üblicherweise durch einen digitalen Filter realisiert. Dadurch benötigt der Empfänger einen schnellen A/D-Wandler sowie in komplexeren Systemen einen adaptiven digitalen Filter.

Kosten:

- Vorverzerrung: Kostengünstiger

- Entzerrung: Höhere Kosten durch digitale Signalverarbeitung.

Fazit

Bei fest definierten Systemparametern wie Kabelcharakteristik, Datenrate und Topologie ist Entzerrung eine leistungsstarke und kosteneffiziente Optimierung. Wenn das System jedoch flexibel bleiben oder unter wechselnden Bedingungen betrieben werden muss, ist die Vorverzerrung die robustere und kostengünstigere Wahl.

Bei industriellen Schnittstellen wie RS-485 führen Kostenaspekte und Flexibilität der Topologie häufig dazu, dass die Vorverzerrung die praktikablere Lösung darstellt. Von Analog Devices gibt es sehr schnelle RS-485-Transceiver mit integrierter Vorverzerrung, wie beispielsweise den MAX22500E. Das Bauteil unterstützt Datenraten von bis zu 100 Mbit/s und eignet sich damit ideal für leistungsfähige industrielle Netzwerke.

Die zehn wichtigsten Fakten zu RS-485



Zusammenfassung zur RS-485-Schnittstelle

Der Schnittstellenstandard RS-485 zählt nach wie vor zu den weit verbreiteten Standards der industriellen Kommunikation. Seine Einfachheit, Robustheit und Skalierbarkeit prädestinieren ihn für den Einsatz in Multidrop-Netzwerken in Fabriken, Gebäuden und Infrastruktursystemen. Nachfolgend werden die zehn wichtigsten Designaspekte für RS-485 zusammengefasst:

1. RS-485 – Entwickelt für lange Übertragungstrecken und raue Umgebungen

Feldbusprotokolle und ihre physikalischen Schichten sind speziell für die Kommunikation über große Entfernungen in elektrisch störbehafteten Umgebungen ausgelegt. RS-485 und CAN nutzen beide die differenzielle Signalübertragung,

Autoren:
Bryson Barney
Christopher Nunes
Analog Devices
www.analog.com

bei der Daten über die Spannungsdifferenz zwischen zwei Leitungen und nicht durch eine gegen Masse bezogene Spannung dargestellt werden. Bei RS-485 werden die logischen Pegel durch die Spannungsdifferenz zwischen den Leitungen A und B bestimmt. Da der Empfänger ausschließlich die Spannungsdifferenz zwischen den beiden Leitungen erfasst, ist das System unempfindlich gegenüber Massepotenzialunterschieden, wie sie bei großen Leitungsstrecken auftreten. Das macht RS-485 ideal für industrielle Anwendungen, bei denen Störsicherheit unverzichtbar ist.

2. Differenzielle Signalübertragung ermöglicht Multidrop-Netzwerke

Eine der größten Stärken von RS-485 ist die Fähigkeit, Multidrop-Kommunikation zu unterstützen, wodurch mehrere Knoten denselben Bus gemeinsam nutzen können. Dies ermöglicht skalierbare Netzwerke ohne übermäßigen Verkabelungsaufwand. Obwohl RS-485 und CAN beide die differenzielle Signalübertragung verwenden, interpretieren sie logische Pegel unterschiedlich.

Bei RS-485 wird der logische Zustand bestimmt, indem ausgewertet wird, welche Leitung das höhere Potenzial hat. CAN hingegen prüft, ob CANH und CANL auseinandergetrieben werden oder auf ähnlichem Potenzial liegen. Die zentrale Erkenntnis ist, dass die differentielle Signalübertragung den Empfänger auf die Spannungsdifferenz zwischen den Leitungen statt auf deren absolute Spannungen fokussiert und dadurch größere Reichweiten sowie eine höhere Störsicherheit ermöglicht.

3. Integrierter Fehlerschutz hält Systeme betriebsfähig

In der Praxis kann vieles schiefgehen. So können Leiterplattenfehler, Lötbrücken, Fehlerdrahtungen, Spannungsspitzen, gequetschte Kabel und beschädigte Kabelummantelungen einen ungeschützten Transceiver sofort beim Einschalten der Stromversorgung zerstören.

RS-485-Transceiver mit integrierter Fehlererkennung und Überspannungsschutz verbessern die Ausfallsicherheit des Systems erheblich. Sind die Schutzfunktionen direkt im IC integriert, verringern sich sowohl der Platzbedarf als auch die Bauteilekosten (BOM). Sobald die Störung behoben ist, kann sich das System ohne Austausch von Hardware wieder erholen.

4. Erweiterter Gleichtaktbereich – wichtiger, als man denkt

Der RS-485-Standard spezifiziert einen Gleichtaktbereich von -7 bis +12 V. In realen industriellen Umgebungen wird dieser Bereich jedoch

oft überschritten. Motoren, induktive Lasten und Schaltnetzteile können die Gleichtaktspannung weit außerhalb der Nennwerte treiben. Transceiver mit erweitertem Gleichtaktbereich ermöglichen eine störungsfreie Kommunikation, selbst wenn externe Störungen die Gleichtaktspannung aus dem normalen Betriebsbereich bringen.

5. Isolierung schützt Menschen und Geräte

Isolierte RS-485-Transceiver bieten eine wichtige Schutzebene, indem sie die Logikseite des ICs von der Busseite galvanisch trennen. Daten werden über interne Transformatoren oder Kondensatoren über die Isolationsbarriere übertragen, während hochenergetische Transienten blockiert werden. Galvanische Isolation schützt nicht nur empfindliche Bauteile und Endanwender, sondern unterbricht auch Masseschleifen und erlaubt größere Abstände zwischen den Netzwerkteilnehmern bei gleich bleibender Signalintegrität.

6. Große Empfänger-Hysterese verringert „Data Chatter“

In jedem Kommunikationssystem treten unvermeidlich Störungen auf. Abschirmung und Filterung helfen, Störungen zu verringern. Eine der ersten wirksamen Schutzmaßnahmen ist jedoch eine große Eingangshysterese im Empfänger. Transceiver mit großen Hysterese-Fenstern (z. B. 250 mV) sind deutlich unempfindlicher gegenüber Störungen und schalten dadurch seltener ungewollt um. Dies reduziert „Data Chatter“ erheblich und verbessert die Bitfehlerraten, wodurch die Hysterese zu einem wirkungsvollen, oft übersehenen Designelement wird.

7. Gehäuseintegration beeinflusst Kosten und Leiterplattenfläche

Bei Designs mit Isolation spielt die Wahl des Gehäuses eine wichtige Rolle. Gängige Optionen sind ein digitaler Isolator mit integriertem Feldbus-Transceiver oder eine vollständig integrierte Lösung, die zusätzlich einen internen DC/DC-Wandler enthält. Eine höhere Integrationsdichte führt typischerweise zu erheblichen Einsparungen bei der Leiterplattenfläche und vereinfacht das Power-Design. Entwickler, die die Kompromisse zwischen Gehäuseoptionen früh im Design verstehen, profitieren im weiteren Verlauf der Entwicklung.

8. Spannungsdomänenstrategie bestimmt Systemstabilität

Bei Systemen mit mehreren isolierten Bussen ist die Struktur der Spannungsdomänen sorgfältig zu beachten. Ein gemeinsam genutzter

isolierter Bereich ist der einfachste Ansatz: Er trennt die Logik- und Busseite, ermöglicht jedoch eine Einkopplung von Störungen zwischen den Bussen. Mehrere isolierte Domänen bieten die höchste Störfestigkeit, da sie sicherstellen, dass sich Fehler oder Transienten auf einem Bus nicht auf andere Busse ausbreiten. Die richtige Wahl hängt von der Systemkomplexität und der Risikobereitschaft ab.

9. Stromversorgung über Datenleitungen verringert Systemkosten

Konzepte wie Home Bus, PD-Link und SPoE ermöglichen die Energieversorgung über bestehende Datenleitungen. Dadurch verringern sie die Anzahl der Kabel sowie die Kosten für Steckverbinder. In der Vergangenheit erforderte Power-over-Data spezielle Kodierungsverfahren, um die DC-Balance zu erhalten.

Neue Ansätze von Analog Devices eliminieren diese Anforderung und ermöglichen eine Energieübertragung ohne Änderungen am Protokoll oder zusätzlichen Softwareaufwand. Power-over-Data spart nicht nur Kosten, sondern ermöglicht auch flexiblere Kabelbäume in Anwendungen mit sich bewegenden Systemteilen.

10. Robuste Kommunikation erfordert eine ganze Toolbox, nicht eine einzelne Lösung

Es gibt keine einzelne Lösung, die eine perfekte Zuverlässigkeit der Kommunikation gewährleistet. Um niedrige Bitfehlerraten zu erreichen, ist eine Kombination verschiedener Maßnahmen erforderlich: Abschirmung, Optimierung der Datenrate, Leitungskodierung, Fehlerkorrektur, erweiterter Gleichtaktbereich, große Hysterese und Isolation. Jedes Design ist ein Kompromiss zwischen Kosten und Leistungsfähigkeit. Mit modernen integrierten RS-485-basierten Lösungen lassen sich Kommunikationssystemen mit hoher Störfestigkeit zum angemessenen Preis einfacher denn je entwickeln.

Bonus: RS-485 auf 100Mbit/s ausreizen

Fortgeschrittene Verfahren wie Vorverzerrung und Entzerrung ermöglichen es RS-485, Datenraten von bis zu nahezu 100 Mbit/s zu erreichen. Die Vorverzerrung ist besonders attraktiv, da sie keine detaillierten Kenntnisse über Kabellänge oder Datenrate erfordert. Bauteile wie der MAX22502 zeigen, wie weit sich die Leistungsfähigkeit von RS-485 mit moderner Halbleitertechnologie steigern lässt. ◀