

Technical White Paper

車載用ケーブル・チャンネル上の ネイティブ PCIe インターコネクタの実装



概要

PCIe® (Peripheral Component Interconnect Express) は、次世代分散型車載アーキテクチャが求める重要な高帯域および超低レイテンシ・コンピューティングの要求に対応するソリューションとして自動車業界で好評を博し続けていますが、その幅広い採用には課題が残っています。このインターフェイス規格を車載用プロセッサが共有処理のために最大限に活用するには、ECU (電子制御ユニット) 内インターフェイスから ECU 間インターフェイスに PCIe を変換するための車載用ケーブル相互接続を定義する必要があります。車載用ケーブルおよびコネクタの組み合わせとして本書で定義している車載用ケーブル・チャンネル上でネイティブ PCIe を実現するには、物理的相互接続について慎重に検討する必要があります。主要な自動車産業ベンダーとして TI、Rosenberger 社、GG Group 社は、このインターフェイス規格の自動車内での信頼性の高い実装を可能にし、採用の標準化を推進するため、車載用ケーブル・チャンネル向け PCIe 仕様案を策定しました。このホワイト・ペーパーでは、仕様案の重要な側面の概要を説明し、ケーブル・チャンネル上の PCIe の定義に関連する主な考慮事項と課題について説明します。

目次

1 はじめに – 自動車産業における ADAS と車両コネクティビティの動向.....	2
2 車載用ケーブル・チャンネル上での PCIe の実現.....	3
2.1 PCIe 技術に関する主な考慮事項.....	3
2.2 チャンネル仕様に関する主な考慮事項.....	3
2.3 車載用ケーブルに関する主な考慮事項.....	4
2.4 コネクタとアセンブリに関する主な考慮事項.....	5
2.5 シグナル・コンディショニングに関する主な考慮事項.....	6
3 まとめ.....	8
4 主な貢献者.....	8

図の一覧

図 1-1. ドメイン・アーキテクチャとゾーン・アーキテクチャの比較.....	2
図 2-1. GG 2Speed® 251 STP ケーブルの構造断面図.....	4
図 2-2. GG 2Speed® 251 – 挿入損失と車載用 PCIe 3.0 未加工ケーブル制限値案.....	5
図 2-3. ケーブル・アセンブリ / PCB ヘッダー付き H-MTD® 製品ファミリの代表例.....	5
図 2-4. ケーブル・アセンブリ両端の H-MTD® コネクタの反射損失 (ゲート掃引).....	6
図 2-5. PCIe 車載用ケーブル・アプリケーションでのシグナル・コンディショニングの対象使用事例.....	7

表の一覧

表 2-1. 車載用 PCIe 3.0 ケーブル・チャンネルの制限値案.....	4
表 2-2. リニア・リドライバとリタイマの比較.....	6

商標

PCIe® is a registered trademark of Texas Instruments.

GG 2Speed® is a registered trademark of GG Group.

H-MTD® and HFM® are registered trademarks of Rosenberger Hochfrequenztechnik GmbH & Co. KG.

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

1 はじめに – 自動車産業における ADAS と車両コネクティビティの動向

OEM (Original Equipment Manufacturers) と Tier-1 サプライヤは、先進運転支援システム (ADAS) と車両コネクティビティの技術的進歩に対応する準備をしながら、車載データ・バックボーン・アーキテクチャを見直しています。将来の車載用データ・バックボーンは、ドメイン (ADAS ドメインなど) に基づいて実装される処理能力に依存するよりはむしろ、ドメイン・アーキテクチャからゾーン・アーキテクチャに移行しつつあります。ゾーン・アーキテクチャは、ローカル・コンピューティング・ノード (ゾーン・コントローラ) を内蔵して ECU (電子制御ユニット) と接続することで実現され、それぞれのドメインに関係なくゾーン内の位置に基づいて相互作用します。次にこれらのゾーン・コントローラは、データを適切に処理するパワフルな中央演算ノードに接続します。

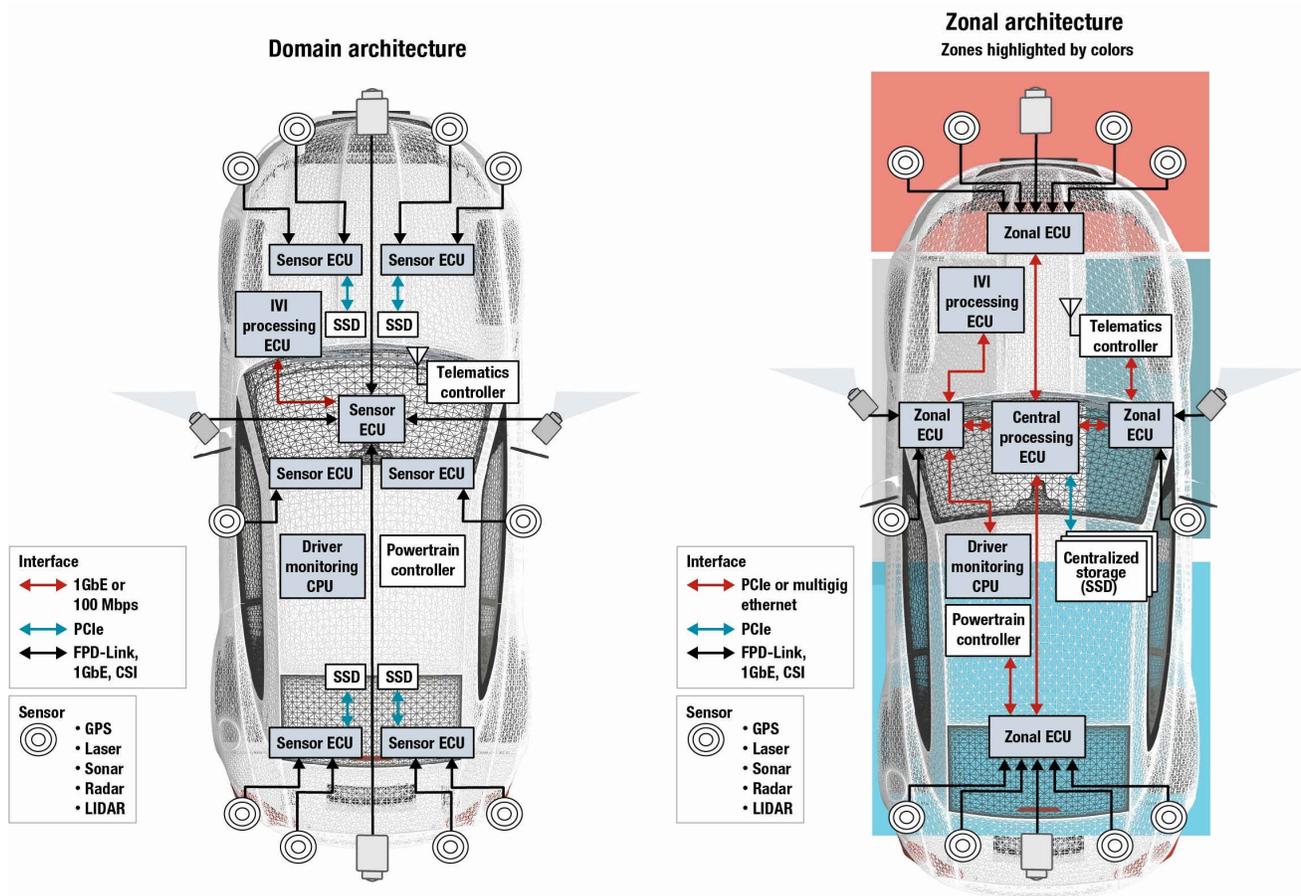


図 1-1. ドメイン・アーキテクチャとゾーン・アーキテクチャの比較

車載用データ・バックボーンは、ゾーン・アーキテクチャで分散処理を実現するため、高帯域と低レイテンシをサポートする高速インターフェイスを採用する必要があります。特にセキュリティ・クリティカルなリアルタイム処理に共有データが使われる場合、超低レイテンシを慎重に検討する必要があります。PCIe (Peripheral Component Interconnect Express) のエコシステムは、産業用データ・センター向けにこの種の高帯域および超低レイテンシ性能の要求にすでに対応しており、同じ方法で自動車業界に貢献するための能力を備えています。

2 車載用ケーブル・チャンネル上での PCIe の実現

車載用チャンネル上で PCIe を実現するには、物理的な相互接続全体を注意深く検討する必要があります。エンド・ツー・エンド・チャンネル (TX から RX へのリンク) 全体には、車載用ケーブル・チャンネルの両端の 2 つの PCB チャンネルが含まれます。PCB チャンネルには、TX/RX PHY から対応する PCB ヘッドまでの部分が含まれます。車載用ケーブル・チャンネルは 1 つのケーブル・アセンブリ (2 つのアセンブリ済みコネクタ付きのバルク・ケーブルなど) または複数のケーブル・アセンブリで構成されます。複数のケーブル・アセンブリによる構成の場合、ケーブル・チャンネルにはインライン接続が含まれます。ケーブル・チャンネルの長さの限界は、必要な帯域幅のチャンネル・リミットに応じた挿入および反射損失などの高速特性によって決定されます。

この技術ホワイト・ペーパーでは、特に車載用ケーブル・チャンネル上でネイティブ PCIe を実装する際の課題と考慮事項について説明します。

2.1 PCIe 技術に関する主な考慮事項

ケーブル・チャンネル・ソリューションの共通化とケーブル・コストおよび重量の最小化に対する OEM の要求に対応しながらネイティブ PCIe コネクティブリティの利点を維持するには、複数の得失評価が必要です。

1. **他の高速インターフェイスと類似のケーブル・チャンネル・タイプを維持:** PCIe 用のケーブル・アセンブリ・ソリューションは、2.5/5/10GBASE-T1 イーサネットなど、その他の高速インターフェイス技術とできるだけ類似のものにする必要があります。こうすることで OEM 各社は、車両全体の各種高速インターフェイスに対して 1 組のコネクタ・インターフェイスとケーブル・タイプのみを評価すれば済みます。
2. **必須な PCIe 信号のみを接続:** 車載用ケーブルでは、ケーブル数と重量を低減するため、必須な高速インバンド PCIe 信号のみを接続する必要があります。ローカル PCB 上の低速のサイドバンド信号は、未接続のままにしておくことができます。EMI 共振のリスクを低減するため、100MHz の PCIe リファレンス・クロックをケーブル相互接続から除くこともできます。PCIe 仕様は、ケーブル両側の独立したクロックに対応する SRNS (Separate Reference Non-Spread) と SRIS (Separate Reference Independent Spread) をサポートしています。
3. **ケーブル本数を増やしてネイティブ PCIe 性能を向上:** ネイティブ PCIe 伝送には、専用の TX チャンネルと RX チャンネルが必要です。その結果、レーンごとに 2 本の STP ケーブル (レーンごとに 1 本の TX と 1 本の RX) が必要となるため、1 本のケーブルを使うその他の高速インターフェイス (Multigig イーサネットなど) に対してケーブル本数が増えます。このケーブル本数のトレードオフは、エコシステム全体を活用しながらケーブルのネイティブ PCIe 性能と非独自仕様の PHY インターフェイスの両方を維持するという価値に伴うものであることに注意することが重要です。
4. **類似 PHY 層の維持の要件:** ネイティブ PCIe は、専用の TX および RX 方向を持つ NRZ 信号方式を実装しており、EMC 要件を満たす性能を持っています。NRZ 信号方式は、PAM-4 または PAM-16 変調方式よりも垂直方向のアイ・マージンを拡大できます。専用の TX および RX チャンネルを備えているため、ノイズおよびエコー・キャンセレーションに複雑な DSP が必要な場合に全二重双方向信号インターフェイスをサポートする際にも、別の車載用 PCIe PHY を実装する必要はありません。

2.2 チャンネル仕様に関する主な考慮事項

数百万台の車両で信頼性の高い接続を実現するためには、車両間のリンクの PHY の高速要件を決定し、車両内のケーブルとコネクタの性能を揃えることが重要です。そのため、高速チャンネル・パラメータをリミットに対してテストするためにチャンネル仕様が必要です。高速チャンネル仕様は、ケーブルと PCB チャンネルの要件を S パラメータに基づいて記述したものです。

主要なパラメータは必要な周波数帯域幅、挿入および反射損失です。EMC の挙動を考慮するには、遮蔽および結合減衰を規定すると便利です。さらに、さまざまな結果を比較するには、測定の設定と手順の詳細な説明が必要です。

TI、GG Group 社、Rosenberger 社は車載用 PCIe チャンネル仕様案、測定設定および手順の説明を準備するために提携しています。これは、車載用途のための公式 PCI-SIG 標準化案の将来的基盤の役割を果たし得るものです。表 2-1 の主な要件は、車載用 PCIe 3.0 ケーブル・チャンネルのリミットとして提案されています。

表 2-1. 車載用 PCIe 3.0 ケーブル・チャネルの制限値案

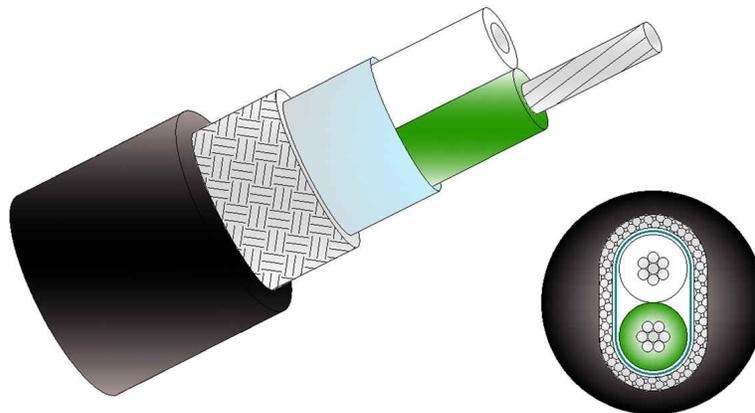
パラメータ / 指標	制限値案
帯域幅	4.4GHz ⁽¹⁾
挿入損失バジェット	26.4dB (4GHz 時)
反射損失バジェット	6dB (4GHz 時)
遮蔽 / 結合減衰	45dB / 55.5dB (4GHz 時)

(1) ケーブル・チャネルは、温度、経年劣化、製造プロセスに対する安全マージンとして最大伝送レートのナイキスト周波数に対して 10% 以上余裕を持ってサックアウト、ディップ、ノッチがない挿入損失特性を示す必要があります。

2.3 車載用ケーブルに関する主な考慮事項

車載用ケーブルは、通常の室温環境で性能要求を満たすだけでは不十分です。車載認定では、ケーブル性能の安定性を評価するため、高温での 3,000 時間の長期エージングなど各種の劣化試験が必要です。すべての劣化試験の後、あらかじめ定義された重要な高周波数の制限値が守られている必要があります。インターフェイスの性能要件を満たすには、ツイスト長、コアの誘電率、絶縁材の選択など、各種のケーブル設計パラメータも考慮する必要があります。

GG Group 社は、ギガビット速度での同軸および差動アプリケーション向けに多くの高品質車載用ケーブルを提供しています。PCIe 3.0 に適した車載用ケーブルを説明するため、GG 2Speed[®] 251 STP ケーブル (GG Group 社が設計および製造) を検討します。このケーブルのシールドは、2 本のより線コアの周りを包むアルミ / プラスチック箔で構成されます (図 2-1 を参照)。追加のシールドとして銅線編組がそれを包んでおり、最大 4.4GHz の要求 EMC 性能 (遮蔽および結合減衰量) を満たすのに役立っています。


図 2-1. GG 2Speed[®] 251 STP ケーブルの構造断面図

GG 2Speed[®] 251 STP は、最大 5GHz までサックアウトが発生せず、ケーブルの構造に起因して約 5.2GHz でノッチを示します。このノッチは主に、白と緑の電線のより合わせのピッチの影響です。また GG 2Speed[®] 251 STP ケーブルは、車載用 PCIe 3.0 未加工ケーブル制限値案の式に対して優れた性能も示しています (式 1、図 2-2 を参照)。

$$IL [dB/10m] = - (0.69f^{0.45} + 0.0027f) / 15 \quad (1)$$

ここで

- f = 最大 4400MHz の周波数 (MHz)

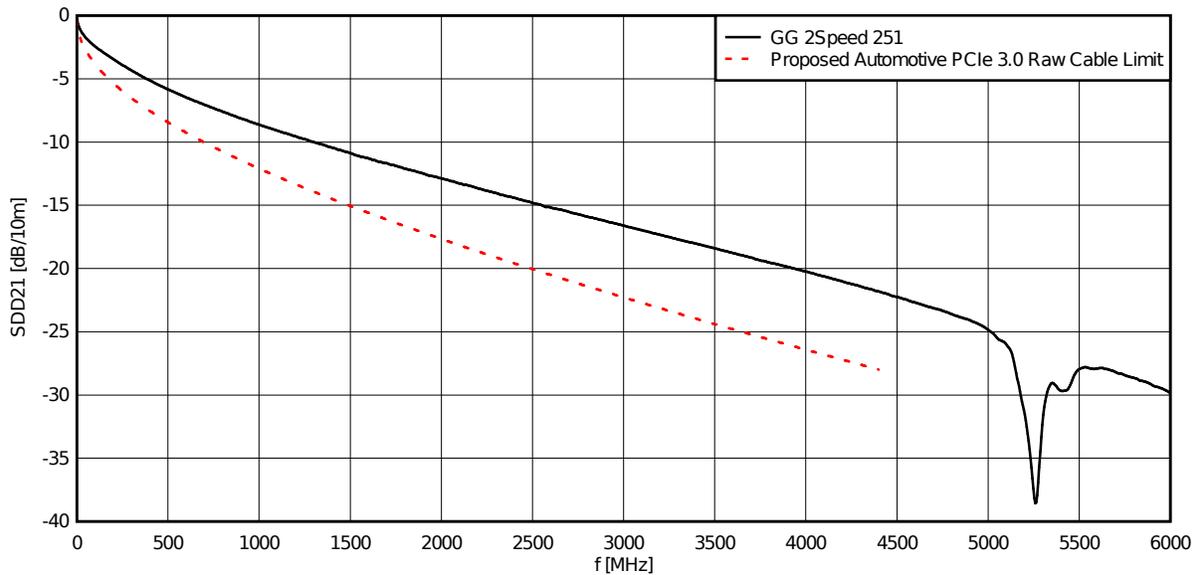


図 2-2. GG 2Speed® 251 – 挿入損失と車載用 PCIe 3.0 未加工ケーブル制限値案

GG 2Speed® 251 よりも高い周波数に対応するケーブルも開発中であり、GG 2Speed® 製品ファミリの拡大に貢献する予定です。たとえば GG 2Speed® 256 の最初の試作品は、リニアな挿入損失特性を示す最大 10GHz の帯域幅で PCIe 4.0 の高周波数の要求を満たしています。

2.4 コネクタとアセンブリに関する主な考慮事項

チャンネル要件を満たすため、Rosenberger 社は 2 種類の高速コネクタ (差動信号伝送用の H-MTD®、同軸伝送用の HFM®) を提供しています。最も良好な遮蔽減衰特性を実現するため、どちらのシステムも 360° のシールドを備えることでバルク・ケーブルの優れたシールド特性を維持しています。



図 2-3. ケーブル・アセンブリ / PCB ヘッダー付き H-MTD® 製品ファミリの代表例

反射損失 (RL) はほとんどコネクタで決まるため、H-MTD® と HFM® のインピーダンスはそれぞれ 100Ω と 50Ω の基準インピーダンスと正確に一致しています。図 2-4 に、ケーブル・アセンブリの両端の H-MTD® コネクタの対応する RL (ゲート掃引) を示します。

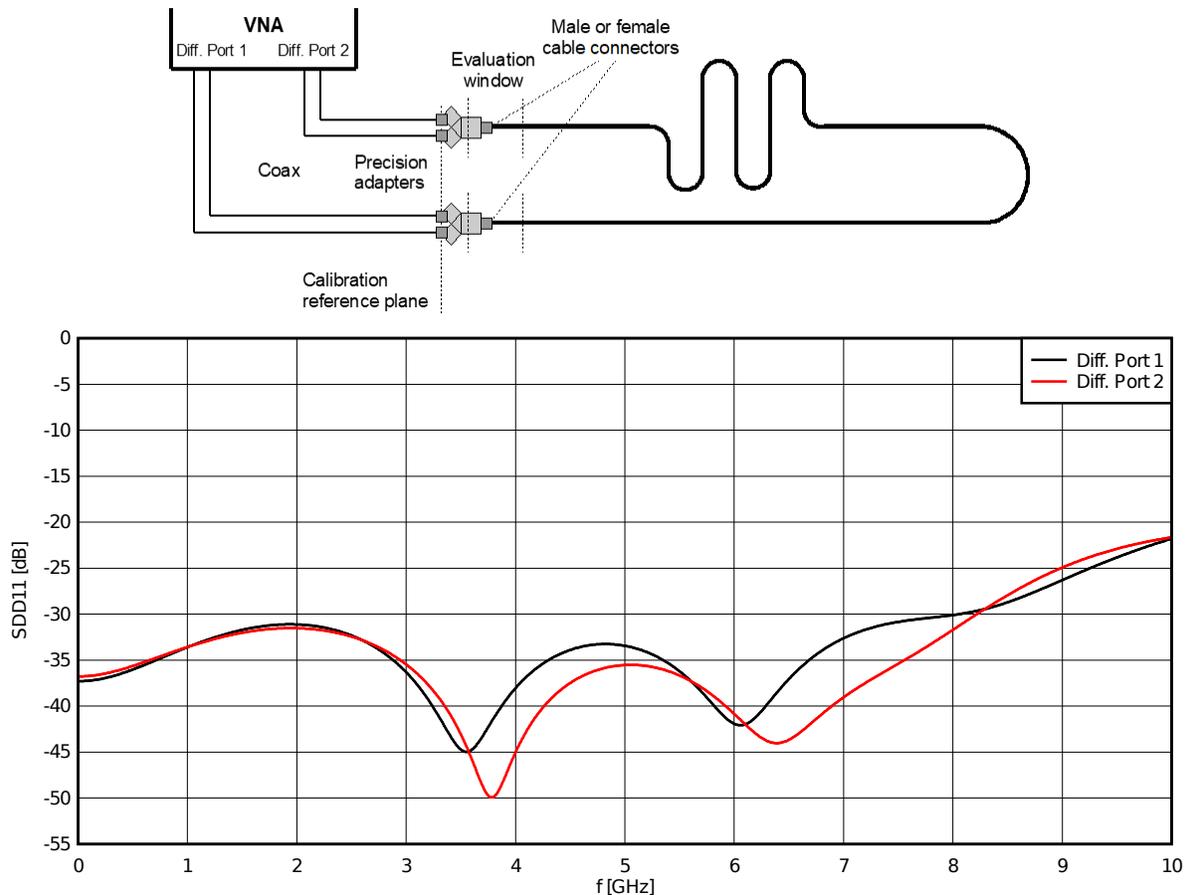


図 2-4. ケーブル・アセンブリ両端の H-MTD[®] コネクタの反射損失 (ゲート掃引)

Rosenberger 社製 H-MTD[®] ケーブル・アセンブリには、新しい GG 2Speed[®] 251 ケーブル配線ソリューションが標準で採用されています。この組み合わせは、100/1000BASE-T1 イーサネット、2/5/10GBASE-T1 イーサネット、FPD-Link、その他の次世代 SerDes をすでに含む幅広いプロトコルに対応しています。この多用途性のため、GG 2Speed[®] 251 ケーブルと H-MTD[®] コネクタ・システムは将来の車載用 PCIe システムにもすぐに使用できます。

2.5 シグナル・コンディショニングに関する主な考慮事項

リドライバとリタイマは、損失が大きいメディアで PCIe を伝送する際に自然に発生する挿入損失の増加と信号対雑音比の劣化を回復および緩和するために必要です。リドライバとリタイマのどちらにも、PCIe エコシステムに深く根差した歴史があります。リドライバは、PCIe 2.0 以来、PCI-SIG インテグレート承認部品リストの一部でした。一方でリタイマは、PCIe 4.0 以来、正式に PCIe 基本仕様の一部分になっています。シグナル・コンディショニング技術における半導体のリーダーとして TI は、産業および車載用の多くの使用事例に対応するため、PCIe リドライバ、リタイマ、受動スイッチの業界最大のポートフォリオを提供しています。

表 2-2. リニア・リドライバとリタイマの比較

PCIe リニア・リドライバ ⁽¹⁾	PCIe リタイマ
低消費電力ソリューション (ヒートシンク不要)	消費電力が大きいソリューション (ほとんどの場合、ヒートシンクが必要)
非常に短いレイテンシ (100ps)	中程度のレイテンシ (PCIe 4.0 仕様要件に基づいて 64ns 以下)
リンク・トレーニングには参加しないが、ルート・コンプレックス (CPU) とエンドポイント (EP) の間の調停に対して透過的 (プロトコルに依存しない)	ルート・コンプレックス (CPU)、エンドポイント (EP) とのリンク・トレーニングに完全に参加 (プロトコルを認識)
100MHz のリファレンス・クロックは不要	100MHz のリファレンス・クロックが必要
挿入損失の改善に寄与	挿入損失、ジッタ、クロストーク、反射、レーン間スキューの改善に寄与
イコライザ回路として通常 CTLE を使用	イコライザ回路として通常 CTLE、DFE、トランスミッタ FIR を使用

表 2-2. リニア・リドライバとリタイマの比較 (continued)

PCIe リニア・リドライバ ⁽¹⁾	PCIe リタイマ
総ソリューション・コスト: X	総ソリューション・コスト: 1.3X~1.5X

(1) 比較の詳細については、技術記事「Signal Conditioning functions go mainstream in PCI Express Gen 4」を参照してください。

ECU 内アプリケーションとケーブル長が短いアプリケーションにはリニア・リドライバが適しています。ネイティブ PCIe 3.0 伝送では、TI のリドライバは、Rosenberger 社 H-MTD[®] コネクタ・システムで GG 2Speed[®] 251 STP ケーブルを使用した最大 5m のアプリケーションを対象にしています。

ケーブル長が長いアプリケーションでは、信号マージンを最大限に拡大するためにリタイマが不可欠です。リドライバに比べて PCIe リタイマは、適応型 EQ、DFE、CDR など、より複雑な機能を備えています。リタイマは、システム・レベルの機能安全をサポートするため、RX リンク・マージン調整、内蔵アイ・モニタ、ケーブル・フォルト検出など複数のリンク監視診断機能も備えています。ネイティブ PCIe 3.0 伝送では、TI のリタイマは、Rosenberger 社 H-MTD[®] コネクタ・システムで GG 2Speed[®] 251 STP ケーブルを使用した最大 10m のアプリケーションを対象にしています。

図 2-5 に、総チャネル挿入損失の期待値に基づく PCIe リドライバおよびリタイマの対象使用事例を示します。以下の前提条件を使用して最大目標ケーブル長を推定します。

- PCIe 仕様の PCIe 3.0 の挿入損失 (Rx) 制限値: 22dB (4GHz 時)
- 4GHz で、以下のリンク・チャネル挿入損失 (IL) 特性を仮定します。
 - IL_{cable_m} = GG 2Speed[®] 251 STP ケーブル: 2.75dB/m
 - IL_{PCB} = FR4 PCB パターン: 4dB (6 インチ (152.4mm) の場合)
 - IL_{conn} = コネクタとその他の PCB 部品: 1.5dB
- 推定最大ケーブル長 (m) = $(IL_{Total} - 2 \times IL_{PCB} - 2 \times IL_{conn}) / IL_{cable_m}$

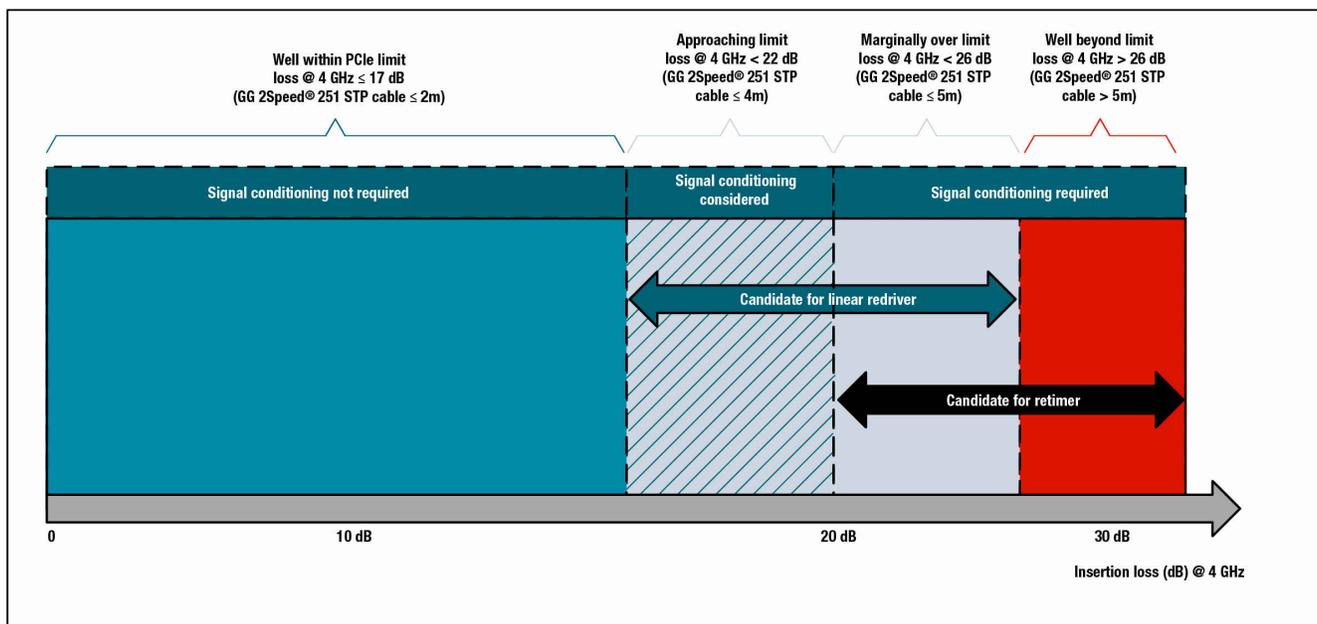


図 2-5. PCIe 車載用ケーブル・アプリケーションでのシグナル・コンディショニングの対象使用事例

3 まとめ

PCIe は、次世代分散型車載アーキテクチャによって重要な高帯域および超低レイテンシ・コンピューティングの要求に対応するための魅力的なインターフェイスです。PCIe インターフェイスをプロセッサが共有処理のために最大限に活用できるように、このホワイト・ペーパーでは ECU 内インターフェイスから ECU 間インターフェイスに PCIe を変換する車載ケーブル接続を定義しました。TI、Rosenberger 社、GG Group 社などの主要自動車産業ベンダーは、H-MTD[®] コネクタと GG 2Speed[®] ケーブルを使った車載用ケーブル・チャンネル上のネイティブ PCIe 伝送を実現する革新的なソリューションを開発してきました。これらの物理層ソリューションを使うことで、車載用プロセッサは計算能力、効率、接続性の潜在能力を十分に発揮できます。

4 主な貢献者

テキサス・インスツルメンツ (TI):

- Michael Lu、高速シグナル・コンディショニング・システムおよびアプリケーション・エンジニア

GG Group 社:

- Stefan Gianordoli 氏、戦略製品マネージメント部門グローバル責任者
- Tobias Kupka 氏、車載用配線アプリケーション・エンジニアリング、チームリーダー

Rosenberger Hochfrequenztechnik GmbH & Co. KG 社:

- Gunnar Armbrecht 氏、車載 R&D 責任者
- Stephan Kunz 氏、車載 R&D システム・エンジニア

重要なお知らせと免責事項

TI は、技術データと信頼性データ(データシートを含みます)、設計リソース(リファレンス・デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含むいかなる保証も、明示的または黙示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、TI 製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適した TI 製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとし、

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されている TI 製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、TI はその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。TI や第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、TI およびその代理人を完全に補償するものとし、TI は一切の責任を拒否します。

TI の製品は、[TI の販売条件](#)、または [ti.com](https://www.ti.com) やかかる TI 製品の関連資料などのいずれかを通じて提供する適用可能な条項の下で提供されています。TI がこれらのリソースを提供することは、適用される TI の保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案した場合でも、TI はそれらに異議を唱え、拒否します。

郵送先住所 : Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2022, Texas Instruments Incorporated