

平成23年度戦略的基盤技術高度化支援事業

(平成23年度補正予算事業)

「28Gビット/s電気伝送における放射ノイズ防止と伝送距離延長を同時に実現する  
振幅補正機能付きコモンモードフィルタの開発」

研究開発成果等報告書

平成25年 4月

委託者 中国経済産業局

委託先 公益財団法人しまね産業振興財団

## 目次

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 第1章   | 研究開発の概要                                     | 2  |
| 1-1   | 研究開発の背景・研究目的及び目標                            | 2  |
| 1-1-1 | 川下製造業者の抱える課題及びニーズ                           | 2  |
| 1-1-2 | 技術背景  | 2  |
| 1-1-3 | 研究目的及び技術目標                                  | 4  |
| 1-2   | 研究体制  | 7  |
| 1-3   | 成果概要  | 10 |
| 1-4   | 当該研究開発の連絡窓口                                 | 11 |
| 第2章   | 本論  | 12 |
| 2-1   | ① 21GHz 超帯域コモンモードフィルタの開発                    | 12 |
| ①-1   | 回路定数設計・構造設計                                 | 12 |
| ①-2   | 試作・検証                                       | 13 |
| 2-2   | ② 21GHz 超帯域群遅延特性平坦化イコライザの設計とコモンモードフィルタへの内蔵化 | 16 |
| ②-1   | 構造設計・特許出願                                   | 16 |
| ②-2   | 試作・検証                                       | 18 |
| ②-2-1 | イコライザ 01E の試作結果と技術目標値達成度検証                  | 18 |
| ②-2-2 | DFLD03E の試作結果と技術目標値達成度検証                    | 18 |
| ②-2-3 | DFLD04E の試作結果と技術目標値達成度検証                    | 19 |
| 2-3   | ③ シミュレーションと連携した 28G ビット/s、21GHz 超帯域の実測技術確立  | 21 |
| ③-1   | 接触式検査治具設計                                   | 21 |
| ③-2   | 治具作成  | 21 |
| ③-3   | 特性評価  | 21 |
| ③-4   | 信頼性評価                                       | 24 |
| ③-4-1 | マイグレーション評価                                  | 24 |
| ③-4-2 | たわみ試験                                       | 25 |
| ③-5   | 放射ノイズ測定                                     | 25 |
| 2-4   | 試作品の使用材料リストと外観・寸法                           | 26 |
| 第3章   | (最終章) 全体総括                                  | 27 |
| 3-1   | 結論  | 27 |
| 3-2   | 研究開発後の課題と事業展開                               | 27 |
| 参考文献  |   | 28 |
| 付録    | 専門用語の解説                                     | 29 |

# 第1章 研究開発の概要

## 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

### 1-1-1 川下製造業者の抱える課題及びニーズ

2010年6月に、100Gイーサネット規格が米国電気電子学会(IEEE)によって承認されて以降、10Gビット/s(以下bps)(\*\*\*専門用語解説参照、以下同様) および25Gbpsの高速伝送が加速度的に普及しつつある。100Gbps伝送の実現手段としては、10Gbpsの信号線×10本とする他、より低消費電力化のために25G~28Gbpsの信号線×4本も規格化されている。

日本でも平成21年度に総務省によりイーサネット向け超高速省電力光伝送技術の実現手段として電気インターフェースの伝送速度を28Gbps級に向上させる事が計画されている。しかしながら、現在10Gbpsを超える高速伝送に携わる川下企業から、図1-1に示すとおり10Gbps超の光-電気変換回路においては、差動信号(\*)にわずかでも非対称が発生すると、10GHz超の周波数領域に、スパイク状のコモンモードノイズ(\*)が発生し、その対策に苦労している事例が報告されている。コモンモードノイズは線路をアンテナとして放射され易く、他の装置や自身の回路を誤動作させる要因となる。25G~28Gbps伝送では、わずかなスキュー(\*)がノイズの発生と同時に信号の振幅を減衰させ、伝送距離短縮の要因になり得るため、その対策が必要である。

### 1-1-2 技術背景

ギガビット/s級の電気インターフェースでは高速シリアル差動伝送(\*)が使われる。高速シリアル差動伝送における従来のコモンモードノイズ対策では、コモンモードチョークコイル(\*)を差動伝送線路内に挿入するか、電磁波吸収シート等を回路周囲に貼り付けてノイズを装置筐体から出さない手法が広く使われてきた。図1-2にコモンモードチョークコイルの構造例、図1-3にその等価回路を示す。

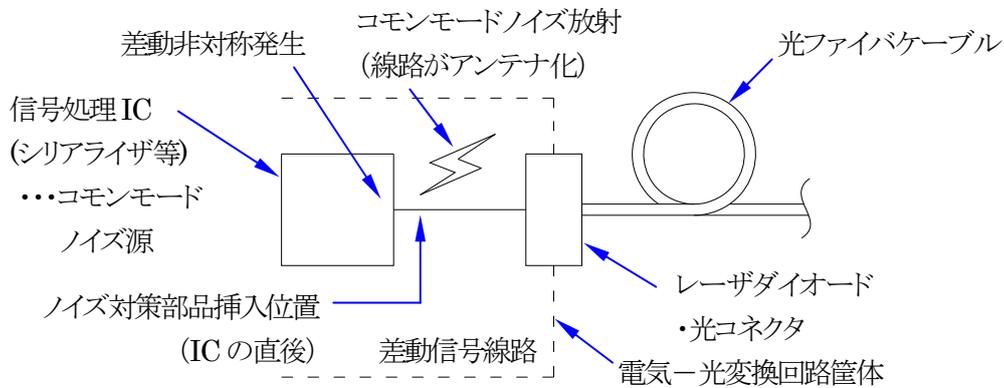


図1-1 高速シリアル差動伝送でのノイズ放射イメージ

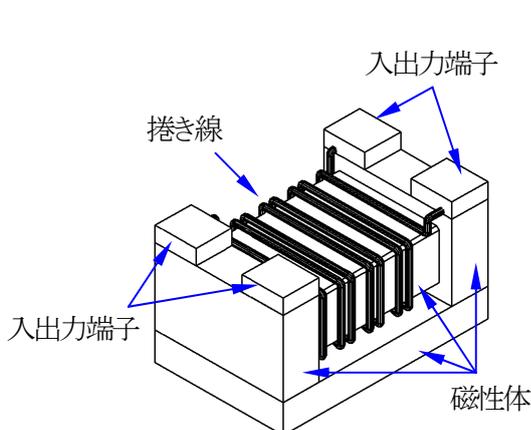


図1-2 コモンモードチョークコイルの例

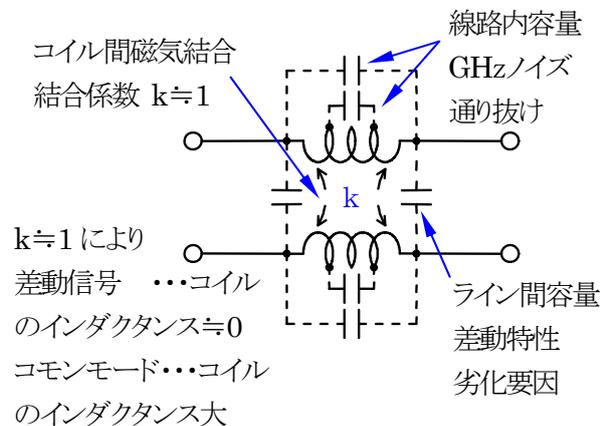


図1-3 コモンモードチョークコイルの等価回路

一方、本事業の研究実施機関である松江エルメック株式会社は、自社の保有する超高速遅延線技術を応用した、磁気結合に依存しない新しい動作原理による 16Gbps 対応、差動信号通過帯域 15GHz、実装サイズ 2.0mm×1.25mm のコモンモードフィルタを製品化した。本製品と従来製品との特徴比較を表 1-1 に示す。松江エルメック(株)開発製品のみが、放射ノイズを未然に防止し、しかも 25G~28Gbps の伝送速度にも対応可能なノイズ対策部品となり得る。

表 1-1 コモンモードノイズ対策部品の特徴比較

| 項目                      | 製品<br>コモンモード<br>チョークコイル    | 電磁波吸収シート                   | 松江エルメック(株)<br>開発製品                |
|-------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| ノイズ除去可能周波数              | ~約 10GHz まで                | ~30GHz                     | 4G~30GHz                          |
| 信号品質改善機能追加<br>(差動バランス等) | 差動バランスは改善可、それ以外の機能追加は困難    | 不可                         | 差動バランス改善可<br>その他 LC 回路集積で各種機能追加可能 |
| 放射ノイズ防止能力               | ノイズを反射遮断、反射ノイズの放射防止機能なし    | 放射自体は防止不可<br>(放射されたノイズを吸収) | ノイズを吸収するので放射を未然に防止可               |
| 実装サイズ                   | 最小 0.45×0.3mm <sup>2</sup> | 任意に加工可能                    | 2.0×1.25mm <sup>2</sup>           |

ところで、25G~28Gbps はデータ伝送速度が大変速く、データ 0 や 1 が 1 ビットだけ発生する最小パルス幅波形、すなわち 1 ユニットインターバル (以下 1UI) 波形は、パルス幅 40p~35.7ps、データが 2 ビット分連続する 2UI 波形でもパルス幅 80p~71.4ps と極めて狭い。このような狭いパルスでは、表 1-2 のとおり、10Gbps と比べ技術的な難易度が極めて高くなる。

表 1-2 10Gbps と 25G~28Gbps との特徴比較

| 項目             | 伝送速度   | 10Gbps    | 25Gbps    | 28Gbps    |
|----------------|--------|-----------|-----------|-----------|
| 1UI 信号周波数      |        | 5GHz      | 12.5GHz   | 14GHz     |
| 1UI パルス幅       |        | 100ps     | 40ps      | 35.7ps    |
| 最低必要な周波数帯域 (*) |        | 7.5GHz    | 18.8GHz   | 21GHz     |
| 20ps スキュー時     | 1UI 波形 | 入力振幅の 95% | 入力振幅の 71% | 入力振幅の 64% |
| 差動出力振幅(*)      | 2UI 波形 | 入力振幅の 99% | 入力振幅の 92% | 入力振幅の 90% |

スキューが発生すると、表 1-2 のとおり、1UI 波形に振幅減少が生じる (\*)。そのような信号をコモンモードフィルタに通すと、コモンモードフィルタでの損失も加わって、特に 25G~28Gbps では、1UI 信号だけが大きく振幅減少し、パルス幅の広いビットパターン信号との振幅差がますます発生し易くなる。さらに配線部の伝送ロスも加わり、振幅差はより顕著になる。このようなビットパターンによって振幅差をもつ波形の問題点は第 2 章、②-1-1 で詳細に述べるが、アイパターン(\*)の開口面積が小さくなり、ビットエラーを起こす要因となり得る。

以上の理由で、25G~28Gbps 伝送においてスキューが発生した場合、コモンモードフィルタによるコモンモードノイズ除去だけでなく、イコライザと呼ばれる振幅均等化部品による振幅差補正が必須となる。現在、超高速シリアル伝送で用いられているイコライザは、

- CTLE (連続時間リニアイコライザ、受動アナログ回路方式) [1]
- FFE (フィード・フォワード・イコライザ、半導体アナログ回路方式) [2]
- DFE (デンジョン・フィードバック・イコライザ、半導体デジタル回路方式) [2]

の3種類があるが、中でもCTLEは、構造がシンプルのため安価、電源が不要である事から回路への実装も容易等の理由で、12.5Gbpsまでの製品が市場で広く使われている。ただし回路構成上、伝播遅延特性の周波数依存性が避けられず、これがアイパターンの立上り／立下りエッジの広がり、すなわちジッタの要因となる（詳細は2章②-1-1参照）。12.5Gbpsまではそれでも問題無かったが、この構造で28Gbps向け品を設計しても、エッジの広がりや12.5Gbps品と同等で、波形のパルス幅が極めて狭くなる分、相対的にアイ開口面積が狭くなり好ましくない。

そこで28Gbps対応に、伝播遅延特性の周波数依存性すなわち平坦な群遅延特性(\*)を持つCTLEを開発すれば、12.5Gbps用と同様、市場に広く受け入れられる事が期待できる。しかも、CTLEは抵抗とコンデンサの組み合わせによる一種のハイパスフィルタであり、この抵抗とコンデンサとの組み合わせは、松江エルメック(株)が開発したコモンモードフィルタと共通点が多いため28Gbps向けコモンモードフィルタに内蔵する事も可能で、非常に有効な部品となり得る事が期待される。

以上の技術背景を受け、28Gbps向けに、コモンモードフィルタ単体、イコライザ単体、イコライザ内蔵コモンモードフィルタの製品開発およびこれらの測定技術開発を計画するに至り、表1-3のとおり解決すべき課題を定めるとともに、表1-3の開発テーマおよび解決すべき課題に対し、具体的に次のとおり研究目的および技術目標を設定した。

表1-3 開発テーマと解決すべき課題

| 開発テーマ                     | 解決すべき課題  |
|---------------------------|--|
| 28Gbps 向けコモンモードフィルタ       | 28Gbps が通過できる周波数帯域 21GHz を確保できる事<br>コモンモードノイズ除去帯域 4G~21GHz を確保できる事                 |
| 28Gbps 向けイコライザ            | 28Gbps が通過できる周波数帯域 21GHz 確保を確保できる事<br>伝播遅延特性の周波数依存性が少ない事<br>20ps スキューによる振幅差を補正できる事 |
| 28Gbps 向イコライザ内蔵コモンモードフィルタ | 外形サイズを保ったまま、コモンモードフィルタとイコライザの上記機能を維持する事  |
| 測定技術                      | 上記開発製品の製品検査ができること  |

### 1-1-3 研究目的及び技術目標

#### ① 21GHz 超帯域コモンモードフィルタの開発

(担当機関：松江エルメック株式会社、株式会社エレック北上、島根県産業技術センター)

①に関する技術目標 No. 1、No. 2

No. 1 コモンモードノイズ除去特性(Scc21)：4G~21GHz で15dB以上

No. 2 差動信号通過特性(Sdd21)：通過帯域21GHz以上

#### ①-1 回路定数設計・構造設計

(松江エルメック株式会社、島根県産業技術センター)

遅延線応用回路方式コモンモードフィルタを28Gビット/s対応可能とする回路定数設計および構造設計を行う。回路定数設計の検証を回路シミュレータで行い、目標値①の達成度を確認後、その回路定数を実現可能な構造設計を行い電磁界シミュレータで検証、目標値①の達成度を確認する。

#### ①-2 試作・検証

(松江エルメック株式会社、株式会社エレック北上、島根県産業技術センター)

①-1で設計したコモンモードフィルタ単体を、積層セラミック工程を用いて製品実現する。試作品は、28G ビット/s の測定技術が確立するまでは、電磁界シミュレーション結果との比較も参考にして、目標値①の達成度を担当実施機関の現有設備で検証可能な範囲で確認する。28G ビット/s の測定技術確立後は、実施項目③-3で対応する。

## ② 21GHz 超帯域群遅延特性平坦化イコライザの設計とコモンモードフィルタへの内蔵化

(担当機関：松江エルメック株式会社、株式会社エレック北上、島根県産業技術センター)

②に関する技術目標 No. 3-No. 6

No. 3 差動信号通過特性(Sdd21)：通過帯域 21GHz 以上

No. 4 差動群遅延時間偏差：28G ビット/s アイパターンでジッタ 5ps 以下

No. 5 最小減衰量：12.5G~14GHz で2dB 未満

No. 6 DC での減衰量：最小減衰量からさらに3dB 以上減衰

②-1 構造設計・特許出願

(松江エルメック株式会社、島根県産業技術センター)

回路シミュレーションでイコライザ等価回路に対する最適抵抗値、容量値を求め、その値を実現するよう構造設計・電磁界シミュレーションを行うとともに検証を行い、目標値②の達成度を確認する。イコライザの構造設計完了後、それを①項で設計したコモンモードフィルタ内に内蔵させる設計を行い、電磁界シミュレーションで検証、目標値②の達成度のみならずコモンモードフィルタ部分に関しては目標値①が維持されている事を確認する。

回路構成と構造については①項の成果も含めて特許出願する。

②-2 試作・検証

(松江エルメック株式会社、株式会社エレック北上、島根県産業技術センター)

最初にイコライザ単体の試作を行い、セラミック内部の抵抗の印刷条件や焼成条件、および②での目標値の達成度を確認する。イコライザ単体の試作完了後、コモンモードフィルタにイコライザを内蔵して試作を行う。試作品は、28G ビット/s の測定技術が確立するまでは、電磁界シミュレーション結果との比較も参考にして、目標値②の達成度のみならずコモンモードフィルタ部分に関しては目標値①が維持されている事を担当実施機関の現有設備で検証可能な範囲で確認する。28G ビット/s の測定技術確立後は、実施項目③-3で対応する。

## ③ シミュレーションと連携した 28G ビット/s、21GHz 超帯域の実測技術確立

(担当機関：松江エルメック株式会社、株式会社エレック北上、島根県産業技術センター)

③に関する目標値 No. 7

No. 7 検査治具のリターンロス 20GHz で15dB 以上

③-1 接触式検査治具設計

(松江エルメック株式会社)

担当実施機関がこれまでに開発した治具を基に、基板内の特にSMAコネクタ接続部のインピーダンス整合や接触子形状を見直した検査治具を設計する。測定対象製品を実装した状態でモデリング・電磁界シミュレーションを行い、測定系全体で目標値③の達成度を確認する。

### ③-2 治具作成

(松江エルメック株式会社)

③-1 で設計した治具の作成を行う。

### ③-3 特性評価

(松江エルメック株式会社、島根県産業技術センター)

完成した検査治具で実施項目①及び②の試作品の特性を測定し、目標値①および目標値②の達成度を評価する。ただし以下のようにシミュレーションと連携する。

周波数特性・・・現在保有の 20GHz 帯域ネットワークアナライザで測定し、20GHz までの測定結果と電磁界シミュレーションとの一致をもって、20G～21GHz については電磁界シミュレーション結果を製品実力値とする

ランダムパルス応答・・・現実的な予算で実現できる 27G ビット/s のランダムパルス信号で測定し、その応答波形 (アイパターン) と回路シミュレーションとの一致をもって、28G ビット/s の応答波形は回路シミュレーション結果を製品実力値とする。

### ③-4 信頼性評価

(松江エルメック株式会社、株式会社エレクト北上)

担当実施機関の現有設備を用いて、既存製品と同等の信頼性評価項目で試験を行う。

### ③-5 放射ノイズ測定

(松江エルメック株式会社、島根県産業技術センター)

電波暗室内で 27G ビット/s ランダムパルス差動信号にスキューを発生させ、差動線路上にコモンモードフィルタが有る場合と無い場合とで、放射電磁界スペクトルを測定・比較し、コモンモードフィルタの有効性を確認する。

## ④ プロジェクトの管理・運営

(担当機関：公益財団法人しまね産業振興財団)

研究を円滑に推進するため、一連の研究全体について参加機関相互の連携を図り、研究計画のとりまとめ、進捗管理、研究推進会議、報告書作成などを行い研究開発を統括する。

また、公益財団法人しまね産業振興財団は事業の進捗について適正な管理を行う。

### ④-1 全体計画の企画 (公益財団法人しまね産業振興財団)

プロジェクトにおける全体計画を調整し、企画を行う。また、事業化を見据えた、外部的な調整作業の企画を行う。

### ④-2 進捗管理 (公益財団法人しまね産業振興財団)

各研究について、各研究機関の進捗度合いを把握し、研究のスムーズな進捗の調整を図る。

### ④-3 研究推進会議の開催 (公益財団法人しまね産業振興財団)

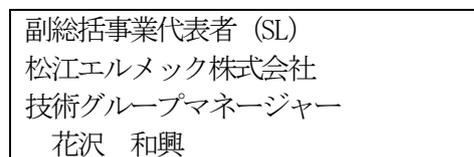
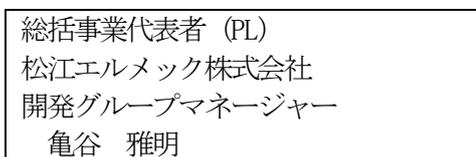
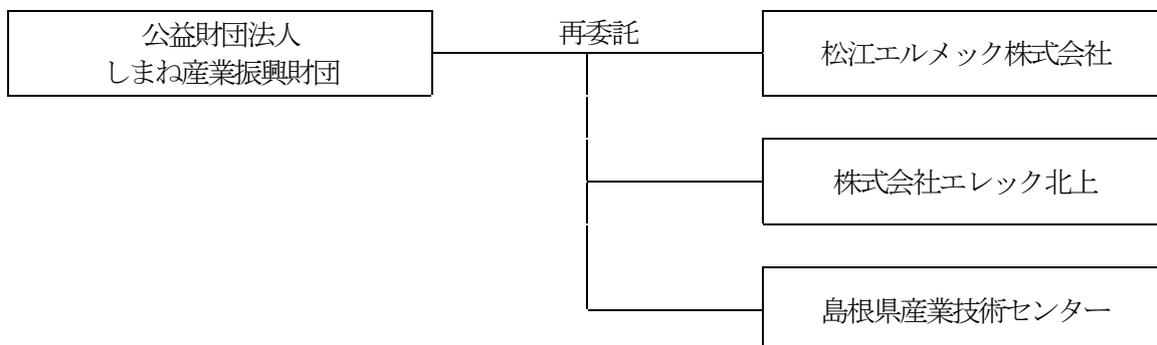
研究推進のための会議を 2 回程度開催。

### ④-4 報告書とりまとめ (公益財団法人しまね産業振興財団)

## 1-2 研究体制

### (1) 研究組織及び管理体制

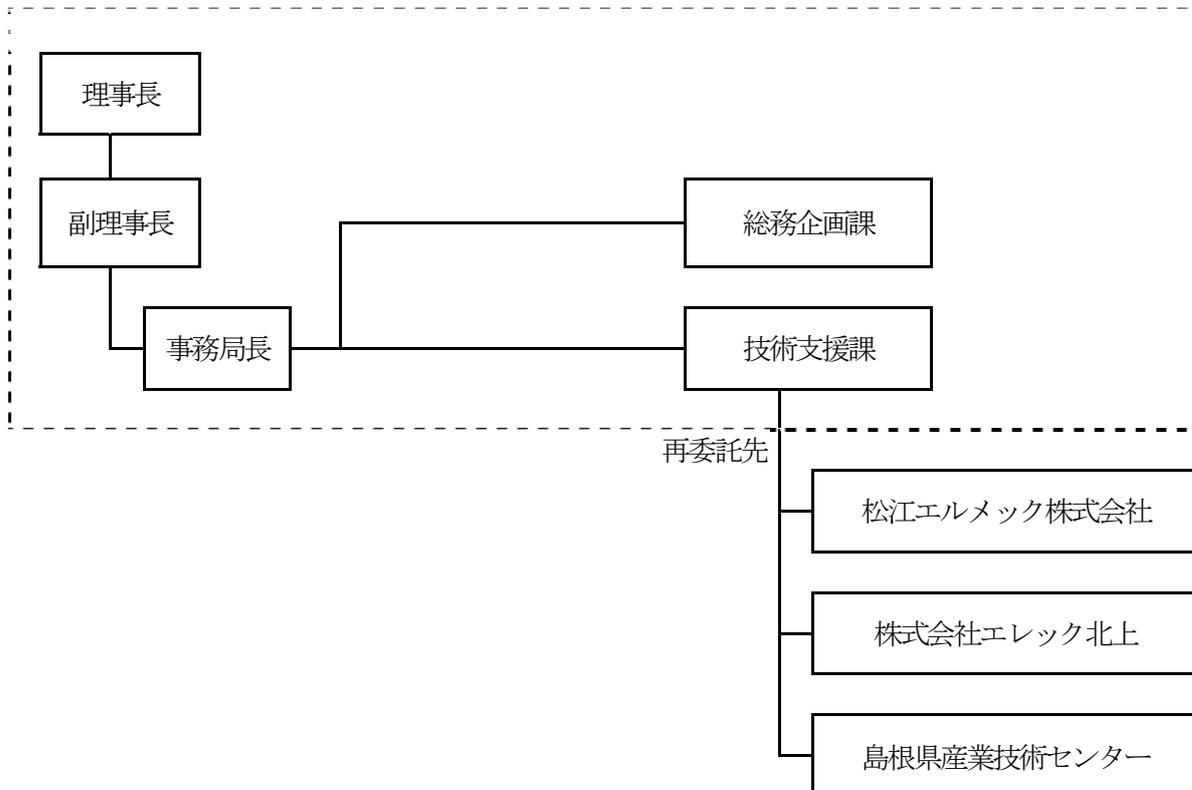
#### 1) 研究組織 (全体)



#### 2) 管理体制

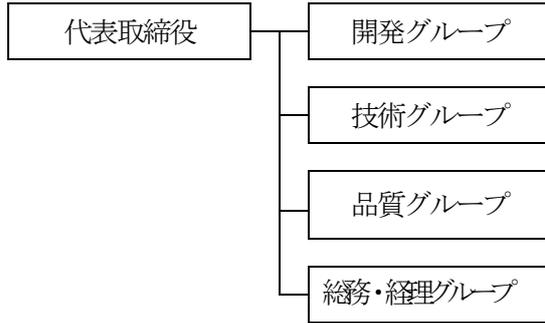
##### ①事業管理機関

[公益財団法人しまね産業振興財団]



② (再委託先)

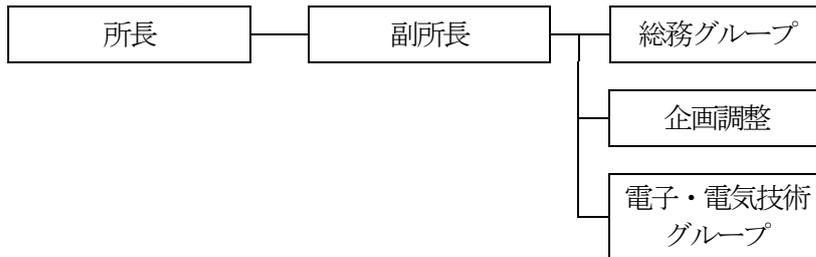
松江エルメック株式会社



株式会社エレック北上



島根県産業技術センター



(2) 管理員及び研究員

【事業管理機関】 公益財団法人しまね産業振興財団

管理員

| 氏名    | 所属・役職     | 実施内容 (番号) |
|-------|-----------|-----------|
| 木戸 康雄 | 技術支援課 課長  | ④         |
| 江角 直美 | 技術支援課 主任  | ④         |
| 川谷 芳弘 | 技術支援課 参事  | ④         |
| 竹内 美香 | 技術支援課 専門員 | ④         |

【再委託先】 ※研究員のみ

松江エルメック株式会社

| 氏名    | 所属・役職             | 実施内容 (番号)                   |
|-------|-------------------|-----------------------------|
| 亀谷 雅明 | 開発グループ マネージャー     | ①-1、①-2、②-1、②-2、③-1、③-3、③-5 |
| 花沢 和興 | 技術グループ マネージャー     | ③-1、③-2、③-3                 |
| 亀谷 明彦 | 品質グループ 品質担当       | ③-4                         |
| 杠 妙子  | 総務・経理グループ チーフ     | ②-2、③-4、③-5                 |
| 須田 勲  | 取締役 品質グループ マネージャー | ③-4                         |
| 曾田 康男 | 代表取締役             | ①-2、②-2、③-3、③-4、③-5         |

株式会社エレック北上

| 氏名     | 所属・役職   | 実施内容 (番号)   |
|--------|---------|-------------|
| 石田 巖   | 取締役製造部長 | ①-2、②-2     |
| 板沢 勇一  | 生産技術課課長 | ①-2、②-2、③-4 |
| 高橋 正勝  | 生産技術課   | ①-2、②-2、③-4 |
| 岩渕 諒   | 生産技術課   | ①-2、②-2、③-4 |
| 八重樫 友行 | 製造4課    | ②-2         |

島根県産業技術センター

| 氏名   | 所属・役職             | 実施内容 (番号)                   |
|------|-------------------|-----------------------------|
| 大峠 忍 | 電子・電気技術グループ・主任研究員 | ①-1、①-2、②-1、②-2、<br>③-3、③-5 |

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理機関)

公益財団法人しまね産業振興財団

(経理担当者) 技術支援課 専門員

竹内 美香

(業務管理者) 技術支援課 課長

木戸 康雄

(再委託先)

松江エルメック株式会社

(経理担当者) 総務経理グループ チーフ

杠 妙子

(業務管理者) 開発グループ マネージャー

亀谷 雅明

株式会社エレック北上

(経理担当者) 総務部 総務課 係長

新沼 民夫

(業務管理者) 代表取締役社長

林 和幸

島根県産業技術センター

(経理担当者) 総務グループ 主任

米原 陽介

(業務管理者) 電子・電気技術グループ 主任研究員

大峠 忍

(4) 他からの指導・協力者

| 氏名     | 所属・役職                                     | 備考               |
|--------|---|------------------|
| 桑畑 啓三  | 三菱電機エンジニアリング株式会社 電子技術センター<br>電子応用課 主監技師   | 研究推進会議<br>アドバイザー |
| 加賀谷 修  | 日本オプネクスト株式会社 共通技術センター<br>共通プラットフォーム部 主任技師 | 研究推進会議<br>アドバイザー |
| 志賀 元次  | エルメック株式会社 顧問                              | 研究推進会議<br>アドバイザー |
| 雨甲斐 義文 | エルメック株式会社 顧問                              | 研究推進会議<br>アドバイザー |
| 米丸 徹   | エルメック株式会社 営業技術グループ マネージャー                 | 研究推進会議<br>アドバイザー |
| 飯村 誠之  | エルメック株式会社 開発グループ サブマネージャー                 | 研究推進会議<br>アドバイザー |

### 1-3 成果概要

各技術的目標値（以下技術目標）に対する達成度

|           |  |  |
|-----------|--|--|
| サブテーマ     | ① 21GHz 超帯域コモンモードフィルタの開発（開発品番 DFLD07R）   |  |
| 技術目標 No.1 | コモンモードノイズ除去特性(Scc21)：4G~21GHz で15dB 以上   |  |
| 達成度       | 4GHz で14.8dB、4.1G~21GHz では15dB 以上達成、 <u>達成度 99.9%</u>                                    |  |
| 技術目標 No.2 | 差動信号通過特性(Sdd21)：通過帯域 21GHz 以上  |  |
| 達成度       | 実力値 20GHz、 <u>達成度 95%</u>  |  |
| 評価        | ほぼ目標通りの製品開発に成功した。詳細は2章、①-2-2 参照。   |  |
| サブテーマ     | ② 21GHz 超帯域群遅延特性平坦化イコライザの設計とコモンモードフィルタへの内蔵化・・・イコライザ単体（開発品番イコライザ 01E）                     |  |
| 技術目標 No.3 | 差動信号通過特性(Sdd21)：通過帯域 21GHz 以上  |  |
| 達成度       | 実力値 20GHz、 <u>達成度 95%</u>  |  |
| 技術目標 No.4 | 差動群遅延時間偏差：28G ビット/s アイパターンでジッタ 5ps 以下  |  |
| 達成度       | 実力値 5.5ps、 <u>達成度 90%</u>  |  |
| 技術目標 No.5 | 最小減衰量：12.5G~14GHz で2dB 未満  |  |
| 達成度       | 減衰量 1dB 前後で完全達成、 <u>達成度 100%</u>   |  |
| 技術目標 No.6 | DC での減衰量：最小減衰量からさらに 3dB 以上減衰   |  |
| 達成度       | DC~12.5GHz 間の減衰量差 3.4dB で完全達成、 <u>達成度 100%</u>   |  |
| 評価        | ほぼ目標通りの製品開発に成功した。詳細は2章、②-2-1 参照。   |  |
| サブテーマ     | ② 21GHz 超帯域群遅延特性平坦化イコライザの設計とコモンモードフィルタへの内蔵化・・・イコライザ内蔵コモンモードフィルタ（開発品番 DFLD04E）            |  |
| 技術目標 No.1 | コモンモードノイズ除去特性(Scc21)：4G~21GHz で15dB 以上   |  |
| 達成度       | 内部遅延線の区間数半減となり理論的に達成困難、ただし試作品の実測によるノイズ除去特性は、DFLD07R と同等以上で問題なし                           |  |
| 技術目標 No.3 | 差動信号通過特性(Sdd21)：通過帯域 21GHz 以上  |  |
| 達成度       | 実力値 20GHz、 <u>達成度 95%</u>  |  |
| 技術目標 No.4 | 差動群遅延時間偏差：28G ビット/s アイパターンでジッタ 5ps 以下  |  |
| 達成度       | 実力値 7.8ps、 <u>達成度 64%</u>  |  |
| 技術目標 No.5 | 最小減衰量：12.5G~14GHz で2dB 未満  |  |
| 達成度       | 12.5GHz：2.3dB、14GHz：2.5dB で若干未達成、 <u>達成度 94%</u>   |  |
| 技術目標 No.6 | DC での減衰量：最小減衰量からさらに 3dB 以上減衰   |  |
| 達成度       | DC~12.5GHz 間の減衰量差 2.1dB で 0.9dB 不足、 <u>達成度 90%</u>                                       |  |
| 評価        | 概略目標通りの製品開発に成功した。詳細は2章、②-2-1 および③-3 参照。  |  |
| サブテーマ     | ③ シミュレーションと連携した 28G ビット/s、21GHz 超帯域の実測技術確立   |  |
| 技術目標 No.7 | 検査治具のリターンロス 20GHz で15dB 以上   |  |
| 達成度       | 20GHz でのリターンロス 21dB、DC~20GHz の範囲では、一部の帯域でわずかにリターンロス 15dB 未達成で、 <u>達成度 99%</u> （2章③-2 参照） |  |
| 評価        | 目標値としては十分な達成度を得られ、検査治具を使つての実測技術確立には成功した。詳細は2章、③-2 参照。                                    |  |

(注) 達成度の算出方法は、2章、①-2 参照

技術目標としては掲げていなかったものの、実施を計画していた他の項目

| 実施項目    | 結果                            | 判定        |
|---------|-------------------------------|-----------|
| 信頼性評価   | マイグレーション(*)・たわみ評価実施、問題が無い事を確認 | ほぼ目的達成    |
| 放射ノイズ測定 | 信号の放射が強く、ノイズの放射と区別できず         | 未達成、今後の課題 |

1-4 当該研究開発の連絡窓口

公益財団法人しまね産業振興財団  
技術支援課 主任 江角 直美

Tel : 0852-60-5112 Fax : 0852-60-5105

E-mail : sat@joho-shimane.or.jp

第2章 本論

2-1 ① 21GHz 超帯域コモンモードフィルタの開発

①-1 回路定数設計・構造設計

松江エレクトロニクスが独自に開発した、遅延線応用回路方式コモンモードフィルタを 28G ビット/s (28Gbps) 対応とするための回路定数設計を行った。その等価回路と回路定数を図 2-1 に示す。

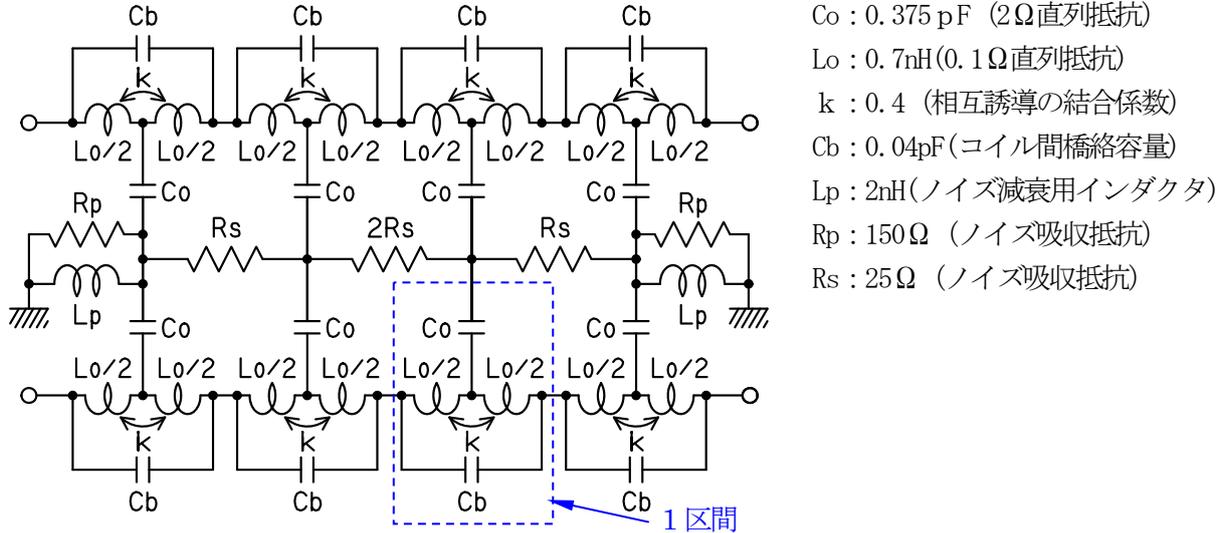
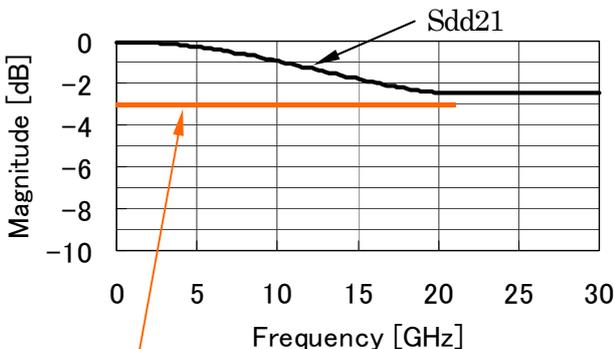


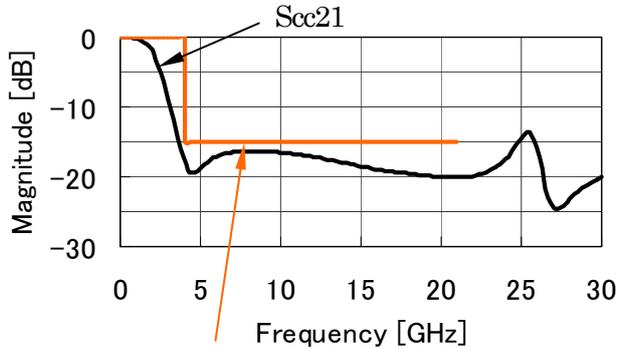
図 2-1 コモンモードフィルタの等価回路

図 2-1 の等価回路と回路定数で回路シミュレーションを行い、差動信号通過特性 Sdd21 およびコモンモード信号通過特性 Scc21 を求めた、その結果を図 2-2 および図 2-3 に示す。両方の特性とも設定した技術目標値をクリアしている。



目標値ライン  
Sdd21 曲線が 0~21GHz の範囲で目標値ラインを下回らないこと

図 2-2 差動信号通過特性 Sdd21



目標値ライン  
Scc21 曲線が 4~21GHz の範囲で目標値ラインを上回らないこと

図 2-3 コモンモード信号通過特性 Scc21

このようなコモンモードフィルタのコモンモードノイズ除去能力を確認するために、スキューが発生した 25Gbps の信号源に対し、本コモンモードフィルタの有無で、コモンモードノイズがどこまで除去可能かをシミュレーションで評価した。その評価用回路を図 2-4 に、結果を図 2-5 に示す。左側がコモンモードフィルタ未接続 (図の Box 内スルー接続) の時の、右側がコモンモードフィルタ接続時のコモンモードノイズのスペクトルである。十分なノイズ除去が達成されている事が示されており、回路定数は妥当であると判断される。



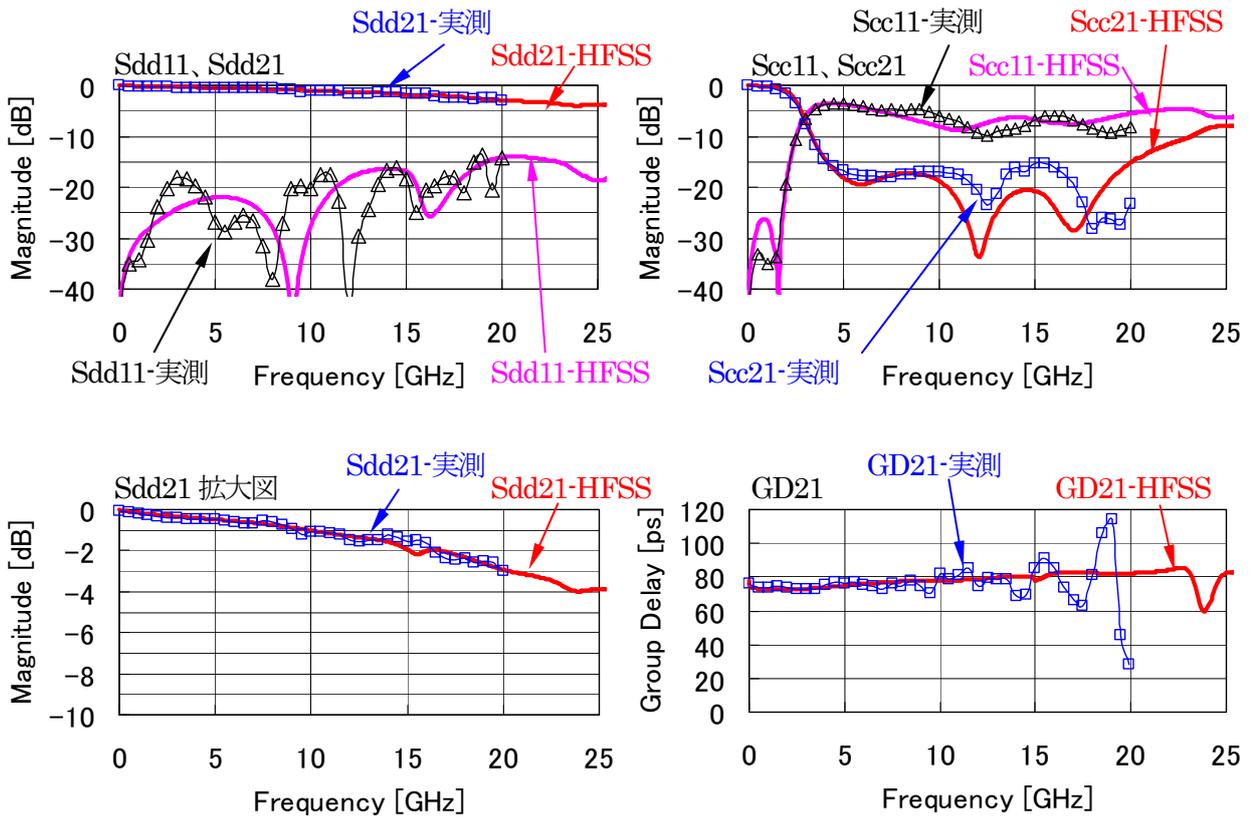


図2-6 DFLD07R 試作品の周波数特性 (実測 vs HFSS)

また、実測 S パラメータを図2-4 に代入して回路シミュレーションで求めた 25Gbps のノイズスペクトルと、20ps 相当のスキューをネットワークアナライザ(以下 VNA)内で作成した上で、PLTS ソフトウェアにより実測・描画したアイパターンを図2-7 に示す。VNA の測定周波数帯域が 20GHz までなので、20G~30GHz のスペクトルは参考程度であるが、20GHz 以下ではノイズ除去機能が有効に働いている事が示されている。一方アイパターンは、表1-2 に示したとおり、1UI 信号の減衰により、信号に振幅差が生じ、アイの開口部が小さくなっている。次節で述べるイコライザは、このように小さくなった開口部を相対的に広げる事が可能である。

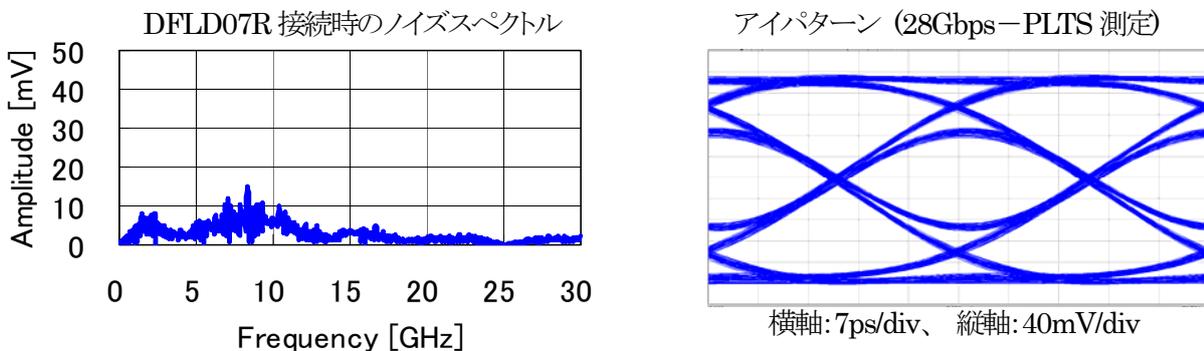


図2-7 DFLD07R 試作品によるノイズスペクトルとアイパターン

以上の設計結果に対し、技術目標の達成度検証を行った。コモンモードフィルタ DFLD07R に対する技術目標(No. 1、2)

No. 1 コモンモードノイズ除去特性(Scc21) : 4G~21GHz で 15dB 以上

No. 2 差動信号通過特性(Sdd21) : 通過帯域 21GHz 以上

に対する達成度は下記のとおり算出した。

No. 1 については、4.0G~4.1GHz で実測曲線が一部区間でのみ、わずかに目標値未達成である。そのような場合は、単純に目標未達成とは言い難いので、達成度にて判定する。ここで達成度は、“ 実測曲線の平均値/目標線の平均値 ” とした。すなわち、製品の周波数  $f$  における実測値を  $V(f)$ 、目標値を  $G(f)$ 、目標値を設定した周波数帯域の下限を  $f_{\min}$ 、上限を  $f_{\max}$ 、測定周波数ステップを  $df$  とし、達成度  $R$  は、

$$R = \frac{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} V(f)df}{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} G(f)df} \quad \dots \text{(式 2-1)}$$

ただし  $V(f)$  が  $G(f)$  を超える場合は、 $V(f)=G(f)$  とした。その理由は、局部的に  $V(f)$  が好特性になって  $G(f)$  を大きく上回ると、達成度が押し上げられて見かけ上良い数値になったり、最悪の場合は達成度が 1 を超える恐れがあるので、そのようなケースを防ぐためである。以上のような手法により、技術目標 No. 1 に達する達成度  $R$  は、 $R=99.9\%$  が得られた。

(注意点) 達成度  $R$  を求める場合の実測値  $V(f)$ 、目標値  $G(f)$  は dB 表示ではなく電圧比 (出力電圧/入力電圧の比、最小値 0~最大値 1) に変換した関数である。

dB 表示の実測値を  $M(f)$ 、目標値を  $T(f)$  とすると、 $V(f)$  および  $G(f)$  は、

a)  $M(f)$  が  $T(f)$  を上回る事が目標値クリアとなる場合(信号の通過特性等)

$$V(f) = 10^{\{M(f)/20\}} \quad \dots \text{(式 2-2)}$$

$$G(f) = 10^{\{T(f)/20\}} \quad \dots \text{(式 2-3)}$$

b)  $M(f)$  が  $T(f)$  を下回る事が目標値クリアとなる場合(ノイズの通過特性等)

$$V(f) = 1 - 10^{\{M(f)/20\}} \quad \dots \text{(式 2-4)}$$

$$G(f) = 1 - 10^{\{T(f)/20\}} \quad \dots \text{(式 2-5)}$$

である。

技術目標 No. 2 については、-3dB 通過帯域のように、ある特定の目標値に対する実力値の達成度を判定する場合は、単純に、達成度 = 実力値/目標値、ただし上限 100% Max、とした。

すなわち、-3dB 通過帯域目標値 21GHz に対し、実力値 20GHz であるので、達成度  $R$  は

$$R = 20/21 = 95\%$$

と判定した。

以上、DFLD07R はほぼ目標とする製品に仕上がった事が示された。本節での検証は計画上ここまで、28Gbps 信号による実測は 3 節で説明する。

## 2-2 ② 21GHz 超帯域群遅延特性平坦化イコライザの設計とコモンモードフィルタへの内蔵化

### ②-1 構造設計・特許出願

本事業で開発したイコライザは、CTLE（連続時間リニアイコライザ）と呼ばれるもので、基本的な構造は図 2-8 に示すような一種の T 型アッテネータである [1][3]。スキューや伝送ロスの影響を受けた信号は、高い周波数が減衰する。そのような信号が図 2-8 のイコライザを通過すると、低い周波数は抵抗 R1 で減衰する一方、高い周波数はコンデンサ C によって抵抗 R1 を迂回し振幅を維持するため、イコライザ通過後の信号は全周波数域で均一な振幅レベルに合わせ込む事ができるというものである。このように振幅レベルを均等化する事を波形等化と呼ぶ。図 2-8 の各定数は 28Gbps 向けに設定されており、その通過特性および群遅延特性を図 2-9 に示す。低周波側で群遅延が急激に変化する事は原理上避けられず、この変化がアイパターンにおいて立上り/立ち下がりがエッジのジッターを引き起こすので、我々はこの平坦化を目指した。

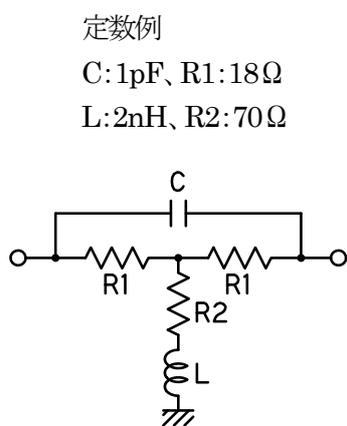


図 2-8 イコライザの基本回路

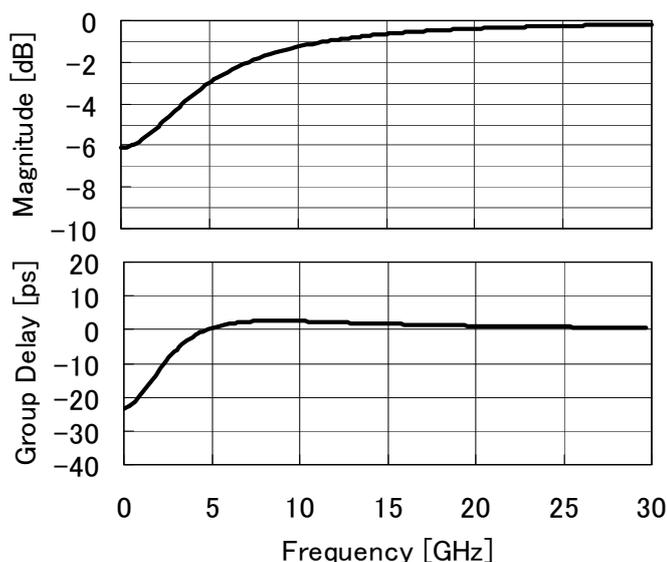


図 2-9 イコライザの通過特性(上)・群遅延特性(下)

まずはイコライザ単体の回路定数設計・構造設計を行った。開発品番はイコライザ 01E である。その手順は①-1 のコモンモードフィルタと同様であるので、その詳細は省略する。回路構成としては、図 2-8 の T 型アッテネータではなく、図 2-10 の  $\pi$  型アッテネータを改良した全く新しい  $\pi$  型イコライザを発明した。その回路図はここでは省略する。

実構造モデルの電磁界シミュレーションによる特性を図 2-11 に示す。同図の周波数特性 (Sdd11、Sdd21、GD21) には、回路シミュレータにより求めた等価回路の特性も併記している。また、アイパターンは電磁界シミュレーションから抽出した S パラメータを図 2-4 の Box に代入して回路シミュレーションより求めた。

各技術目標 No. 3~No. 6 に対しては

No. 3 差動信号通過特性(Sdd21)：通過帯域 21GHz 以上  $\Rightarrow$  約 20GHz で概略達成

No. 4 差動群遅延時間偏差：28G ビット/s アイパターンでジッター 5ps 以下  $\Rightarrow$  約 6ps で概略達成

No. 5 最小減衰量：12.5G~14GHz で 2dB 未満  $\Rightarrow$  1.7~1.3dB 完全達成

No. 6 DC での減衰量：最小減衰量からさらに 3dB 以上減衰  $\Rightarrow$  減衰量差 3.6dB で完全達成となり、本構造でイコライザ 01E の設計は完了とした。

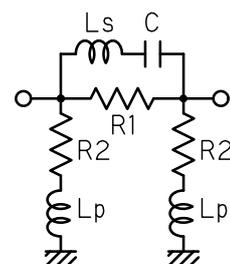


図 2-10  $\pi$  型イコライザ

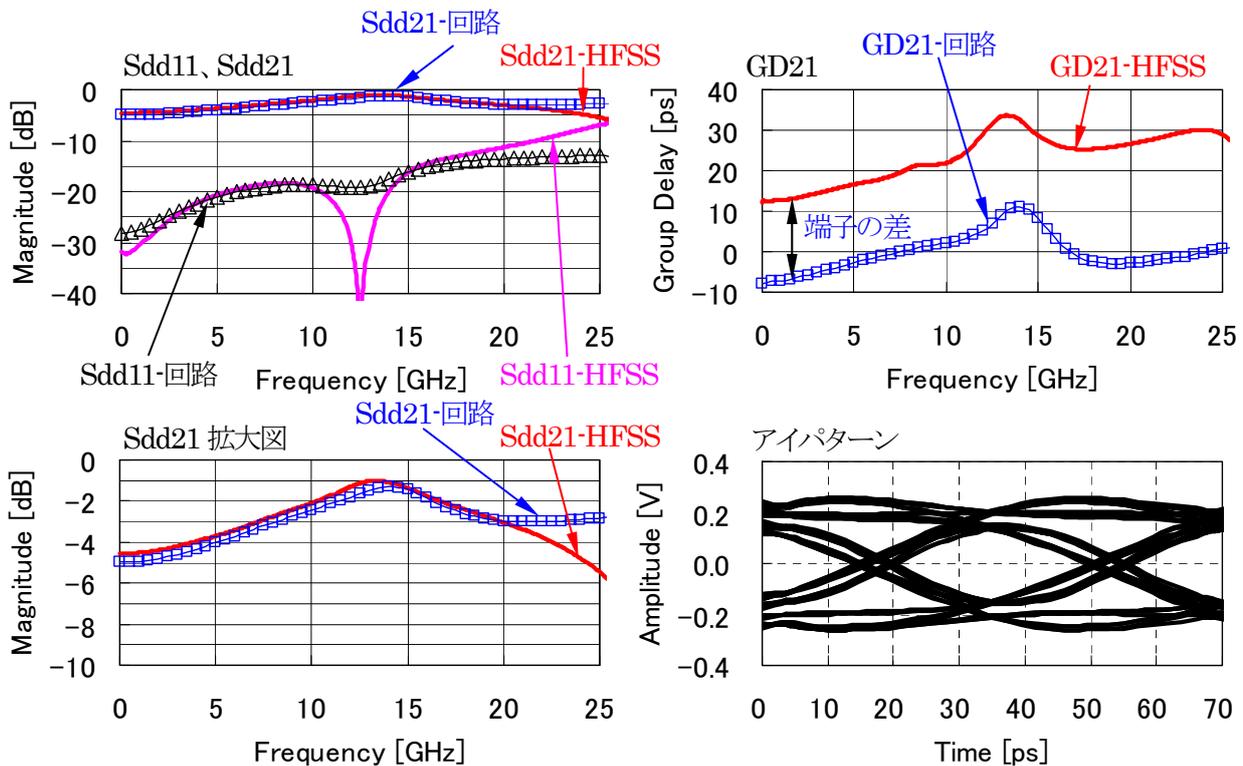


図2-11 イコライザ01Eのシミュレーション結果

以上のイコライザをコモンモードフィルタへ内蔵するために、下記の検討から開始した。

- 20ps スキュー解消時でも振幅差の無い出力波形
- 図2-1のコモンモードフィルタ回路中央部にイコライザを挿入（入出力対称）
- 外形サイズ2.0mm×1.25mmは維持
- 上記サイズで全回路が入りきれない場合、コモンモードフィルタの区間数を削減

以上の検討結果として、図2-1のコモンモードフィルタの中央2区間を除去、そこにイコライザ01E相当分を挿入する回路構成に決定した。さらにイコライザ部の構成に若干の違いがある2品番、開発品番DFLD03Eと開発品番DFLD04Eを設計した。その等価回路および回路シミュレーション結果はここでは省略し、次節にて実測結果に併記する形で電磁界シミュレーション結果を示す。

特許出願は2件行った。発明の概要は表2-1のとおりである。

表2-1 出願一覧

|        | 1件目                                     | 2件目  |
|--------|---|--|
| 出願国    | PCT出願                                   | 日本国内通常出願   |
| 発明等の名称 | 受動イコライザ                                 | コモンモードフィルタ   |
| 出願日    | 2012年12月10日                             | 平成25年1月11日   |
| 出願番号   | PCT/JP2012/081906                       | 特願2013-003448  |
| 出願人    | 松江エルメック株式会社                             | 松江エルメック株式会社  |
| 概要     | イコライザの具体的な構造に関する基本特許、日本・米国・中国への国内段階移行予定 | DFLD07Rに採用した技術に関する周辺特許、公開して公知化し、審査請求せず（他社による権利化防止のみ） |

## ②-2 試作・検証

イコライザ 01E、イコライザ内蔵コモンモードフィルタ DFLD03E、DFLD04E の試作を行った。試作品の外観は2-4節を参照されたい。ここでは、試作品の検証結果について述べる。

### ②-2-1 イコライザ 01E の試作結果と技術目標値達成度検証

試作したイコライザ 01E について、実測結果と HFSS によるシミュレーション結果との比較特性グラフ (Sdd11、Sdd21、GD21) および PLTS ソフトウェアで作成したアイパターンを図 2-12 に示す。DFLD07R の測定と同様の検査治具特性除去を行っている。評価結果としては、次の事が言える。

- ・ 概略シミュレーションと一致しており、設計通りに仕上がっている。
- ・ 群遅延特性 GD21 が 15GHz 前後で暴れているが、この傾向は DFLD07R でも見られており、検査治具の影響と考えられる。
- ・ アイパターンは、DFLD07R の場合と同様、20ps 相当のスキューを VNA 内で作成した上で、PLTS ソフトウェアにより実測・描画した。今回試作したイコライザ 01E は立上り/立下りエッジのジッタが図 2-11 より少なく良好な結果である。

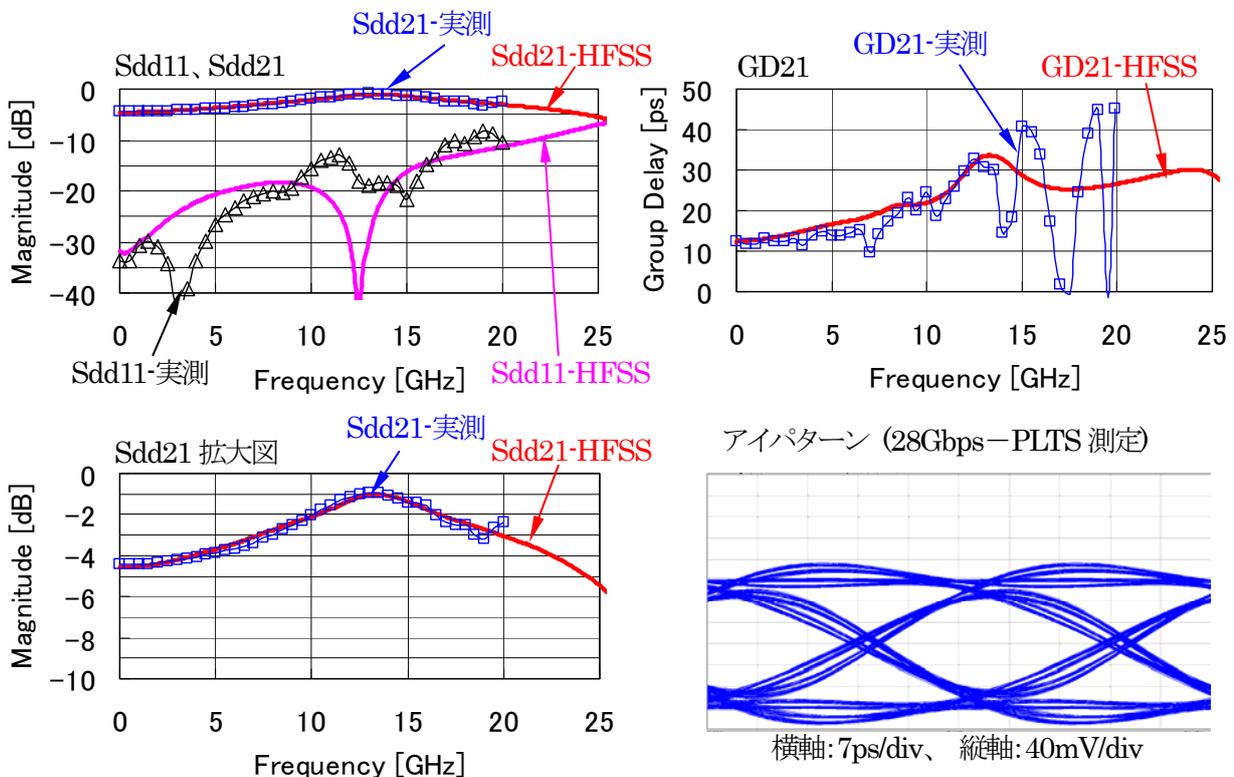


図 2-12 試作したイコライザ 01E の特性

技術目標 No. 3~6 に対する達成具合は

No. 3 差動信号通過特性(Sdd21) : 通過帯域 21GHz 以上 ⇒ 実力 20GHz で達成度 95%

No. 4 差動群遅延時間偏差 : 28G ビット/s アイパターンでジッタ 5ps 以下 ⇒ 5.5ps で達成度 90%

No. 5 最小減衰量 : 12.5GHz~14GHz で 2dB 未満 ⇒ 減衰量 1dB 前後で完全達成

No. 6 DC での減衰量 : 最小減衰量からさらに 3dB 以上減衰 ⇒ 減衰差 3.4dB で完全達成であり、ほぼ目標通りのものが完成した。

### ②-2-2 DFLD03E の試作結果と技術目標値達成度検証

試作した DFLD03E について、実測結果と HFSS によるシミュレーション結果との比較特性グラフ (Sdd11、Sdd21、Sec11、Sec21、GD21)、実測 S パラメータより得たノイズスペクトルおよび

PLTS ソフトウェアで実測・描画したアイパターンを図 2-13 に示す。ノイズスペクトルは、図 2-4 の Box に実測 S パラメータを代入し、25Gbps で回路シミュレーションしたものである。

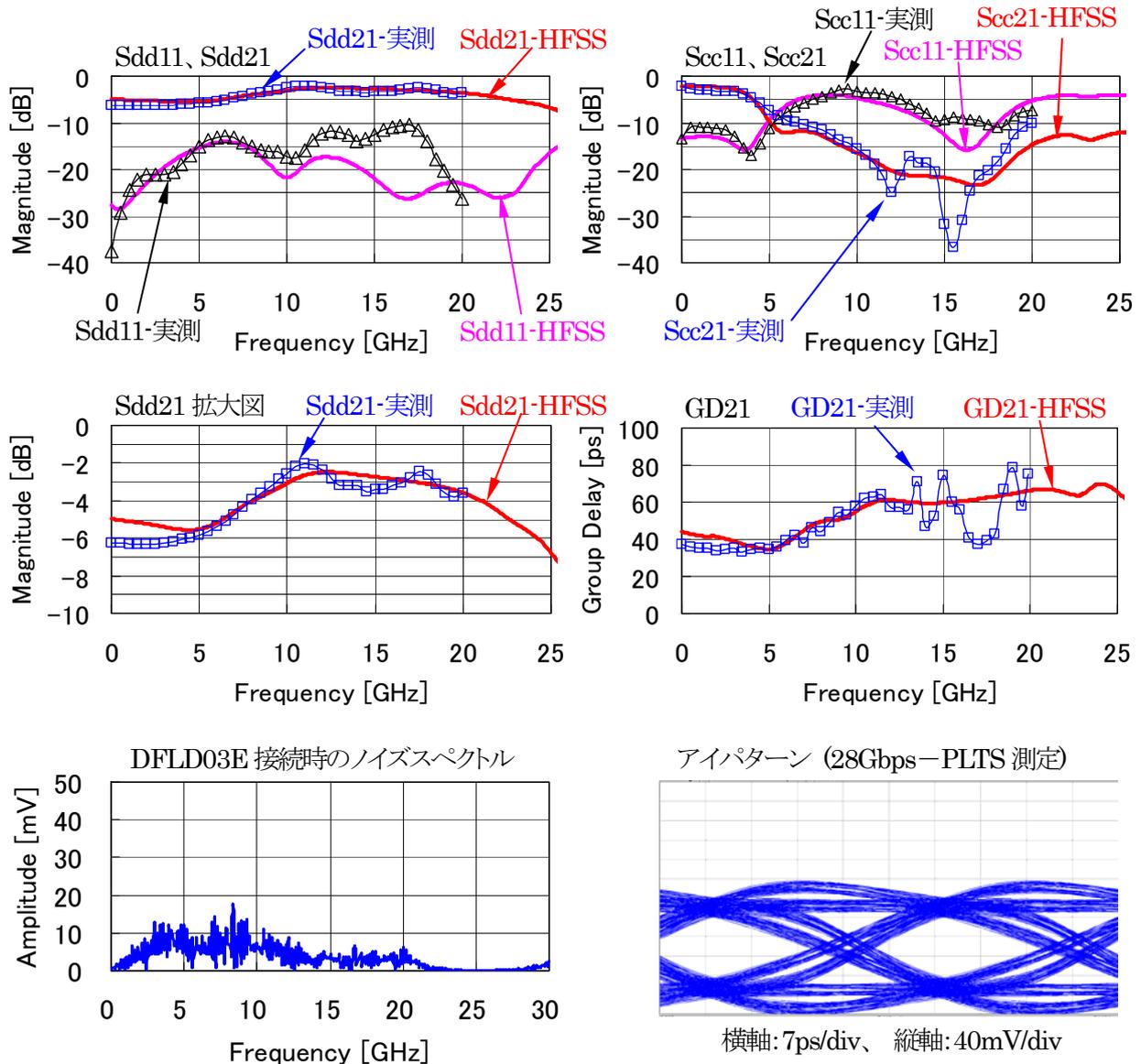


図 2-13 試作した DFLD03E の特性

技術目標 No. 1、3~6 に対する達成具合は

- No. 1 コモンモードノイズ除去特性(Scc21) : 4G~21GHz で 15dB 以上 ⇒ 断念
  - No. 3 差動信号通過特性(Sdd21) : 通過帯域 21GHz 以上 ⇒ 実力 21GHz で達成
  - No. 4 差動群遅延時間偏差 : 28G ビット/s アイパターンでジッタ 5ps 以下 ⇒ 9.9ps で未達成
  - No. 5 最小減衰量 : 12.5G~14GHz で 2dB 未満 ⇒ 減衰量 3dB 前後で未達成
  - No. 6 DC での減衰量 : 最小減衰量からさらに 3dB 以上減衰 ⇒ 減衰量差 3.1dB で達成
- 以上の結果より、DFLD03E はまだ設計見直しの余地があると言える。

②-2-3 DFLD04E の試作結果と技術目標値達成度検証

試作した DFLD04E について、DFLD03E と同様の特性結果を図 2-14 に示す。

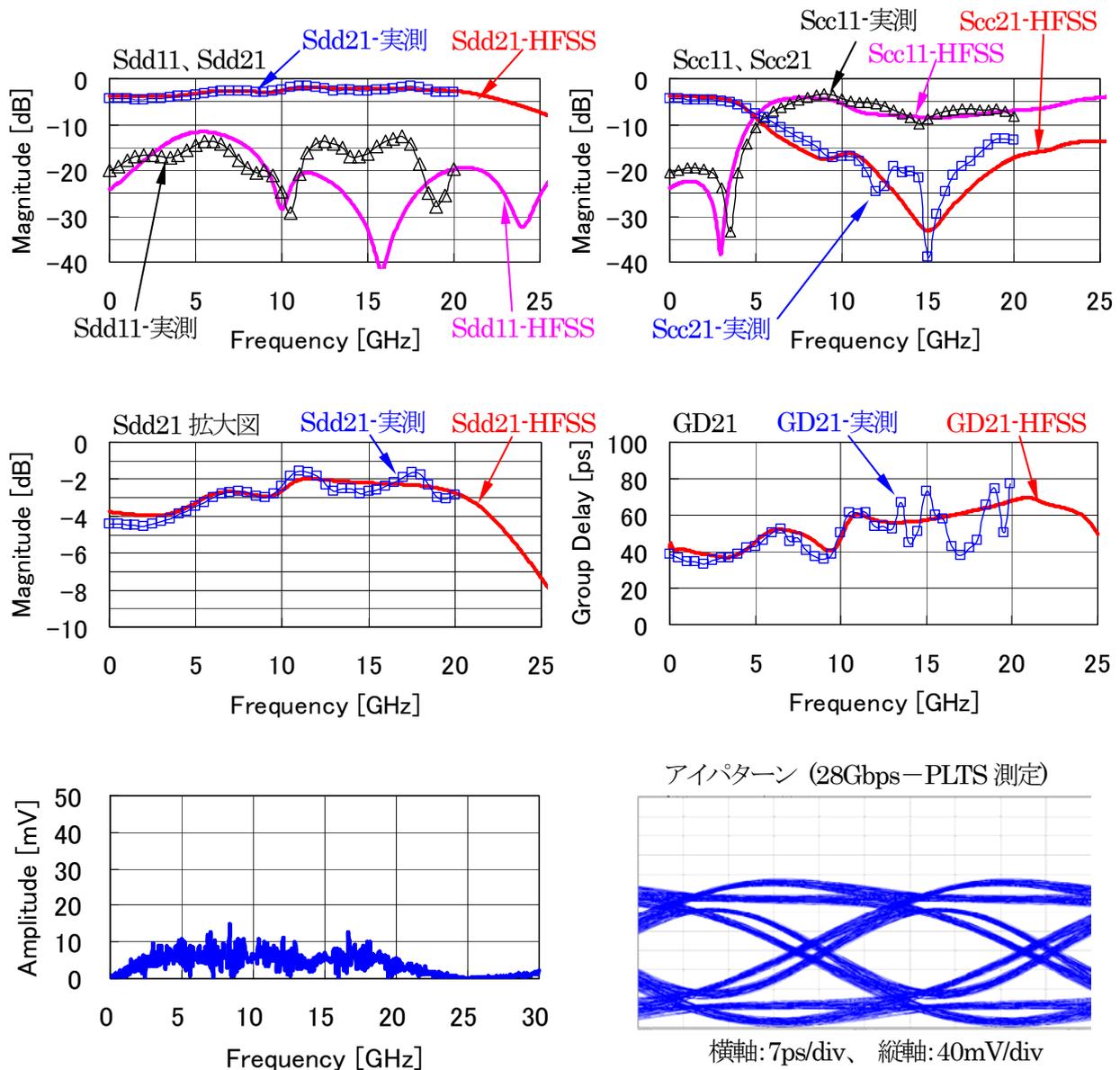


図2-14 試作したDFLD04Eの特性

技術目標 No. 1、3～6 に対する達成具合は

No. 1 コモンモードノイズ除去特性(Scc21) : 4G～21GHz で15dB以上 ⇒ 断念

No. 3 差動信号通過特性(Sdd21) : 通過帯域21GHz以上 ⇒ 実力20GHzで達成度95%

No. 4 差動群遅延時間偏差 : 28G ビット/s アイパターンでジッタ 5ps以下 ⇒ 7.8psで達成度64%

No. 5 最小減衰量 : 12.5G～14GHzで2dB未滿 ⇒ 12.5GHz : 2.3dB、14GHz : 2.5dBで若干未達成、達成度94%

No. 6 DCでの減衰量 : 最小減衰量からさらに3dB以上減衰 ⇒ DC-12.5GHz間の減衰量2.1dBで0.9dB不足、達成度90%

28Gビット/s アイパターンでのジッタが若干目標値を超えたが他の項目は概略達成、またノイズ除去特性もDFLD07Rに比べ大きく劣ることが無いことから、DFLD04Eは開発に成功したと判断する。

## 2-3 ③ シミュレーションと連携した 28G ビット/s、21GHz 超帯域の実測技術確立

### ③-1 接触式検査治具設計

接触式治具は、松江エルメックが独自に開発したものを、よりインピーダンス整合を図り、低損失化したもので、さらに計測機器メーカーのアジレント・テクノロジー社が発売しているソフトウェア PLTS (物理層テストシステム) を用いて、治具の影響を除去した。

そのため、治具の設計としては、

- ・ 既存の検査治具の損失を最小化する改良 ⇒ 基板材料に液晶ポリマーを使用
- ・ スルー治具を新たに設計 (PLTS で治具の影響を除去する際に必要)

の 2 項目で完了とした。

### ③-2 治具作成

作成した治具の外観写真を図 2-15 に示す。この治具単体の特性は、図 2-16 に示すような、ほぼ無損失のジャンパー部品を測定し、その測定結果から得られる損失および反射を治具単体の特性と判断する事で求めた。その結果、サブテーマ③の技術目標 「検査治具のリターンロス 20GHz で 15dB 以上」の達成度については、達成度 R=99%でほぼ達成 という結果が得られた。

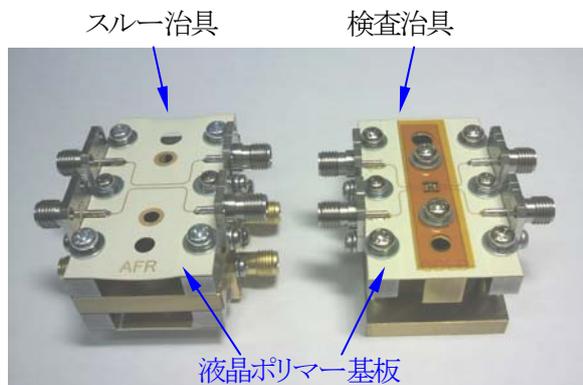


図 2-15 検査治具の外観写真

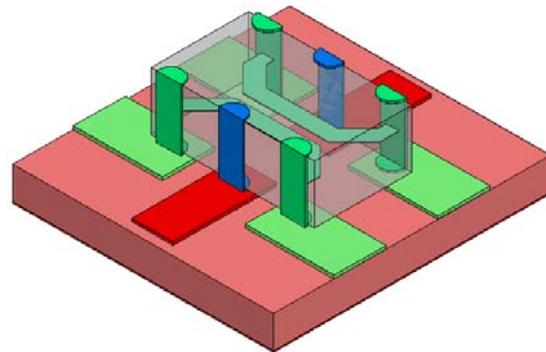


図 2-16 ジャンパー部品の構造図

### ③-3 特性評価

図 2-17 に測定系の全体像を示す。E8463A のみ既存設備の 13.5Gbps 差動 PRBS 信号発生器、その他は今回導入した設備で、N4876A は信号の周波数を 2 倍に通倍し最大 27Gbps の信号を生成するマルチプレクサー (MUX)、86100D はサンプリングオシロスコープで 86107A 精密タイムベースモジュールおよび 86118A サンプリングヘッドと組み合わせて使う。以上の装置は全てアジレント・テクノロジー社製である。

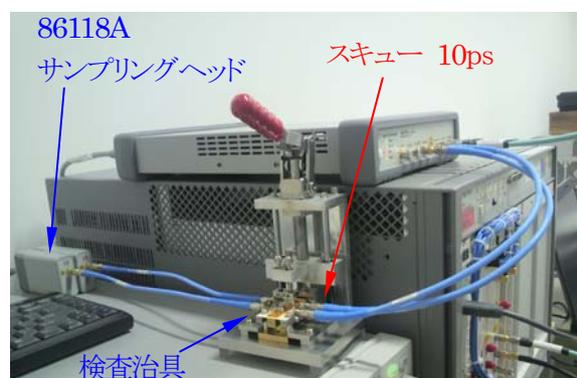


図 2-17 測定系の全体像

検査治具へは 10ps のスキューで信号が伝搬、検査治具上のコモンモードフィルタ通過後はスキューが解消されるので、オシロスコープ上でスキュー0s と観測されるよう、検査治具以降のケーブル長差も含めて調整している。この状態で、治具に各製品を搭載した場合の 2 ライン波形を図 2-18 に示す。ジャンパー部品ではスキューが発生しているが、DFLD07R ではスキューが解消され、DFLD03E、DFLD04E ではさらに振幅差も解消されている。

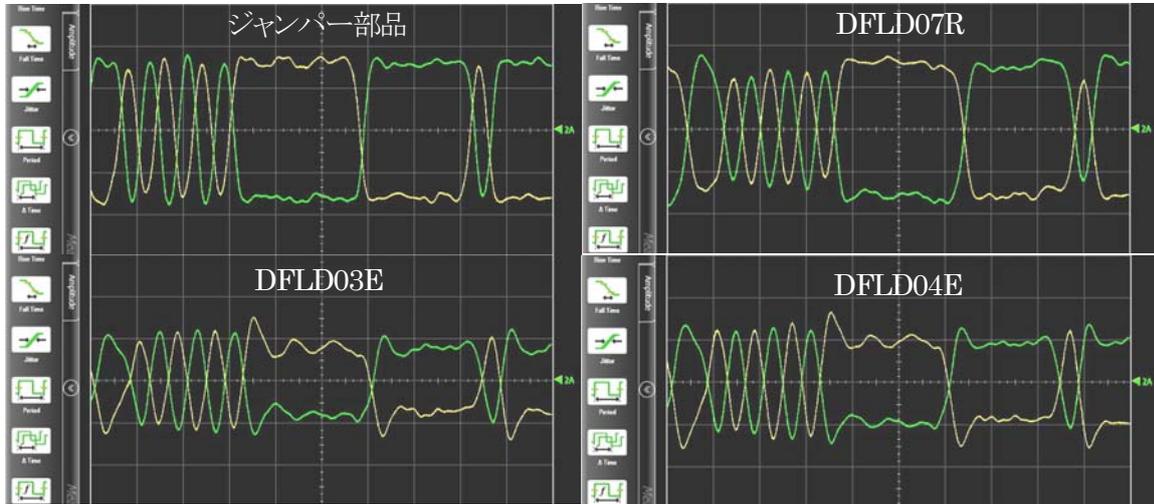


図 2-18 25Gbps 2 ライン波形 (横軸: 100ps/div、縦軸 200mV/div)

図 2-19 には、オシロスコープ内シミュレータでレシーバーに 1pF の容量性負荷を接続させた場合の各試作品番の 25Gbps PRBS 応答波形を示す。容量性負荷によって閉じたアイをイコライザで再び開かせる事に成功している。

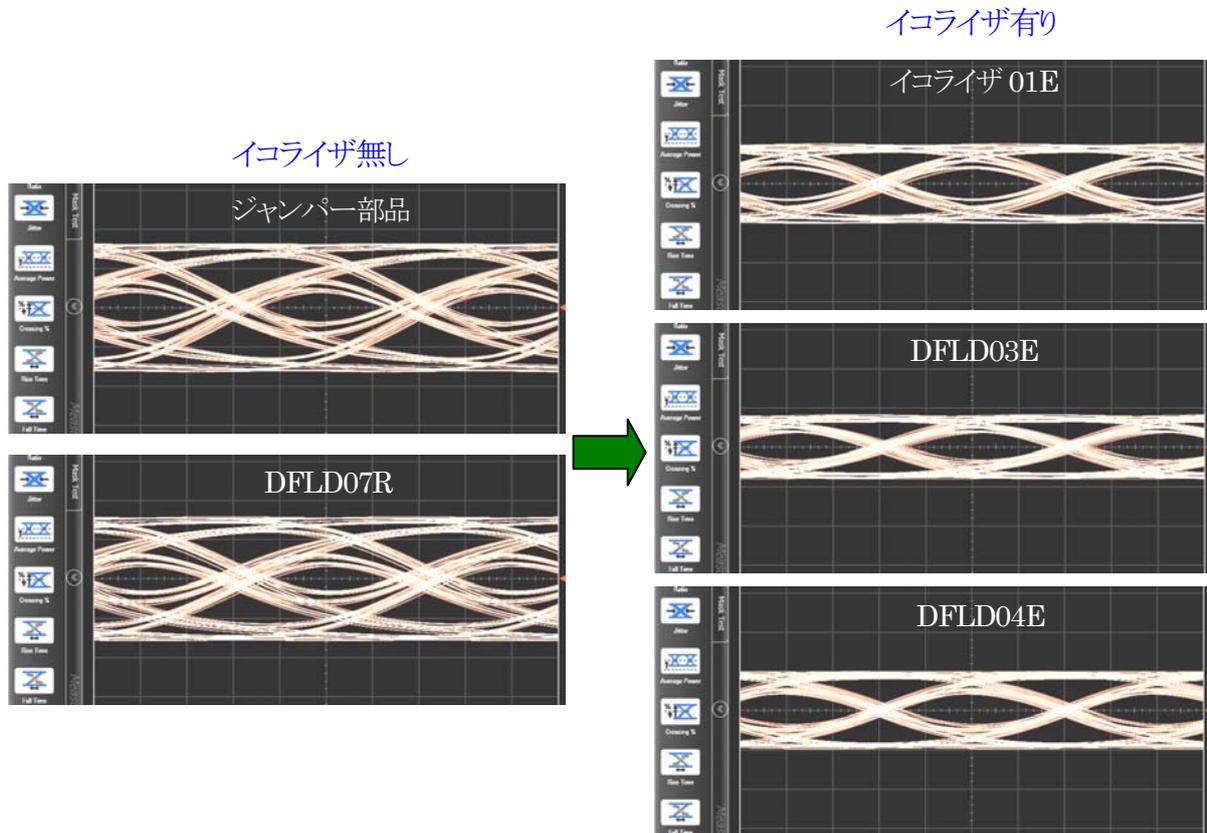


図 2-19 各製品の 25Gbps アイパターン (横軸: 10ps/div、縦軸: 200mV/div)

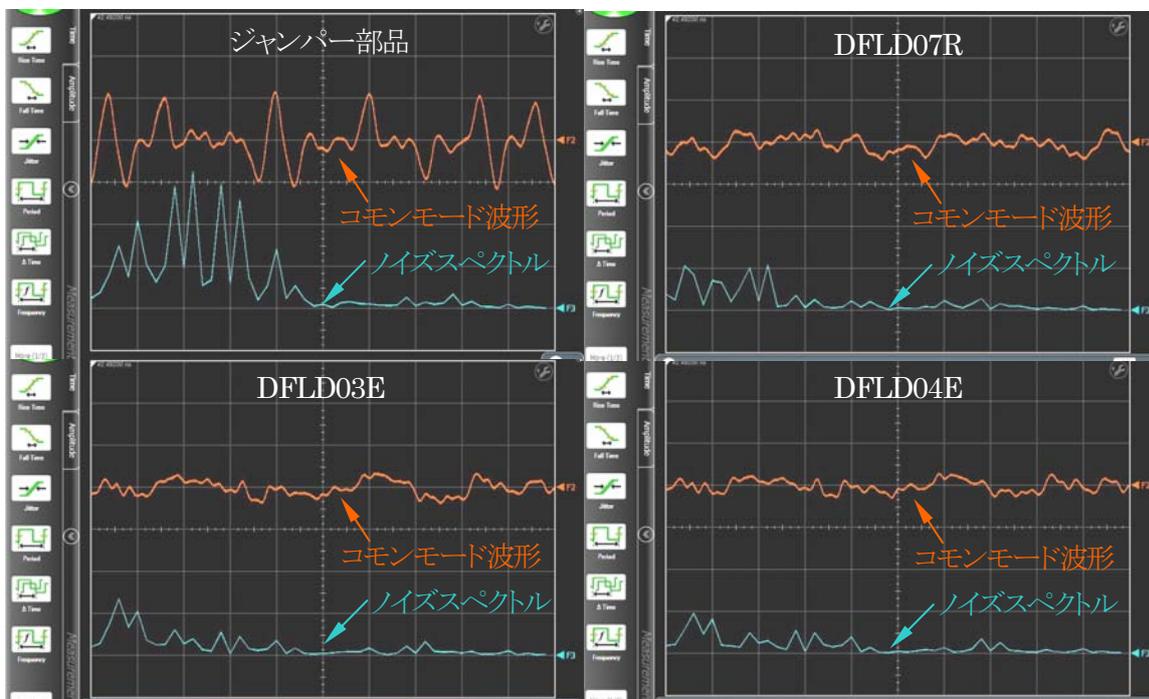
図 2-20 には、各試作品番の 25Gbps、スキュー10ps に対するコモンモード波形とノイズスペクトルを示す。DFLD07R については、実測 S パラメータと回路シミュレーションで求めたノイズスペクトル図 2-7 (左) と一致した傾向が得られている。

DFLD03E および DFLD04E については、ノイズ除去特性が DFLD07R を上回っている上、実測 S パラメータと回路シミュレーションで求めたノイズスペクトル図 2-13 (左下)、図 2-14 (左下) と比べても優れた特性である。この要因については今後調査が必要であるが、概ね良好なコモンモードフィルタが実現されたと考えて良い。

以上、25Gbps での特性評価では、

- DFLD07R、DFLD03E、および DFLD04E で、10ps のスキュー解消を確認、DFLD03E および DFLD04E では、振幅差の解消も確認
- DFLD01E、DFLD03E、および DFLD04E では、容量性負荷によって劣化したアイパターンを回復させる事を確認
- DFLD07R、DFLD03E、および DFLD04E ではコモンモードノイズ除去がほぼ目標通り実現できた事を確認した。

尚、本来は最大伝送速度の 27Gbps で評価すべきであったが、マルチプレクサ(MUX)の設定においてジッタの少ない波形を実現するためには、調整に大変な手間がかかり、時間的な制約もあつて、今回は 25Gbps で図のレベルの波形を得るまでが精一杯であった。また、ケーブル長差でスキュー20ps の設定も試みたが、時間的な制約もあり実現できなかった。27Gbps での評価およびスキュー20ps での評価は今後の検討課題とする。



コモンモード波形・・・横軸: 100ps/div、縦軸: 100mV/div

ノイズスペクトル・・・横軸: 5GHz/div、縦軸: 10mV/div

図 2-20 25Gbps コモンモードノイズ波形とノイズスペクトル

③-4 信頼性評価

③-4-1 マイグレーション評価

信頼性評価では、特にマイグレーションの発生の有無を重点的に確認した。イコライザにおけるマイグレーションの懸念箇所は、図2-10における容量Cの部位である。

このような箇所のマイグレーションの有無を確認するためには、実際の製品では R1 の並列接続が邪魔をして絶縁抵抗測定ができないため、容量C相当部だけを抽出した専用の評価用サンプルを作成する事が最良の策である。そこで、評価サンプル1として図2-21に示すような“イコライザ基礎実験サンプル”を試作した。このサンプルには抵抗膜も印刷し、抵抗率も同時に評価できるようにした。図中、S1(シート1)とS3の層厚が最薄層となっており、この層内でマイグレーションが起き易くなっている。

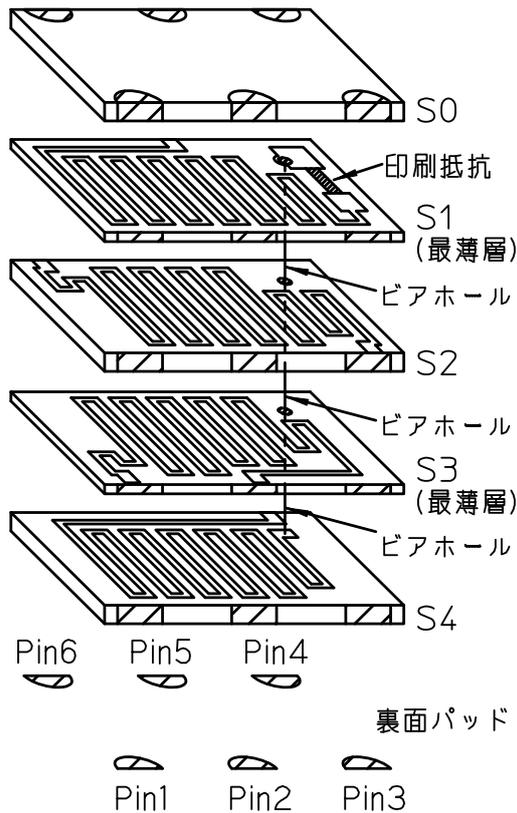


図2-21 評価サンプル1  
(イコライザ基礎実験サンプル)

さらにより完全を期して、平板パターン同士を積層した構造での試験を行った。平板同士を対向させて積層すると、導体面積が大きくなる分、セラミックシート上のボイドやピンホールに重なる確率が高まり、マイグレーションの発生確率も高くなる。

このような条件でもマイグレーションが発生しない事が確認できれば安心である。そのような目的の平板パターン対向サンプルとして図2-22の平板コンデンサおよび図2-23の実構造近似LC回路サンプルを作成、評価した。

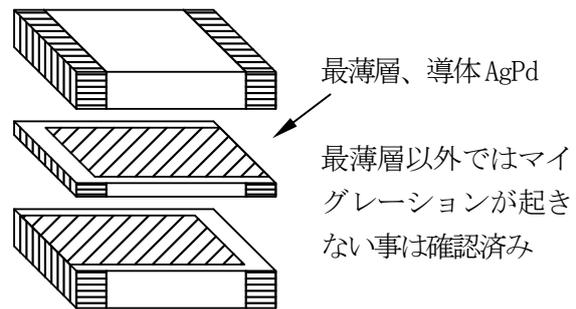


図2-22 評価サンプル2  
(平板コンデンサ)

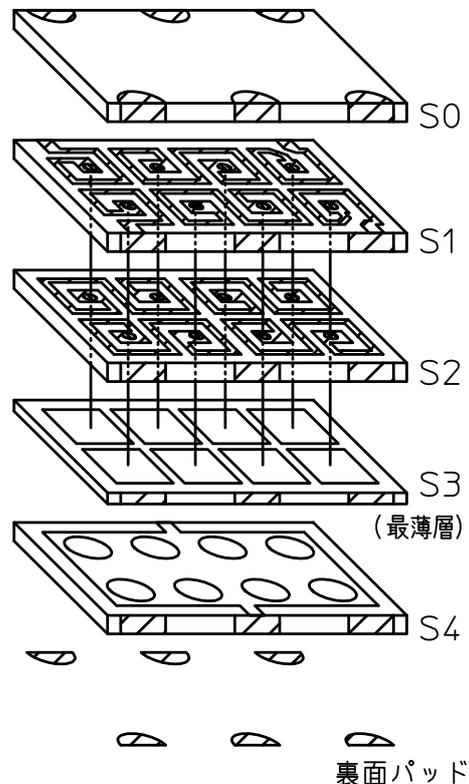


図2-23 評価サンプル3  
(実構造近似LC回路)

評価方法は、

- ・ HAST(プレッシャークッカー)、85°C、125%RH、100 時間、24V 印加
- ・ 耐湿負荷寿命、60°C、90-95%RH、1000 時間、2~12V 印加

のストレス印加前後での絶縁抵抗比較によって行い、信号ライン内の電位差程度であれば最薄層を用いても問題は無いという判定が得られた。

### ③-4-2 たわみ試験

機械的強度確認の為、表 2-2 及び図 2-24 の試験方法で、外部端子が 6 端子である DFLD07R と、4 端子であるイコライザ 01E の相当品(配置に違い有り)を使用してたわみ試験を実施した。結果を表 2-3 に示す。DFLD07R のたわみ試験では、問題は見られなかった。

表 2-2 たわみ試験条件

|      |                                    |
|------|------------------------------------|
| 基板   | 厚み 0.8mm                           |
| 加速時間 | 5mm/min                            |
| たわみ量 | 2mm(2mm で異常が無い事を確認。その後に、破壊ポイントを確認) |
| 静止時間 | 30sec 以上                           |
| 抵抗値  | 試験前後及び試験中にテスターで各ラインの抵抗値を測定         |
| 判定   | 外観：機械的損傷が無い事、電気的特性：断線が無い事          |

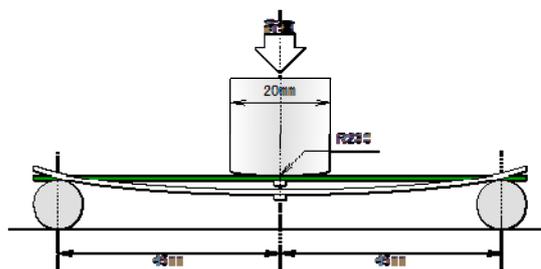
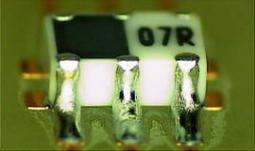


図 2-24 たわみ試験

表 2-3 たわみ試験結果(n=10)

| 端子形状           | 6 端子 (DFLD07R)   | 4 端子 (イコライザ 01E 相当品)   |
|----------------|--|--|
| 2mm たわみ後<br>外観 | 異常無し  | 異常無し  |
| 抵抗値            | 変動無し   | 変動無し   |
| 破壊ポイント (最小値)   | 8mm  | 5mm  |
| 判定             | OK   | OK   |

一般的には内部導体の多い構造の方がたわみには強い為、同じ 6 端子構造で DFLD07R より内部導体層の多い DFLD03E、DFLD04E についても特に問題は無いものと推測される。またイコライザ 01E については相当品での確認に留まった。端子の配置上、同等以上の強度を有しているものと思われるが、追って試験を行う予定である。

### ③-5 放射ノイズ測定

島根県産業技術センターの 3m 法電波暗室で 25G ビット/s ランダムパルス差動信号にスキューを発生させ、差動線路上にコモンモードフィルタが有る場合と無い場合で、放射電磁界スペクトルを測定・比較し、コモンモードフィルタの有効性を確認する事を目的とした。しかしながら評価基板自体が 12.5GHz のアンテナとなってしまう、放射スペクトルがノイズによるものなのか、信号によるものなのか区別できず、本事業期間内の有効性確認は実現できなかった。

## 2-4 試作品の使用材料リストと外観・寸法

表2-4 使用材料リスト

| 使用部位   | 材料名                       |
|--------|---------------------------|
| セラミック  | LTCC 材                    |
| 内部パターン | Ag ペースト、Ag/Pd ペースト、抵抗ペースト |
| 外部端子   | Ag ペースト                   |
| めっき    | Ni、Sn                     |

表2-5 DFLD07R 外観・寸法

| 部位 | 表面  |                   | 側面   |                 |
|----|---|-------------------|--|-----------------|
| 写真 |  |                   |  |                 |
| 寸法 | 長さ (μm)   | 2005.3 (設計値 2000) | 厚み (μm)  | 766.7 (設計値 770) |
|    | 幅 (μm)  | 1245.1 (設計値 1250) |  |                 |

表2-6 イコライザ 01E 外観・寸法

| 部位 | 表面   |                   | 側面  |                 |
|----|--|-------------------|---|-----------------|
| 写真 |  |                   |  |                 |
| 寸法 | 長さ (μm)  | 1993.7 (設計値 2000) | 厚み (μm)   | 775.5 (設計値 770) |
|    | 幅 (μm)   | 1237.7 (設計値 1250) |   |                 |

表2-7 DFLD03E 外観・寸法

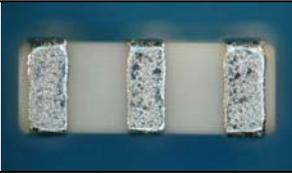
| 部位 | 表面  |                   | 側面   |                 |
|----|---|-------------------|--|-----------------|
| 写真 |  |                   |  |                 |
| 寸法 | 長さ (μm)   | 1999.0 (設計値 2000) | 厚み (μm)  | 799.5 (設計値 770) |
|    | 幅 (μm)  | 1258.1 (設計値 1250) |  |                 |

表2-8 DFLD04E 外観・寸法

| 部位 | 表面  |                   | 側面   |                 |
|----|---|-------------------|--|-----------------|
| 写真 |  |                   |  |                 |
| 寸法 | 長さ (μm)   | 2000.6 (設計値 2000) | 厚み (μm)  | 781.1 (設計値 770) |
|    | 幅 (μm)  | 1243.4 (設計値 1250) |  |                 |

## 第3章（最終章） 全体総括

### 3-1 結論

- (1) 28Gbps 超高速シリアル伝送向けに、
  - ・ コモンモードフィルタ DFLD07R
  - ・ イコライザ 01E
  - ・ イコライザ内蔵コモンモードフィルタ DFLD04Eを開発し、概略当初の計画通りの製品開発に成功した。  
イコライザ内蔵コモンモードフィルタ DFLD03E も開発を試みたが、こちらは満足に行く特性が得られず今後の補完研究の課題となった。
- (2) 上記製品を測定するための検査治具開発については、PLTS ソフトウェアとの組合せで、ほぼ技術目標を達成した治具・測定系の開発に成功した。
- (3) 本事業で導入した測定器を用いて上記製品の 25Gbps での実測を行い、コモンモードフィルタによるスキュー解消、コモンモードノイズ除去が実現されている事を確認、イコライザによる振幅の均等化および閉じたアイパターンを開かせる事に成功した。  
しかし、MUX の設定技術がまだ不十分で、最大伝送レート 27Gbps での実測はできなかった。これについては今後の補完研究の課題とする。
- (4) 上記製品での最大懸念材料である最薄層間のマイグレーションについて、各種信頼性試験を行い、マイグレーションの心配は無い事を確認した。また、たわみ試験を行い、機械的強度も問題無い事を確認した。
- (5) 放射ノイズ測定は、評価基板自体がアンテナとなって、正しい測定が行えなかった。本件は今後の補完研究の課題とする。

### 3-2 研究開発後の課題と事業展開

研究開発後の課題と事業展開は

- (1) 内部印刷抵抗の安定化  
印刷抵抗膜は焼成時のガラス成分拡散により、狙い値通りに成形できない場合がある。量産時には抵抗値をより安定化させる焼成条件の検討等も必要である。
- (2) 波形補正最適化  
今回開発したイコライザは、スキューによる振幅差の解消、および容量性負荷によって劣化したアイパターンの回復には有効である事が確認されたが、基板配線での伝送ロスにより発生した振幅差の解消・アイパターン回復にも有効となるよう群遅延特性等を最適化する必要がある。
- (3) IC イコライザ調査・比較  
上記(2)で述べた、伝送ロスによるアイ劣化対策としては、IC 内にデジタル的なイコライザを内蔵する方法も普及しつつあるので、IC イコライザの性能を正しく理解し、その長所・短所を詳細に把握する必要がある。
- (4) 実機に近い状態での評価  
本開発品が実機で正しく動作し、有効に機能する事を確認する必要がある。当面は、28Gbps 対応トランシーバ IC のシミュレーションモデルを入手し、回路シミュレーションで検証する事を目標とする。
- (5) 事業展開  
独立行政法人 中小企業基盤整備機構による販路開拓支援コーディネート事業を活用しての商品紹介を中心に、Web 掲載、自社販路での顧客訪問等で本開発品の認知度を高める。

## 参考文献

- [1] 弓仲康史, ” 通信・信号処理技術をチップ内／間高速高効率情報伝送に利用した集積回路システムの構築 “ 電気通信普及財団 研究調査報告書 No. 23、p605、図4、2008年
- [2] アジレント・テクノロジー (株) アプリケーションノート, ” Infiniium 9000A シリーズ・オシロスコープでのイコライザー手法の使用 “、pp6-17、2009年
- [3] MAXIM 社 データシート, ” MAX3787 バックプレーン及びケーブル用 1Gbps~12.5Gbps パッシブイコライザ ”、p13、図4、2005年

## 付録 専門用語の解説

ビット/s・・・bps (Bit Per Second)と略して表記するのが一般的。データの伝送レートを示す。0 と 1 が交互に繰り返すパルス波形の半周期が 1 ビットに相当、1 周期は 2 ビットとなり、ビットが 1 秒間に何回発生するかを意味する。繰り返し周波数  $F$  [GHz]であれば  $2F$  [bps] となる。実際のデータは 0 や 1 が連続し、その間はパルス幅が広がって繰り返し周波数は低くなるが、データとしては 0 や 1 が複数ビット分連続して発生しているため、1 秒間に発生するビットの数は一定である。

差動信号・・・2 本の線路に極性の異なる対称な波形を伝搬させる伝送方式、ノイズ耐性が高く高速伝送が可能となる。2 本の線路間は接近させて電磁界結合させるため、波形対称が維持されれば不要な電磁波放射が抑制される。

コモンモードノイズ・・・差動信号中に含まれる不要な同相信号成分の事。高速差動伝送において、2 本の線路間にわずかでも波形対称性の差が生じると、コモンモードノイズが発生する。コモンモードノイズは非常に放射性が高く、近隣の回路を誤動作させるといった問題を引き起こす要因となる。

スキュー・・・一般的には、複数の信号間のタイミングずれを意味するが、ここでの意味は、差動信号の対称性が崩れ、正相信号と負相信号間で立上り/立下りエッジに時間差が生じる事。これによりスキューが発生している間は差動信号がコモンモードに変化、コモンモードノイズが発生する。

高速シリアル(差動)伝送・・・複数ビットのデータ線で構成されるパラレルデータを逐次データに並び替え、1 本データ線で伝送する伝送方式。IC 内部では、複数のデータ線を使ってクロック周期毎に各データ線の論理を読み取りデータ値を認識するパラレルデータ処理だが、パラレルデータ方式はクロックとデータとのタイミング、データ線間のタイミングを合わす必要があり、IC 内部では設計時点で合わし込めるものの、IC の外に出してしまうと、IC ユーザーの設計技術力によってはタイミングが合わなくなってデータが正しく伝わらなくなる恐れがある。そのような懸念を取り除くため、データをパラレルからシリアル(逐次)に変換して IC から出力する方式が普及している。0 と 1 の繰り返しが一定の割合で起こるようデータ変換し、受信データからクロックを再生する。パラレルデータをシリアルデータに変換するだけではデータ転送レートが落ちるため、データ転送レートも高速化し、高速伝送実現のために差動信号とする。

コモンモードチョークコイル・・・磁性体ボビンに差動 2 ライン分の導線ペアをコイル状に巻いた構造のものや、磁性体シートに渦巻き状の平面コイルを 2 個形成し、それら 2 個を接近させた構造のもので、どちらの構造も、図 1-3 の等価回路で表される。この等価回路に示されるとおり、2 個のコイルは、差動信号に対して低いインダクタンス、コモンモードに対して高いインダクタンスとなるよう、結合係数を 1 に近い値になるよう構成される。そのため、磁性体を使う事が必須となる。

10Gbps 超伝送に必要な周波数帯域・・・10Gbps 超では、単発 1 ビットパルス、すなわち 1UI 波形はパルス形状を維持できず正弦波状になる事が多い。そこで 1UI 波形のみ正弦波状になる事を許容し、2UI 波形以降はパルス形状を維持するという波形品位を得るための条件。そのためには 2UI 波形は信号周波数の 3 次高調波を損失なく伝播できる事が必要となる。すなわち必要な周波数帯域は、2UI 信号周波数の 3 倍の周波数であり、言い換えれば 1UI 信号周波数の 1.5 倍の周波数となる。

スキューによる差動振幅減少・・・スキューが発生すると、差動モードからコモンモードへのモード変換が発生し、差動モードのエネルギーが減少する。そのため差動信号の立上り/立下りが鈍り、特に 1UI 波形の振幅が減少する。その減少具合は図 A-1 のとおりとなる。図 A-1 は、差動信号が伝播遅延差 20ps すなわちスキューが 20ps の伝送線路を通過した後の差動信号振幅を回路シミュレータで求めたものである。図からわかるように 25GHz で差動信号振幅が 0 となるのは以下の理由による。

25GHz では信号の半周期が 20ps であり、20ps スキューは 25GHz の信号を丁度 180 度位相シフトさせるので、出力差動信号は完全同相状態、すなわち 100%コモンモード信号となって差動信号成分が 0%となる。この減衰カーブに従って、1UI 信号の減衰率が表 1-2 の通りに求まる。

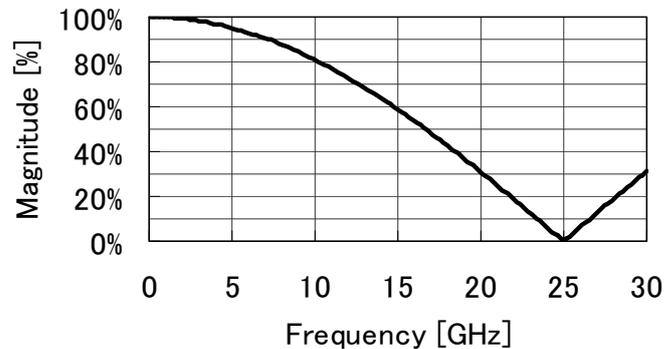


図 A-1 20ps スキューの伝送線路での差動信号通過特性

アイパターンおよびアイパターン劣化・・・データ信号はいろいろなパルス幅を持っているが、その立上り/立下りエッジ（以下エッジ）はクロック周期と一致する事を応用して、クロック 1 周期分のプロットエリア内にエッジを移動し重ね合わせたもの。理論上は全てのエッジが重なる。ここで、データの周波数成分毎にエッジの位置が異なるとエッジが時間軸方向に広がり、これをジッタと呼ぶ。ジッタが大きくなると、エッジが複数の線で非常に広がったように見え、最悪の場合、それらの線で塗りつぶされたような波形となる。このようになる事をアイが閉じると言い、逆にエッジがきれいに重なる場合アイが開くと言う。

群遅延特性・・・入力信号に対する出力信号の位相変化を周波数で微分した値。伝搬遅延時間の周波数依存性とほぼ同じ特性を示すが、微分量になるため、位相変化のわずかな変化に対して、伝搬遅延時間以上の変化となって現れるので、位相変化の暴れを検出し易い。

リターンロス・・・4 端子回路に入力した電力のうち、インピーダンスミスマッチで反射した電力の割合

マイグレーション・・・電界の影響で金属成分が絶縁体の上や中を横切って移動する現象。セラミック積層部品では、内部導体に Ag（銀）を使う事が多く、電位差のある導体パターン間に電界が発生し、その導体間隔が狭く、しかも導体間を埋めるセラミックにピンホール等の空間があると、Ag 成分がその空間に広がり、最悪の場合は導体間のショートを引き起こす。

S パラメータ・・・回路網の通過・反射電力特性を表現したもので、周波数 vs 振幅・位相等の記述となる。散乱行列あるいは散乱パラメータとも言う。