

# OFDM 適用 VLSI システム内超高速伝送

研究代表者 飯島洋祐 小山工業高等専門学校 電気電子創造工学科 講師

## 1 はじめに

現在、大規模集積回路 (Very Large Scale Integration ; VLSI) システムの高性能化に伴い、プリント基板上などの電気配線における超高速デジタル通信の要求が高まってきており、数十 Gbps (bit/second) 以上の高速化が進んできている。例えば、バックプレーンなどにおける電気配線における高速通信 (IEEE 802.3cd) では 50~200 Gbps (bit/second) の高速化が進んでおり、今後更なる高速化が要求されている。しかしながら、電気配線上における高速伝送においては、マイクロストリップ線路などの伝送路の高周波数領域での表皮効果や誘電損などに起因する高周波数減衰や、伝送路間の不整合などの影響やクロストークなどによるノイズの影響が問題となる。具体的には、伝送路の高周波数減衰等の影響によって、受信端での伝送波形に歪みが生じることで符号同士が干渉してしまう。これを符号間干渉 (Intersymbol interference ; ISI) <sup>[1]</sup> と呼び、高速化に伴って符号間干渉の影響が増加する事で受信端での正確なシンボル判定が困難となる。図 1 に、電気配線における符号間干渉の影響についての概要を示す。図 1 に示すように、電気配線の低域通過特性の影響によって、送信パルス波形は受信端にて歪んでしまう。この影響によって、受信端には正確な符号判定が出来ず、ビットエラーを生じる。さらに近年、通信の大容量化に伴い、電気配線上などにおける高速伝送に多値伝送方式が広く採用されてきている。特に、従来の 0/1 の 2 値 (バイナリ) 伝送から 00/01/10/11 の 4 値の振幅変調 (Pulse amplitude modulation-4 ; PAM-4) による伝送方式が広く適用されてきている。多値化する事によって、1 シンボル当たりの情報量を増加させる事ができるため、バイナリ伝送に比べて PAM-4 では同じ伝送周波数にて 2 倍の情報量を伝送可能になる。同じ情報量を伝送する上では、通信のナイキスト周波数を低周波数化する事が可能になり、それによって伝送路の高周波特性による悪影響を低減できる。しかし、PAM-4 などの振幅方向での多値化では、シンボル間距離が近くなることで受信端での雑音の影響が増加し、SNR が悪化してしまう問題がある。PAM-4 伝送では、バイナリ伝送に比べてナイキスト周波数を 1/2 に低周波化できるが、各シンボル間の距離は約 1/3 に減少してしまう。これらの問題に対し、これまでに種々の伝送技術が検討されてきており、特に受信端での ISI の影響を除去するための送受信イコライザ技術の研究開発が進められてきている。例えば、送信側にてデジタル信号処理にて伝送路の逆特性の処理を施すことで、受信端での歪みを除去する事が可能である<sup>[2][3]</sup>。更に、DFE などの受信端で符号間干渉が除去可能な手法が開発されてきており、VLSI システムへの適用が検討されてきた。

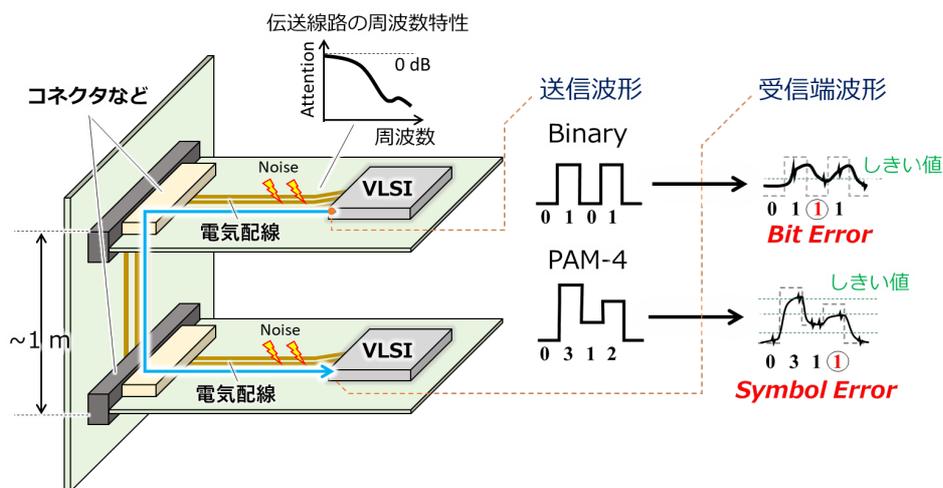


図 1 ボード間伝送における符号間干渉の概要

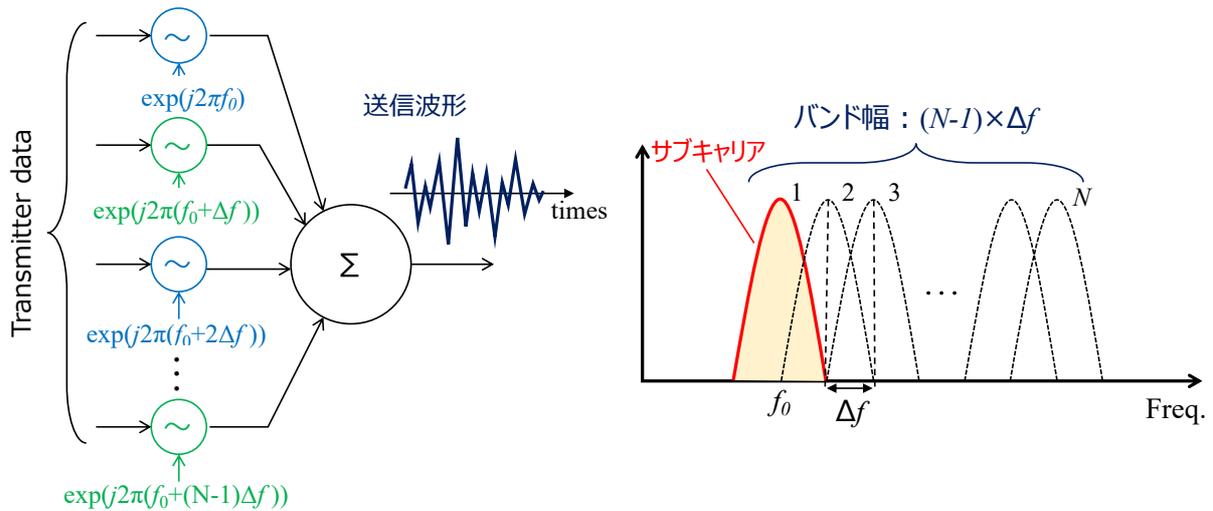
しかしながら、従来の PAM 伝送では、今後の通信の高速化に対応するためには送受信回路の高周波数化が

必要であり、高周波数化に伴って伝送路の符号間干渉等の影響が大きくなるため複雑な波形整形が必要となってしまう。そこで、本研究調査では、VLSI システム内における通信の高速化に向け、多重化方式を適用した高速デジタル伝送について基礎検討を実施する。具体的には、主にマルチパス等の影響が伴う無線通信に用いられている OFDM (Orthogonal frequency division multiplexing) 伝送方式について、VLSI システム内の高速デジタル伝送への適用を検討する。電気配線における OFDM 方式の検討では、これまでに例えば伝送路特性が悪い環境下での通信が必要な電力線通信や 10GBase-T イーサネット<sup>[4]</sup>などへの適用が検討されてきている。本研究調査では、主に VLSI システム内におけるボード間伝送を想定し、マイクロストリップ線路上での通信について実測特性に基づく解析を実施する。さらに、測定器連携による実測評価を実施し、OFDM 伝送を適用した VLSI システム内高速伝送への有効性および実現可能性を検証する。

## 2 周波数直交分割多重方式による伝送システム

### 2-1 周波数直交分割多重方式を用いた伝送システムの概要

直交周波数分割多重 (Orthogonal frequency division multiplexing ; OFDM) とは、複数の異なる周波数 (サブキャリア) を用いてデータ系列を周波数多重化して送信する伝送方式である。OFDM 伝送方式の特徴は各サブキャリア間に直交関係がある事であり、それによって受信端にて三角関数の関係式から特定の周波数成分を抽出する事が可能である。図 2 に OFDM 伝送方式の概要を示す。図 2 に示すように、OFDM 送信機では、送信データを直交する異なるサブキャリア信号で変調させ、それらを合成して出力する。その結果、OFDM 送信機の出力波形のスペクトルは、図 2(b) に示すようにサブキャリア数を  $N$  とした場合には OFDM 信号全体のバンド幅は  $(N-1) \times \Delta f$  となる。ここで、 $\Delta f$  はサブキャリア間の周波数である。このように、OFDM では、直交関係を利用した周波数多重化を行う事で、ガードバンドの必要がなく、周波数帯域を効率的に利用したデータ伝送が可能である。



(a) OFDM 送信機の概要

(b) OFDM の出力スペクトルの概要

図 2 OFDM 伝送方式の概要

次に、一般的なベースバンド OFDM の OFDM シンボル信号を示す。

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \{a_n \cos(2\pi n f_0 t) - b_n \sin(2\pi n f_0 t)\}$$

上式において、 $N$  はサブキャリア数であり、 $a_n$  と  $b_n$  は  $n$  番目のサブキャリアにおける送信データである。ベースバンド OFDM では、 $N$  組のサブキャリア信号を重ね合わせが出力波形となる。このため、送信端の出力信号は不規則的なランダム波形となるが、受信端においては同期を取ることで、各サブキャリアの直交関係によりシンボルを正確に取り出す事ができる。図 3 に、ベースバンド OFDM 送受信システムの構成を示す。OFDM の送受信回路は逆高速フーリエ変換 (IFFT) と高速フーリエ変換 (FFT) を用いる事で、OFDM 送受信回路をデ

デジタル回路にて比較的シンプルに構成する事が可能である。図3に示すように、送信側では入力データ系列に対してシリアル-パラレル変換 (S/P 変換) を施し、IFFT に入力する。IFFT を施す事で、サブキャリア毎に割り当てた送信データを合成して時間軸波形 (OFDM シンボル) に変換する。受信側では、受信波形を FFT 処理する事で、各サブキャリアに割り当てられたデータを取り出す事が可能である。

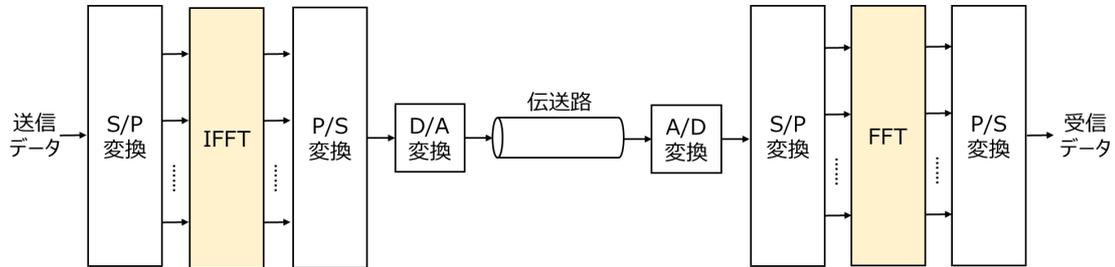


図3 OFDM 送受信システムの構成

### 2-2 1 次変調に PAM 伝送方式を適用したベースバンド OFDM 伝送システムの概要

本研究調査では、1 次変調に多値 PAM 伝送方式を適用し、OFDM にて周波数多重化した伝送方式についての有効性を検証する。図4に本研究調査にて検討した伝送システムの概要を示す。図4に示すように、2 ビット毎のデータを 4 値 PAM (PAM-4) にて 1 次変調を施し、それらを OFDM にて周波数多重化する。本検討では、ベースバンドを含むサブキャリア数を 8 とし、各サブキャリア (同相 (I) 成分、直交 (Q) 成分) に割り当てる情報ビットを 2 ビットとした。このため、OFDM シンボルあたりの情報ビットは 2 ビット (ベースバンド) + 2 ビット × 7 (サブキャリア) × 2 (I 成分、Q 成分) になる。本研究調査では、図4の構成にて、伝送路の低域通過特性による符号間干渉の影響を考慮した伝送解析を実施し、VLSI システム内の高速デジタル伝送への有効性を検証した。

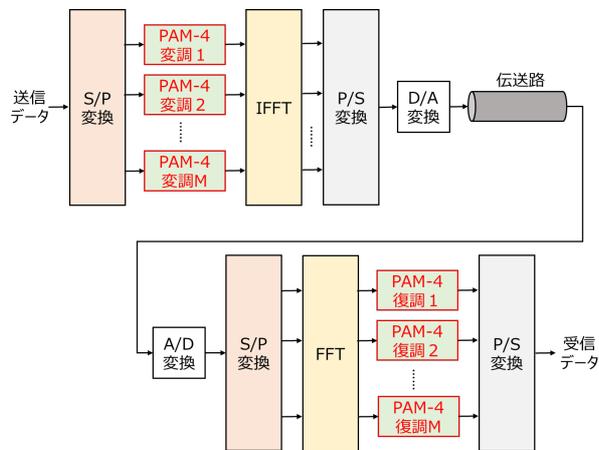
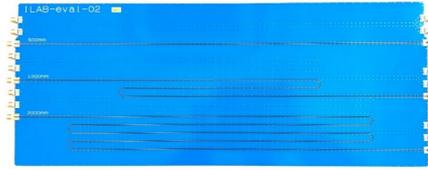


図4 1 次変調に PAM 伝送方式を適用した OFDM 伝送システムの概要

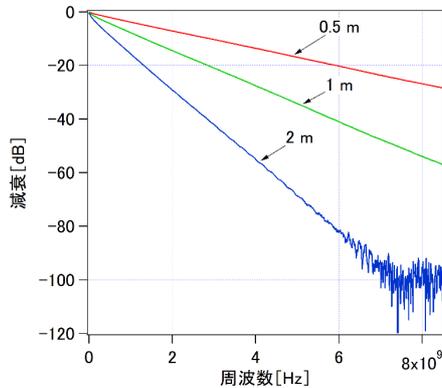
## 3 マイクロストリップ線路上での実測に基づく伝送評価実験

### 3-1 マイクロストリップ線路の実測値に基づく評価

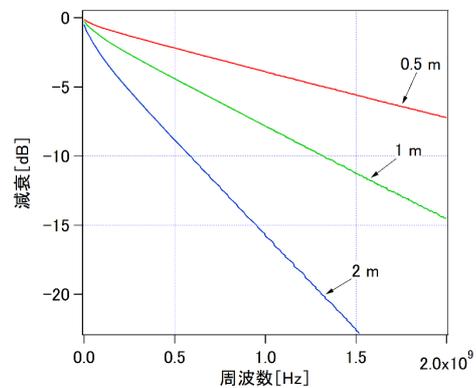
本検証実験では、実際に試作したマイクロストリップ線路 1 m を用いて、ネットワークアナライザにて実測した周波数特性を用いたシミュレーションにて伝送解析を実施した。図5に検証実験で使用したマイクロストリップ線路と、ネットワークアナライザで実測した周波数特性を示す。本研究調査で使用したマイクロストリップ線路では 2 GHz で約 -15 dB、4 GHz で -27 dB の減衰を示す。シミュレーションでは、図5に示す周波数特性の実測値からインパルス応答波形を導出し、インパルス応答波形と送信波形との畳み込みにて伝送路の低域通過特性を考慮した伝送解析を実施した。



(a) 評価用マイクロストリップ線路基板の外観 (0.5 m、1 m、2 m)



(b) マイクロストリップ線路 1 m の周波数特性



(c) 周波数特性の拡大図

図 5 評価用のマイクロストリップ線路基板とその周波数特性の実測値

本研究調査では、数値解析ソフトウェアである MATLAB を用いてシミュレーションを実施した。本シミュレーションでは、OFDM シンボル長を 10 nsec、サブキャリア間隔を 100 MHz とした。図 6 に OFDM の送信波形と、マイクロストリップ線路 1 m を伝送させた受信端での伝送波形のシミュレーション結果を示す。図 6 に示すように、OFDM の送信波形は不規則なランダム波形になる。受信端波形では、伝送路の周波数特性の影響によって送信波形が減衰して歪みが生じており、実測した周波数特性に基づく解析によって実際のマイクロストリップ線路の符号間干渉の影響を含む解析を実施している。図 7~14 には、サブキャリア毎にデータ (+1) を送信した時の、サブキャリア毎の受信シンボルを示す。図 7 はベースバンドにおける復調した値を示し、図 8~14 はサブキャリア毎の同相 (I) 成分、直交 (Q) 成分の復調した値を示す。これらの結果から、符号間干渉の影響を受けずに、受信端にて各サブキャリアのデータを復調できる事がわかる。

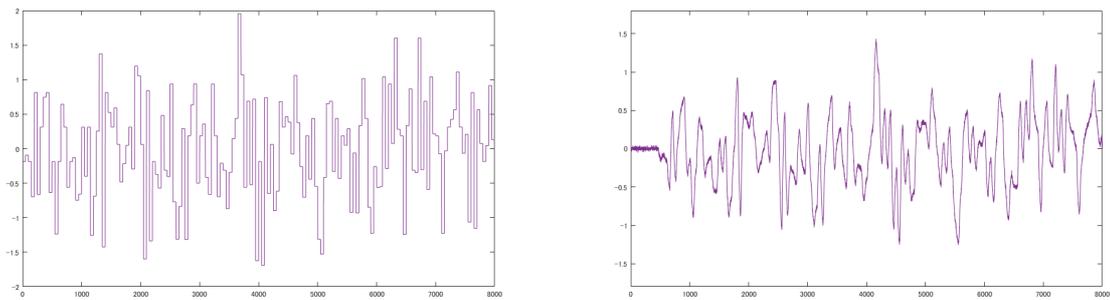


図 6 送受信端波形のシミュレーション結果 (左: 送信端波形、右: 受信端波形)

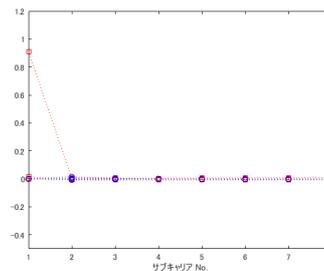


図 7 ベースバンドでの受信シンボル

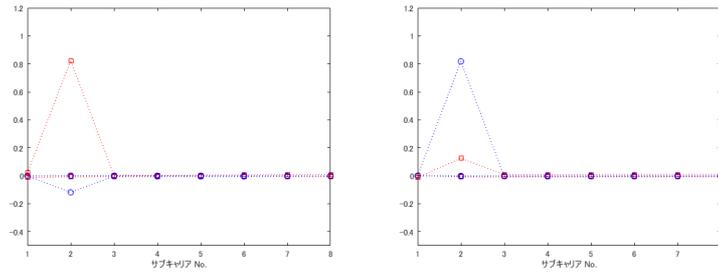


図 8 サブキャリア 1 での受信シンボル (左 : I 成分、右 : Q 成分)

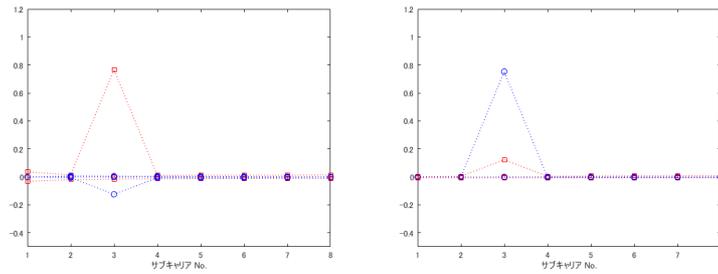


図 9 サブキャリア 2 での受信シンボル (左 : I 成分、右 : Q 成分)

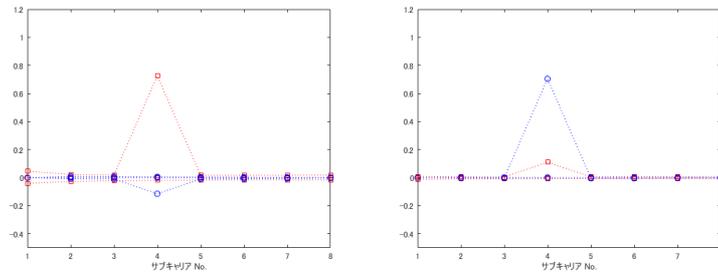


図 10 サブキャリア 3 での受信シンボル (左 : I 成分、右 : Q 成分)

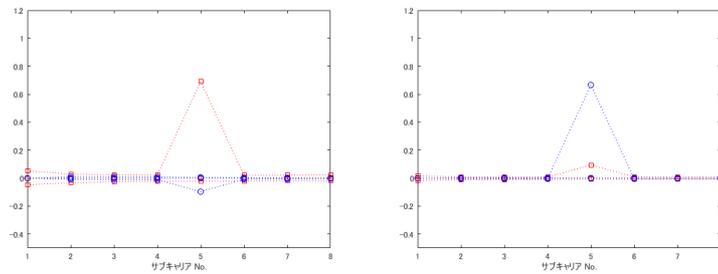


図 11 サブキャリア 4 での受信シンボル (左 : I 成分、右 : Q 成分)

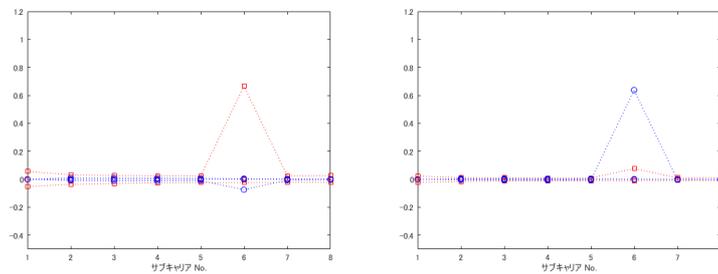


図 12 サブキャリア 5 での受信シンボル (左 : I 成分、右 : Q 成分)

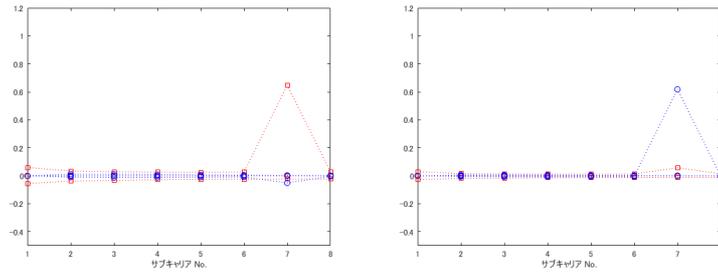


図 13 サブキャリア 6 での受信シンボル (左 : I 成分、右 : Q 成分)

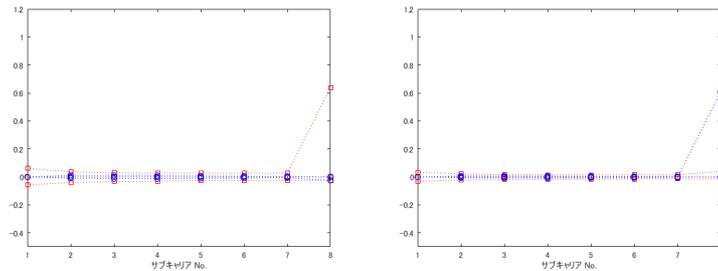


図 14 サブキャリア 7 での受信シンボル (左 : I 成分、右 : Q 成分)

#### 4 測定器連携による実測評価システムでの実験

本研究調査では、MATLAB と測定器を連携させ、シミュレーション結果を実測波形にて検証するための評価システムを構築した。図 15 に示すように、オシロスコープ (Agilent DS09404A) と任意波形発生器 (Agilent 81180B) を MATLAB Instrument Control Toolbox にて連携させ、OFDM 伝送を実測にて評価可能とした。具体的には、シミュレーションにて生成した OFDM 出力のシンボル波形を任意波形発生器にて出力し、実際の伝送路 (マイクロストリップ線路 1 m) の伝送波形をオシロスコープにて実測して MATLAB に取り込み、OFDM 伝送を実測ベースで評価可能とした。図 16 にシミュレーション結果と実測結果の比較を示す。図 16 に示すように、実測ではシミュレーションに比べて干渉や雑音の影響が増加しているが、シミュレーション同様に受信端にてサブキャリアの情報が復調できており、シミュレーションの妥当性を確認できた。



図 15 オシロスコープと任意波形発生器と連携させた実測システム

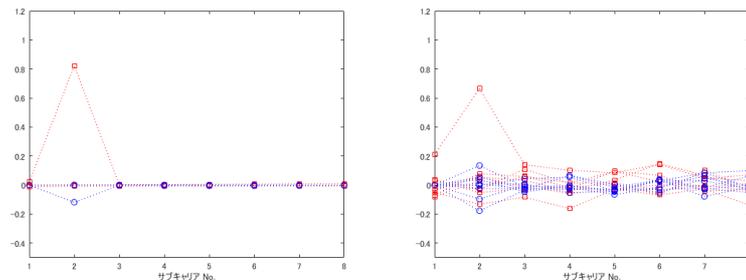


図 16 OFDM 受信シンボル (左 : シミュレーション結果、右 : 実測結果)

## 5 まとめと今後の発展

本検討では、VLSI システム内に向けた OFDM 伝送方式を適用した高速デジタル伝送技術の基礎検討を実施した。具体的には、VLSI ボード間伝送を想定し、マイクロストリップ線路上の伝送評価を MATLAB シミュレーションおよび実測に実施した。実測のマイクロストリップ線路の周波数特性を用いる事で、実配線の低域通過特性による符号間干渉の影響を含めたシミュレーション評価を実現した。さらに、オシロスコープと任意波形発生器とを MATLAB と連携させ、測定器連携による実測評価システムを構築した。シミュレーションと実測の結果、VLSI システム内のボード間伝送に対し、OFDM を適用する事で電気配線上の高周波特性の影響を抑えつつ、通信の大容量化が期待できることを確認できた。特に、今後の高速デジタル伝送方式の標準となる PAM-4 伝送では通信の大容量化には通信周波数の高周波数化が必要になるのに対し、OFDM 伝送方式では低周波数信号を用いて多重化できる事で伝送路の符号間干渉などの高周波数領域の影響を抑えた大容量化が期待できる事を確認できた。

さらに、配線の複雑化によるスタブやコネクタの影響により伝送路の周波数特性にノッチが生じる場合など伝送路特性が複雑化する環境では、柔軟な周波数選択が可能な OFDM 適用の有効性が期待できる。今後は、ハードウェア実装と共に、シンボル同期などを含めたシステム全体での評価を進め、OFDM 適用による高速デジタル伝送の有効性を実機ベースにて評価していく計画である。その中で、本研究調査では OFDM 適用の有効性と実現可能性をシミュレーションと実測にて検証でき、今後の検討を進める上で有意義な研究となった。

### 【参考文献】

- [1] John R. Barry, Edward A. Lee and David G. Messerschmitt, "Digital communication third edition," Springer.
- [2] Yosuke Iijima and Yasushi Yuminaka, "Waveform Shaping Transmitter Combining Digital and Analog Circuits for Multi-Valued Signaling," IEEE International Symposium on Multiple-Valued Logic 2019, 2019.
- [3] Yosuke Iijima and Yasushi Yuminaka, "Double-Rate Tomlinson-Harashima Precoding for Multi-Valued Data Transmission," IEICE Transactions on Information and Systems E100.D(8), pp.1611-1617, 2017.
- [4] IEEE 802.3an Task Force Meeting, [http://www.ieee802.org/3/an/public/mar04/higuchi\\_1\\_0304.pdf](http://www.ieee802.org/3/an/public/mar04/higuchi_1_0304.pdf)

### 〈発表資料〉

| 題名  | 掲載誌・学会名等   | 発表年月        |
|---|--|-------------|
| Experimental evaluation of multiplexing data transmission using wireline baseband OFDM (予定) | 2019 Taiwan and Japan Conference on Circuits and Systems | 2019年8月(予定) |