

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 27 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K14739

研究課題名(和文)Kramers-Kronig関係を用いた光トランシーバに関する研究

研究課題名(英文)A study on Kramers-Kronig Relation-based Optical Transceiver

研究代表者

Kariyawasam Amila (Kariyawasam, Amila)

東京理科大学・理工学部電気電子情報工学科・助教

研究者番号：90801192

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：コストや消費電力の削減が優先される通信システム向けに検討される直接検波方式では、ファイバ分散によって伝送距離が制限される。Kramers-Kronig (KK) 光受信器では直接検波後に電気領域分散補償が可能なる一方、高速信号処理の必要性や充分大きい光トーンの必要性など複数の課題がある。本研究では、実装の側面に重点を置き、KK光トランシーバについて大きく以下の4つの検討を行った。(1) KK光受信器におけるA/D変換時の量子化の影響、(2) 光電界復元の際必要となるデジタルアップサンプリングの低減方法、(3) KK受信の際光信号の変調フォーマットの影響、(4) KK受信方法をシステムの伝送特性

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究ではKK受信の際必要とされるデジタルアップサンプリングおよび光トーンパワー対信号パワー比を低減できる新しアルゴリズムが提案された。また、KK受信方式を用いる光通信システムの伝送限界やそれに変調フォーマットが与える影響について明らかになった。これらの結果よりトランシーバのコストだけではなく、消費電力の低減が可能になるため、持続可能な光通信システムの実装に貢献する可能性がある。

研究成果の概要(英文)：In direct detection (DD) optical communication systems where cost and power consumption reduction are priorities, transmission distance is limited by fiber dispersion. Kramers-Kronig (KK) relation-based receiver can compensate for fiber dispersion after DD. However, the requirements of high-speed signal processing and an optical tone are some issues of the KK receiver.

In this research project, we focused on the implementation aspect and investigated the following four major issues for the KK optical transceiver. (1) Influence of quantization during A/D conversion, (2) Methods to reduce the digital upsampling required for optical field restoration, (3) Effects of the modulation format of the optical signal during KK reception, and (4) Transmission characteristics of the system based on the KK receiver.

研究分野：通信工学

キーワード：光通信 直接検波 KK受信 ファイバ伝送

1. 研究開始当初の背景

今まで高い周波数利用効率が得られるデジタルコヒーレント検波と多重化技術をベースに光通信システムの大容量化が検討されてきた。一方、通信トラフィックのトレンドが変わり、近・中距離光通信システムで大容量化への要求が急速に高まりつつある。近・中距離通信システムの大容量化の場合は低コスト化・低消費電力化が優先されることから、直接検波方式を用いる伝送技術が多く検討されている。直接検波の場合、ファイバ分散によって伝送距離が制限されるため、直接検波後の分散補償が課題になる。この課題へ解決策として直接検波後に光電界が復調可能な Kramers-Kronig (KK) 関係を用いる光受信器が提案された。一方、受信器側のデジタル信号処理 (DSP) の増加、高速 DSP の必要性や光電界の復元のために充分大きい光トーンの必要性など複数の課題がある。

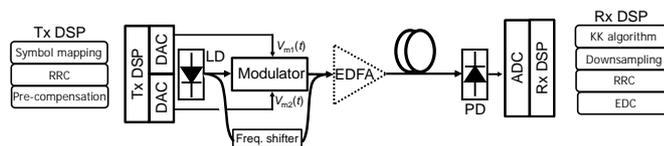


図1. KK 受信器を用いる直接検波光通信システムの概念図, ADC:A/D変換器, DAC:D/A変換器, EDC:電気領域分散補償, EDFA:エルビウム添加光ファイバ増幅器, LD:レーザダイオード, PD:フォトルダ, RRC:ルートレイズドコサインフィルタ.

2. 研究の目的

上記のような背景から、KK 関係を用いた光電界の復元の際、DSP パラメータがトランシーバの性能に与える影響を明らかにし、実装の側面に重点を置いた KK 光トランシーバ構成の提案を目的とする。

3. 研究の方法

本研究では下記の(1)~(4)について検討を行った。(1) KK 光受信器における A/D 変換時の量子化の影響 (2) 光電界復元の際必要となるデジタルアップサンプルの低減方法 (3) KK 受信方式を用いる光通信システムにおける光信号の変調フォーマットの影響 (4) KK 受信方式を用いる直接検波システムの伝送特性。検討した通信システムの概念図を図1に示す。

デジタル信号処理をベースにした KK 光受信器ではフォトダイオードの出力を A/D 変換器によって標準化され、標準化後のデータに対して KK アルゴリズムを適用し、光電界の復元が行われる。(1) では A/D 変換器の標準化周波数および量子化が光電界の復元に与える影響について数値シミュレーションによって調査した。

KK アルゴリズムに非線形演算である二乗根演算および対数演算が含まれている。これらの非線形演算によってスペクトルが広がるため信号帯域よりも十分に広い周波数帯域に対応できるように標準化周波数を選ばなければならない。(2) では標準化周波数を受信信号特性に与える影響を調査した。

標準化周波数を低減する方法として部分的なデジタルアップサンプリング (DUP) および非線形演算後の高調波除去を提案し、その有効性を評価した。提案したアルゴリズムのブロック図を図2に示す。

KK 受信器を用いた光電界の復元の際、受信信号が最小位相条件を満足している必要がある。このためにはトーンパワー対信号パワー比 (CSPR) より受信信号のピークパワー対平均信号パワー比 (PAPR) が小さくならなければならない。

変調方式によって CSPR および PAPR の値が変化するため(3)では変調方式による受信信号の特性変化について調査した。

KK 受信器は電気領域での分散補償可能性から短距離大容量光通信システム向けに検討されてきたが、その伝送限界は明らかになっていない。(4)では無中継長距離伝送へ KK 方式を適用した際の、ファイバ非線形及び受信器雑音の存在下で、損失補償を行わない場合および受信端における前置増幅を行う場合の伝送限界を数値的に検討した。この検討では受信器雑音として、受信フロントエンドで発生する熱雑音、増幅器内の自然放出による雑音を考えた。ルートレイズドコサイン (RRC) フィルタのロールオフ率を 0.05、送信器出力信号の CSPR を 10dB とし、受信器では理想的な A/D 変換を仮定した。

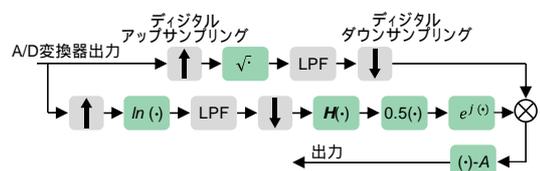


図2. 提案した KK アルゴリズムのブロック図, H: ヒルベルト変換, ln: 指数, LPF: ローパスフィルタ.

4. 研究成果

(1) KK 光受信器における A/D 変換時の量子化の影響

16QAM 信号の受信の際 CSRR とエラーベクトル振幅 (EVM) の関係を図 3 に示す。この時、理想的な標準化 (128 倍オーバーサンプル) を仮定し、量子化ビット数を 3~6 ビットに変化させた。伝送前の信号 (図 3(a)) では、低 CSRR 領域で量子化ビット数の増加に伴う EVM の低減および高 CSRR 領域では量子化ビット数による EVM 下限の制限が確認され、低 CSRR 領域では量子化ビット数、高 CSRR 領域では熱雑音が支配的であることが分かった。

40km 伝送の場合、高 CSRR 領域では信号対雑音比の劣化のため、量子化ビット数によらず EVM が増加する。低 CSRR 領域では伝送前の信号と似たような特性が確認できた。伝送前の信号に比べて、EVM が増加したのは伝送後の信号は最小位相条件を満たせなくなるためと推察される。

16QAM 信号の受信の際 EVM における標準化周波数の影響を図 4 に示す。標準化周波数が減少すると EVM 特性が悪化した。サンプルレートが 128sps から 4sps にすることで、EVM 基準を満たす CSRR は約 0.5 dB 増加し、CSRR = 10 dB のとき約 5.8 point の EVM 増加が見られた。

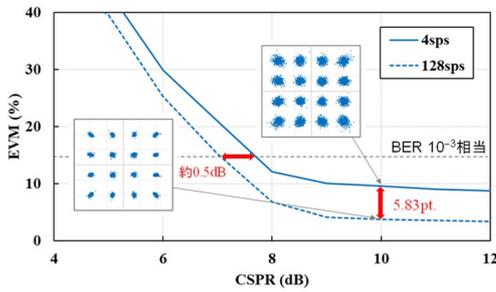


図 4. 標準化周波数による 16QAM 信号の EVM 変化, 量子化ビット数 4 ビット.

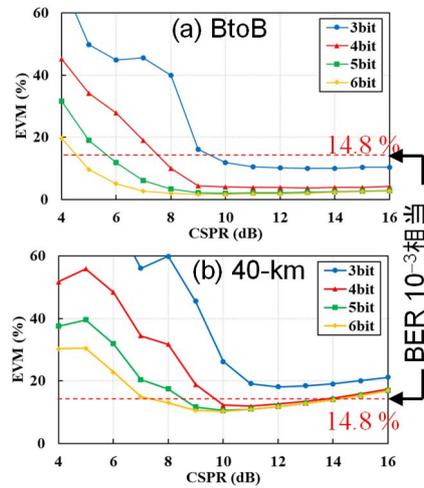


図 3. 量子化ビット数による 16QAM 信号の EVM 変化, (a) 伝送前 (b) 40km 伝送後.

16QAM 信号の受信の際 EVM における標準化周波数の影響を図 4 に示す。標準化周波数が減少すると EVM 特性が悪化した。サンプルレートが 128sps から 4sps にすることで、EVM 基準を満たす CSRR は約 0.5 dB 増加し、CSRR = 10 dB のとき約 5.8 point の EVM 増加が見られた。

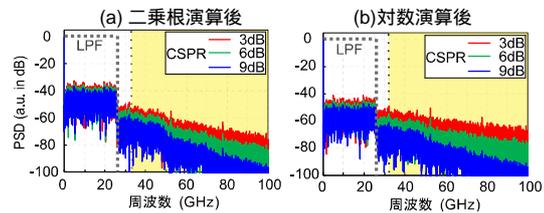


図 5. KK アルゴリズムによる光電界の復元中に発生するスペクトル広がり, (a) 二乗根演算後 (b) 対数演算後, 点線 (黒): 2.5sps の場合のナイキスト周波数, 点線 (灰): 提案方法で用いたローパスフィルタの帯域.

(2) 光電界復元の際必要となるデジタルアップサンプリングの影響

図 5 にフォトダイオード出力に対して二乗根および対数演算を実行した後のアナログ電気スペクトルを示す。どちらの演算の場合もスペクトルがナイキスト周波数より広がり、折り返し雑音 (エイリアシング) による信号劣化につながる事がわかる。

対数演算のスペクトルではより高電力の高周波数成分が確認され、支配的であることが確認された。

図 6 に提案方法を用いた場合、受信信号のビットエラーレート (BER) の変化を示す。ここで、w/o filtering はナイキスト周波数により決められる標準化周波数を適応 (デジタルアップサンプルなし), LPF-sqrt, LPF-log それぞれは二乗根後および対数演算後に提案方法を適応, LPF-sqrt&log は両演算後に提案方法を適応, Ideal ADC は 128 倍アップサンプリング後一般的な KK 処理を行ったときの結果である。提案方法によってデジタルアップサンプリングおよび CSRR の要件を低減可能であることがわかった。

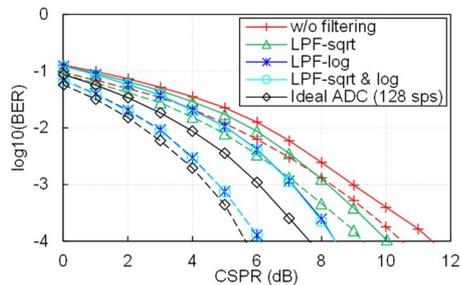


図 6. 高調波成分の除去による BER 改善, 16QAM 信号, デジタルアップサンプリング後のサンプルレート 128sps, 破線: 伝送前, 実線: 40km 伝送後.

(3) KK 受信方式を用いる光通信システムにおける光信号の変調フォーマットの影響

検討した変調フォーマットのコンスタレーションを図 7 (a) に示す。それらの変調フォーマットの PAPR と送受信端で用いる RRC フィ

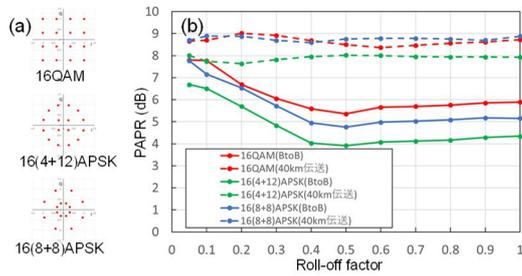


図7. 検討した変調フォーマットの (a) コンスタレーション, (b) PAPR 特性, 実線: 伝送前, 点線: 40km 伝送後.

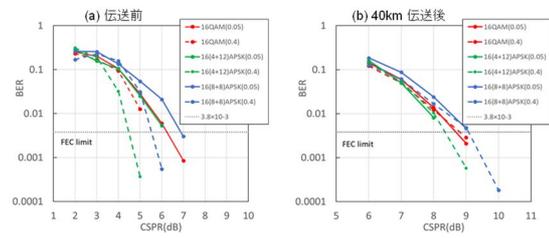


図8. 伝送前後の各変調フォーマットの BER 特性, (a) 伝送前, (b) 40km 伝送後, RRC ロールオフ率, 実線: 0.05, 点線: 0.4.

ルタのロールオフ率の関係を図7 (b) に示す。

伝送前の信号では周波数応答関数の変化が緩やかになるに従って、ロールオフ率 0.4 程度まではいずれのフォーマットでも PAPR は単調減少していることがわかる。一方、伝送後の信号はロールオフ率に関わらずほぼ一定の PAPR を示す。その原因はロールオフ率の増加に伴って、信号帯域が広がり、波長分散の影響を受けやすくなったためと推察される。

伝送前後の各変調フォーマットの BER 特性を図8 に示す。伝送前の信号ではロールオフ率が大きい場合信号点配置によって BER 特性が変化することがみられた。一方、伝送後の信号ではロールオフ率による BER 特性の相違がほとんど見られないことがわかった。

(4) KK 受信方法を用いる直接検波システムの伝送特性

図9 (a) には 16QAM 信号を無中継伝送し, KK 受信器による受信後の EVM 特性を示す。ファイバ入射パワーが低い領域では, 伝送距離の増加に従ってファイバ損失による SNR の低下し, EVM が単調に増加する。

ファイバ入射パワーを増加した際, ファイバ非線形性による信号劣化のため EVM が急激に劣化する。

図9 (b) の受信端に前置増幅器を用いた場合の EVM 特性から, 前置増幅によって SNR が改善され, 伝送距離の拡大が可能であることが示された。

BER 10^{-3} の達成を基準として, QPSK, 16QAM および 64QAM 変調信号の最大伝送可能距離を図9 (c) に示す。

受信端に前置増幅器を用いた場合, QPSK, 16QAM および 64QAM 変調信号の最大伝送可能距離それぞれが 186km, 134km および 90km であると予測された。

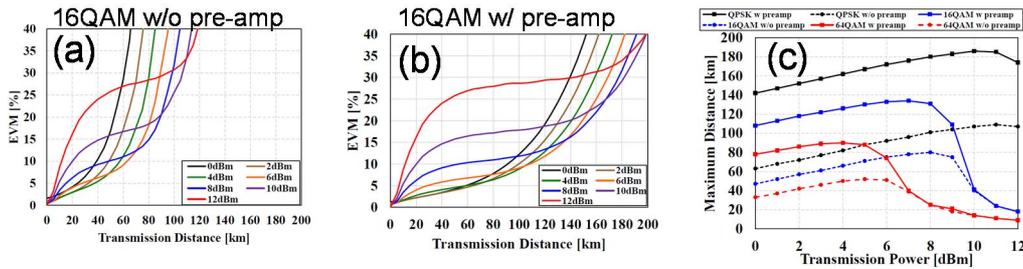


図9. (a) 16QAM 信号の無中継伝送特性, (b) 前置増幅器を用いた場合の 16QAM 信号伝送特性, (c) 各変調フォーマットの最大伝送可能距離.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Tsukui Enzo, Toba Kentaro, Fujita Takaha, Sampath K. I. Amila, Maeda Joji	4. 巻 X10-B
2. 論文標題 Kramers-Kronig relation based direct detection for unrepeated long-haul lightwave transmission	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 1~6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/comex.2021ETL0028	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Sampath K. I. Amila, Takano Katsumi, Maeda Joji	4. 巻 8
2. 論文標題 Peak-to-Average Power Ratio Reduction of Carrier-Suppressed Optical SSB Modulation: Performance Comparison of Three Methods	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Photonics	6. 最初と最後の頁 67~67
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/photonics8030067	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 FUJITA Takaha, TOBA Kentaro, SAMPATH Kariyawasam Indipalage Amila, MAEDA Joji	4. 巻 E103.B
2. 論文標題 Impact of Sampling and Quantization on Kramers-Kronig Relation-Based Direct Detection	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Communications	6. 最初と最後の頁 1291~1298
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transcom.20190BP0008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Toba Kentaro, Fujita Takaha, Tsukui Enzo, Sampath Kariyawasam Indipalage Amila, Maeda Joji	4. 巻 39
2. 論文標題 A Study on Sampling Penalties Reduction of Kramers-Kronig Receivers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Lightwave Technology	6. 最初と最後の頁 6054~6062
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/JLT.2021.3099938	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kariyawasam Amila, Shiraiwa Masaki, Awaji Yoshinari, Takano Katsumi, Maeda Joji	4. 巻 10
2. 論文標題 Optical field trajectory shaping of phase-shift method-based optical BPSK-VSB signal;an experimental study	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 570 ~ 575
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/comex.2021XBL0100	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計5件(うち招待講演 0件/うち国際学会 2件)

1. 発表者名 E. Tsukui, K. Toba, T. Fujita, K. I. A. Sampath, and J. Maeda
2. 発表標題 Availability of Kramers-Kronig relation based direct detection for unrepeated long-haul light wave transmission
3. 学会等名 2020 International Conference on Emerging Technologies for Communications (ICETC 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Toba, T. Fujita, K. I. A. Sampath, and J. Maeda
2. 発表標題 Mitigating the Sampling Rate Requirements of KK Receiver by Eliminating Harmonics of Nonlinear Operations
3. 学会等名 OSA Advanced Photonics Congress (AP) 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鳥羽健太郎, 藤田高羽, 津久井エンツォ, K. I. A. Sampath, 前田譲治
2. 発表標題 Kramers-Kronig受信器における標準化によるペナルティの低減に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会光通信システム研究会 OCS2020-8
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田村凌, カーリヤワサム アミラ, 前田謙治
2. 発表標題 Kramers-Kronig関係を用いた直接検波コヒーレント受信におけるヒルベルト変換の実装に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会2021年ソサイエティ大会, B-10-15
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大藤寛生, カーリヤワサム アミラ, 前田謙治,
2. 発表標題 Kramers-Kronig関係を用いた直接検波光コヒーレント受信の変調方式依存性に関する研究
3. 学会等名 電子情報通信学会2021年ソサイエティ大会, B-10-16
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	前田 謙治 (MAEDA Joji) (10256670)	東京理科大学・理工学部・教授 (32660)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------