

世界初、光コヒーレント伝送方式のための新しい受信方式を開発 ～複雑で精密な光回路が不要、光の強度情報のみから位相情報を回復する～

【ポイント】

- 効率的に大容量通信を実現する光コヒーレント伝送方式のための新しい受信方式を開発
- NICT 独自のデバイス技術と信号処理技術を組み合わせて光受信回路をシンプルに
- 将来の 100G アクセスに向けたシンプルで超小型光受信機の実現に期待

国立研究開発法人情報通信研究機構(NICT、理事長: 徳田 英幸)ネットワークシステム研究所は、独自に開発した高速集積型受光素子^{*1}と位相回復^{*2}信号処理アルゴリズムを用いた、新たな光コヒーレント受信方式^{*3}の実証実験に世界で初めて成功しました。現在、長距離系光ファイバ通信網で利用されている光コヒーレント受信機には、高精度な光源と複雑で精密な光回路が必要ですが、今回は、この複雑な光回路を用いる代わりに、受光素子を二次元に配置した集積型受光デバイスを用い、散乱させた光信号を画像的に受信し、位相回復信号処理を施すことで、光コヒーレント受信に成功しました。これにより、光回路を大幅にシンプルにすることができました。位相回復技術は、これまで、天文などの物理学の分野で知られていましたが、今回、光通信に特化したアルゴリズムを開発し、初めて、実際の大容量通信実験に成功しました。

本成果により、光源や複雑で精密な光回路が不要で、超小型でシンプルで光コヒーレント受信機が実現可能となり、受信機の小型化が求められる光アクセス網の大容量化が期待できます。

【背景】

現在、通信事業者等の長距離系光ファイバ通信網では、光の強度と位相に情報を乗せる光コヒーレント伝送により、毎秒 100G ビットを超える大容量通信を実現しています。さらに、FTTH など身近な光アクセス網でも光コヒーレント伝送の導入が検討されています。しかし、光信号の受信に用いられる受光素子は、光の強さ(強度情報)は検出できますが、位相は検出できないため、光コヒーレント方式信号の受信には、高精度な光源や複雑で精密な光回路が必要となります(補足資料 図 2 上段・中段参照)。そのため、受信機の小型化が求められる光アクセス網では、光コヒーレント伝送の導入が進んでいませんでした。

【今回の成果】

今回 NICT は、新たに開発した位相回復信号処理アルゴリズムと 2017 年に開発した超小型かつ高速な二次元集積型受光素子を組み合わせることで、受信機内の光回路を大幅に削減し、シンプルにする「位相回復型コヒーレント受信方式」を提案し、その実証実験に、世界で初めて成功しました(図 1 及び補足資料 図 2 下段参照)。

本方式の構成要素は、以下のとおりです。

- ・受信した光の位相を二次元的な強度パターンに変換する散乱体
- ・散乱体で変換された強度パターンを一括受光する二次元集積型受光素子
- ・強度パターンから光の位相を逆算する位相回復信号処理アルゴリズム

位相回復技術は天文などの物理学の分野で知られていますが、計算量の大きさなどから、高速光通信へは応用されてきませんでした。今回、新しく開発したアルゴリズムでは、光位相変調信号の限られた位相状態に着目し、その計算量を大幅に削減することができました。本実験では、毎秒 40G ビット相当の偏波多重 QPSK 信号^{*5}を送信し、位相回復型コヒーレント受信に成功しました。

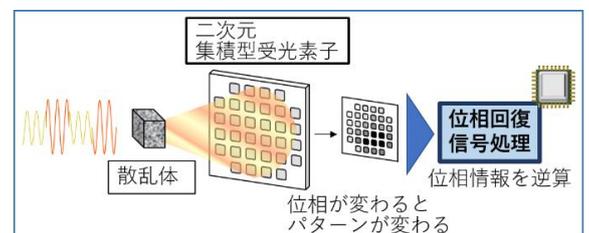


図 1 位相回復型コヒーレント受信方式のイメージ図

なお、本実験の結果は、米国サンディエゴで 3 月に開催された光ファイバ通信関係最大の国際会議の一つである第 42 回光ファイバ通信国際会議(OFC2019)で非常に高い評価を得て、最優秀ホットトピック論文(Post Deadline Paper)として採択され、現地時間 3 月 7 日(木)に発表しました。

【今後の展望】

今後は、16QAM^{*6} といった、より複雑な波形を持つ光信号の復調や、より効率的な散乱体の設計など、信号処理技術・デバイス技術の両面から、位相回復型コヒーレント受信方式の実用性の向上に取り組んでいきます。

今回開発したコヒーレント受信方式は、光ファイバ通信のみならず、高精度な光測距^{*7} や大容量の空間光無線通信など、超小型化が求められる身近な光 ICT システムへの多様な応用も期待されます。

<採択論文>

国際会議: 第 42 回光ファイバ通信国際会議(OFC2019)最優秀ホットトピック論文(Post Deadline Paper)
論文名: Coherent Detection only by 2-D Photodetector Array: A Discreteness-aware Phase Retrieval Approach
著者名: Yuki Yoshida, Toshimasa Umezawa, Atsushi Kanno, Naokatsu Yamamoto

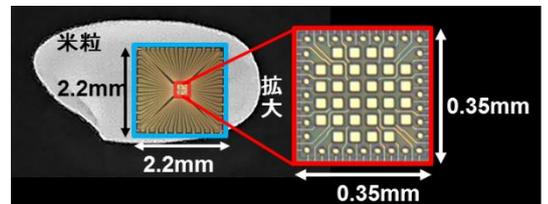
<過去の NICT の報道発表>

- ・2017 年 9 月 14 日「世界初、多数の光信号を同時に電気信号に変換する高速集積型受光素子を開発」
～容量光通信装置の大幅な小型化と低消費電力化を可能に～ <https://www.nict.go.jp/press/2017/09/14-1.html>

<用語解説>

*1 集積型受光素子

2017 年に NICT が世界で初めて開発した超小型かつ高速な受光デバイス。32 個の受光素子(光信号や光エネルギーを電気信号や電気エネルギーに転換)を、わずか 0.35mm 四方に集積

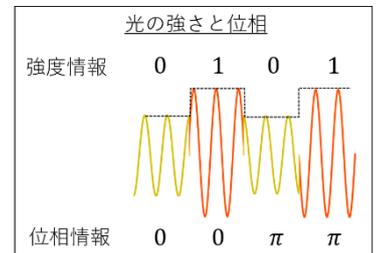


*2 位相回復(Phase Retrieval)

光の振幅(強度)情報のみから位相情報を回復(推定)するための一連の信号処理、あるいは数学。X 線分光や散乱イメージングなど、物理学や工学の幅広い分野で取り扱われる。古くは Gerchberg-Saxton アルゴリズムなどが有名

*3 光コヒーレント受信方式

光の強さと位相(波としてのずれ)の両方に情報を乗せる多値変調^{*4} を利用し、効率的に大容量伝送を可能とする伝送の受信方式。一般的な受光素子では、入射光強度に比例した光電流出力が得られるが、位相情報は検出できない。そのため、既存の技術では、情報伝達に用いる光の搬送波と同期したローカル光や、信号とローカル光を適切な位相差で合波するための光ハイブリッドなどから成る複雑で精密な光回路が必要



*4 多値変調

1 回の変調(1 シンボル)で複数のビットを表現する変調方式。光の位相を利用する PSK(Phase Shift Keying)と位相と振幅を利用する QAM(Quadrature Amplitude Modulation)などがある。QPSK(Quadrature Phase Shift Keying)は、2 ビット情報を 1 シンボルで表現する。

*5 偏波多重 QPSK 信号

100Gbps 基幹系光ファイバ通信網などで採用される伝送信号。単一モードファイバの垂直偏波と水平偏波を用いて、2 系列の 4 相位相移変調(Quadrature Phase Shift Keying)信号を同時に伝送することで、単純なオン・オフ変調と比較し、4 倍程度の伝送効率を実現する。

*6 16QAM(Quadrature Amplitude Modulation)

QAM とは、多値変調の一種。1 シンボルが取り得る位相空間上の点が 16 個で、1 シンボルで 4 ビットの情報(2⁴=16 通り)が伝送でき、同じ時間で OOK(On-Off Keying)の 4 倍の情報が伝送できる。

*7 光測距

電波より波長が短い光波を用いて、精度が高い計測をする技術。LiDAR(Light Detection and Ranging)

< 本件に関する問い合わせ先 >

国立研究開発法人情報通信研究機構
ネットワークシステム研究所
ネットワーク基盤研究室
吉田 悠来、山本 直克
Tel: 042-327-6209, 6982
E-mail: ldp-inquiry@ml.nict.go.jp

< 広報 >

広報部 報道室
廣田 幸子
Tel: 042-327-6923
Fax: 042-327-7587
E-mail: publicity@nict.go.jp

1. 今回開発した「位相回復型コヒーレント受信方式」

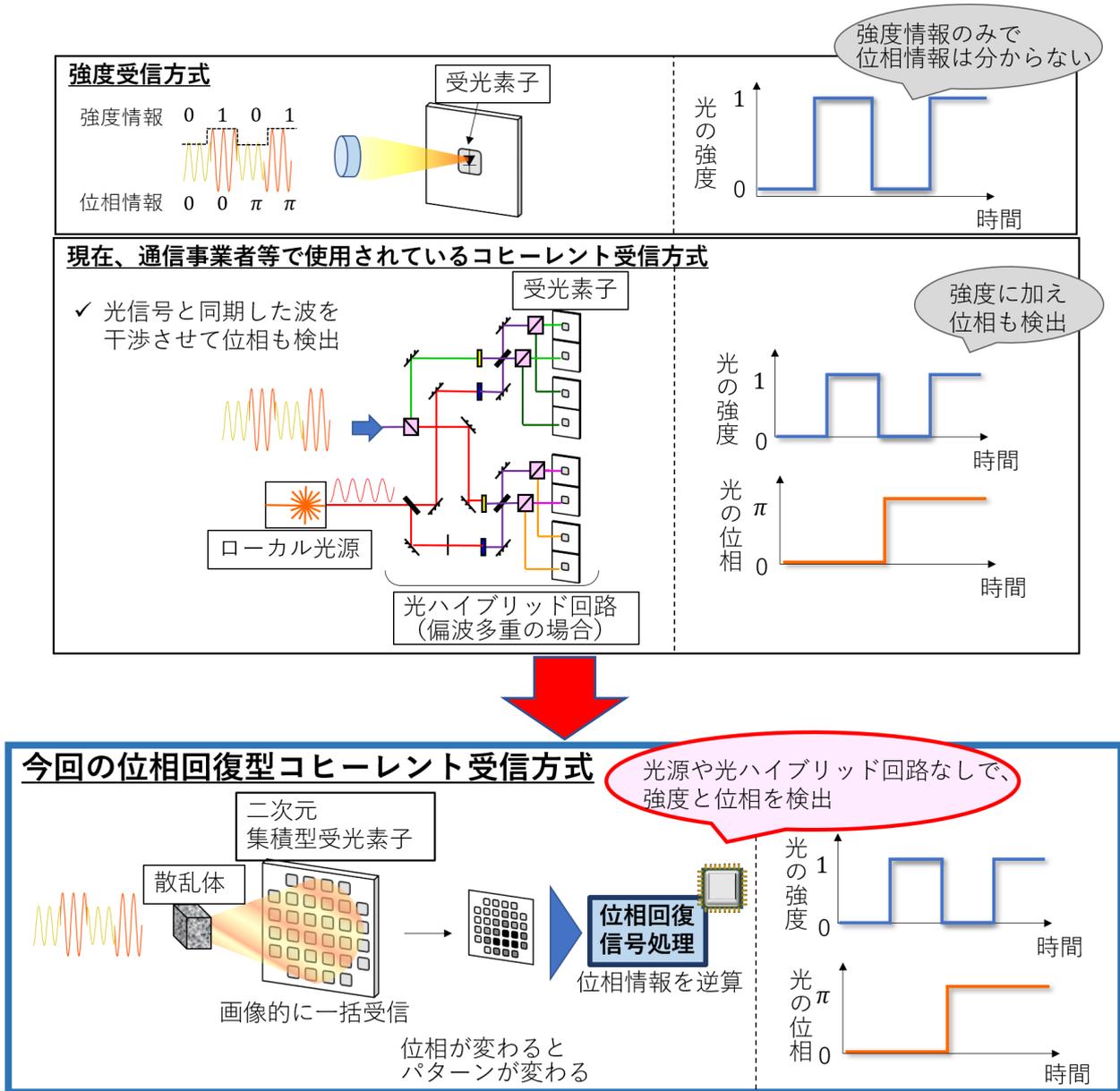


図2 上段: 強度受信方式、中段: 従来のコヒーレント受信方式、
 下段: 今回開発した位相回復型コヒーレント受信方式のイメージ図

図2は、光受信方式のイメージ図です。受光素子で受信する場合は、強度情報のみで位相情報は検出できません(図2上段参照)。現在、通信事業者で使用されている光コヒーレント受信方式では、ローカル光源と複雑で精密な光回路を用い、位相を検出します(図2中段参照)。

今回開発した「位相回復型コヒーレント受信方式」では、散乱体で光の位相を二次元の光強度パターンに変換し、NICTが開発した二次元集積型受光素子で画像的に受信した後、位相回復信号処理により、受信強度パターンから入力位相を逆算することで、光位相変調信号を受信します(図2下段参照)。

位相回復技術は、X線回折や透過型電子顕微鏡などの分野で広く知られていますが、計算量や位相回復アルゴリズムの頑強性に課題があり、高速光通信への適用は難しいと考えられていました。

今回、計算量の少ない一般化最急降下法に基づく位相回復アルゴリズム RAF (Reweighted Amplitude Flow)^[1]に、SOAV (Sum-of-Absolute-Values) 最適化^[2]と呼ばれる手法により、光変調方式に関する事前知識(例えば、今回は QPSK 変調)を取り込むことで、頑強かつ低要求演算量の位相回復アルゴリズム DRAF (Discreteness-aware RAF)を新たに開発しました。

[1] G. Wang, G. B. Giannakis, Y. Saad and J. Chen, "Phase Retrieval via Reweighted Amplitude Flow," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 66, no. 11, pp. 2818-2833, Jun. 2018.

[2] M. Nagahara, "Discrete Signal Reconstruction by Sum of Absolute Values," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 22, no. 10, pp. 1575-1579, Oct. 2015.

