

デュアルパルスのシングルショット評価のための2ビーム SPIDER

Two-Beam SPIDER for Dual-Pulse Single-Shot Characterization

[D. French, C. Dorrer and I. Jovanovic: Opt. Lett., 34, No. 21 (2009) 3415-3417]

フェムト秒レーザーパルスを材料に照射し、パルスの特性（電場強度と位相）の変化を評価することによって、材料の物性を調べることが可能である。レーザーから繰り返し発振されるパルスの特性が変わらなければ、被検物に入射させる前（基準）と、被検物から出射して変化した後を、別々に評価しても変化量を求めることはできる。しかし、非線形現象を高効率で発生させられる大出力フェムト秒レーザーを用いる場合には、パルス特性がショットごとに安定しないことが深刻な問題となっている。このため、被検物に入射させる前（基準）と出射後の2つのパルスを、1回の計測（シングルショット計測）で同時に行えるようにすることが要求される。このシングルショット計測としては、周波数シェアリング干渉法を利用した SPIDER が有名である。通常のシェアリング干渉では被測定光を2つに多重するとともに空間的にずらして干渉させ、得られるフリンジから波面計測を行うのに対し、周波数シェアリング干渉法では、被測定パルスを2つに多重して周波数

差を与えて干渉させ、周波数軸上で生じるフリンジから被測定パルスの電場強度と位相を計測する。しかし、従来の SPIDER は一度に評価できるパルスは1つであるため、被検物に入射させる前と出射後のパルスを別々に評価しなければならない。このため、大出力フェムト秒レーザーを利用する際にはレーザーの安定化を常に気にする必要があるが、非常に困難である。本論文では、従来の SPIDER を改良設計し、被検物に入射させる前と、被検物から出射した2つのパルス（デュアルパルス）を、それぞれシングルショットで同時に評価できる構成を紹介している。さらにこの構成により、ガラス中で発生する非線形効果によるパルス特性の変化が示されている。（図3、文献10）

同一の装置で2種類のパルスをシングルショット計測できる本手法は大変興味深い。大出力フェムト秒レーザーの不安定性の問題を解消する方法として期待できるとともに、壊れやすい材料の物性評価等にも威力を発揮すると思われる。（雙木 満）

位相切り捨てフーリエ変換による非対称暗号

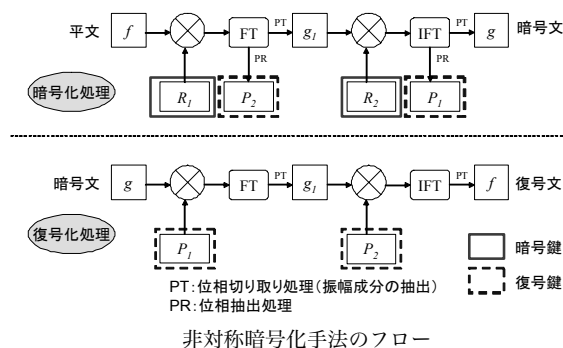
Asymmetric Cryptosystem Based on Phase-Truncated Fourier Transforms

[Wan Qin and Xiang Peng: Opt. Lett., 35, No. 2 (2010) 118-120]

二重ランダム位相暗号化（DRPE）に代表される光学的な暗号化手法は、暗号時と復号時に同じ暗号鍵を用いる共通鍵暗号が基本であり、実際に暗号通信等のサービスを利用するためには、送信側と受信側が鍵を共有する鍵配送の問題を解決する必要がある。これに対し本論文では、DRPE に位相切り捨て（PT）処理と位相抽出（PR）処理を取り入れることで、暗号鍵と復号鍵を異なる鍵とすることが可能な非対称暗号化手法を提案している。提案手法では、ランダム位相変調化した明文画像のフーリエ変換像に対して PR および PT 処理を施し、PR 処理した位相画像を復号用の1つ目の鍵とする。一方で PT 処理した振幅画像に別のランダム位相で位相変調し、これをフーリエ変換した画像に対し PR および PT 処理を施す。PR 処理した位相画像は復号用の2つ目の鍵とし、PT 処理した振幅画像は暗号画像とする。復号化はこの逆の処理を行うが、暗号用の鍵とは異なる復号化用の鍵を用いて復号化することが可能である。またさまざまな攻撃方法に対する提案手法の安全性の評価を行い、暗号化に用いた鍵を保有している場合の攻撃等に対して耐性があることを確認している。（図4、文献15）

この論文で提案している暗号化手法は、依然として鍵配送の問題は

解決できていないが、非対称鍵を実現できている点では新規性があり、このような非対称鍵を必要とするケースでの応用が期待される。（鈴木 裕之）



デジタルホログラフィック顕微法における再生距離の変調を用いた位相アンラッピング

Phase Unwrapping by Varying the Reconstruction Distance in Digital Holographic Microscopy

[A. Khmaladze, T. Estein and Z. Chen: Opt. Lett., 35, No. 7 (2010) 1040-1042]

位相情報に基づく面計測を行う際しばしば問題となるのは、位相情報が 2π の主値域に折り畳まれることによって生じる不確実性の問題である。この問題に対処するため、種々の位相アンラップ手法が提案されている。アンラップの方針は大きく分けて2つある。1つはいくつかの仮定に基づき、位相情報を滑らかに接続するアルゴリズムを用いる方法であり、もう1つは計測条件を変化させて複数の位相情報を抽出し、それらを復号することによって不確実性の範囲を狭める方法である。本論文で提案されている手法は、両者の中間に位置する可能性がある。本論文では、デジタルホログラフィック顕微法で得られた位相情報に対し、ホログラムの数値再生における再生距離を変化させて得られた複数の位相情報を組み合わせることで位相アンラップを行っている。まず、計測範囲内で比較的滑らかな領域に基準となる点を選び、その点に隣接する点を接続していく。この接続は基準点に対する位相差が Δz になるまで再帰的に行われる。接続可能な点がなく

なったら、ホログラムの数値再生の距離をわずかに変化させて新たに位相情報を抽出し、接続済みの点を基準として、隣接している画素を接続していく。このような処理を、未接続の画素がなくなるまで繰り返す。この手法はアルゴリズムの観点から考えると、位相差の少ない隣接画素同士を接続していく位相差最小木法と同様である。著者らは数値的再生の距離を変えると、位相情報に混入する雑音が軽減することがあり、それによって他の手法よりも正確な位相情報を復元できると述べている。しかし、その効果を裏付けるデータは示されていない。（図4、文献7）

デジタルホログラムの再生距離を変化させて得た複数の位相情報を組み合わせて位相アンラップを行うというアプローチは興味深い。しかしながら、本論文の中では再生距離の変化による雑音除去の効果が十分に検証されているとはいえない内容となっているため、続報を期待したい。（和田 篤）

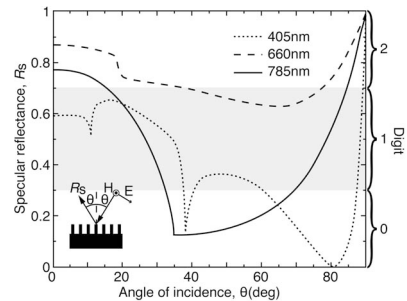
回折格子の光学特性を利用した暗号システム

Cryptosystem for Plaintext Messages Utilizing Optical Properties of Gratings
[Y.-B. Chen and J.-S. Chen: Appl. Opt., 49, No. 11 (2010) 2041-2046]

本論文では、回折格子の光学特性を利用した暗号システムを提案している。一例として、バイナリー金属表面レリーフ型回折格子を仮定し、3つの波長における正反射率を用いた暗号化・復号原理とその性能について評価している。復号処理における暗号文から3桁の文字コードへの変換処理について略説する。受信者は「05, 25, 15, …」などの複数の数字で構成される暗号文と回折格子を受け取る。波長405, 660, 785 nmの光を暗号文の数字が示す角度で回折格子に入射させ、その正反射率を求める。このとき、波長および入射させる順番は、共有鍵2として与えられる。5度で入射させたときの各波長における正反射率はそれぞれ、0.59, 0.87, 0.77となる。共有鍵3によって、正反射率の範囲は3つに分割され、文字コードの各桁の数字が割り当てられる。正反射率が0.59では1, 0.87では2, 0.77では2となり、文字コード122に変換される。同様に、25度、15度では、文字コードはそれぞれ、121, 122に変換される。このように、入射角度に対する回折格子の正反射率を計測（計算）することで暗号文の復号が行われる。（図4、表2、文献24）

提案手法は回折格子を鍵としており、回折格子の設計が重要にな

る。セキュアな暗号システムの実現のためには、より複雑な振る舞いをする回折格子を高速に設計する手法の構築が期待される。また、回折格子を設計する際の光学特性を否認不可署名として利用している点も興味深い。（生源寺 類）



各波長における回折格子の正反射率と文字コード

ホログラフィックビデオ顕微鏡法により測定された酸化銅ナノロッドの回転および並進拡散

Rotational and Translational Diffusion of Copper Oxide Nanorods Measured with Holographic Video Microscopy
[F. C. Cheong and D. G. Grier: Opt. Express, 18, No. 7 (2010) 6555-6562]

微粒子の動きの光学的な計測は、コロイド粒子の相互作用の研究や、ソフトマターの粘弾性計測、ポリマーの力学特性の評価といったさまざまな分野で利用されている。ホログラフィックビデオ顕微鏡法を用いると、ナノ粒子の位置と大きさを、ナノメートルからサブナノメートルの分解能で測定することが可能である。多くの場合、プローブとして用いられる微粒子は“球”であるが、本論文では酸化銅ナノ“ロッド”を用いて、三次元位置のみではなく、微粒子の回転の計測も行っている。計測方法は、まず、水中に分散された酸化銅ナノロッドにコリメートされたレーザー光が照射され、ナノロッドによる散乱光とナノロッドの存在しない部分を通ってきた光との間の干渉縞（ホログラム）が計算機に取り込まれる。次に、ホログラムからレイリー・ゾンマーフェルト法を用いた逆伝搬計算により、物体近傍における三次元光強度分布が再生される。そして、intensity-weighted skeletonization法により物体の位置と姿勢が算出される。この手法には、ミー散

乱理論をもとにしたホログラムの直接解析と比べて、物体ごとの光散乱の詳細なモデルが不要であり、計算量が非常に少ないという利点がある。ナノロッドのブラウン運動が観測され、回転および並進の二乗平均ゆらぎから逆算されたナノロッドの長さや幅がホログラムから直接計算された値と同じになることから、本手法の正確性が示された。また、計測誤差は、回転角度については3°、位置については各軸とも約100 nmであることが示された。（図4、文献25）

本手法は、微粒子の形状や大きさが不揃いであっても適用可能であるため、応用範囲は広いと思われる。本手法とホログラムの直接解析法との比較が同著者らによりなされている（Opt. Express, 18 (2010) 13563-13573）。その文献によると、本手法のほうが直接解析法よりも10倍高速であり、GPUを用いて計算した場合、1秒間に10枚の三次元強度分布を再生可能であるとのことである。（田北 啓洋）

コヒーレント光 OFDM 伝送システムにおける非線形位相雑音

Nonlinear Phase Noise in Coherent Optical OFDM Transmission Systems
[X. Zhu and S. Kumar: Opt. Express, 18, No. 7 (2010) 7347-7360]

長距離大容量光伝送の実現に向け、コヒーレント検波とデジタル信号処理技術を用いた光直交周波数分割多重（OFDM: orthogonal frequency division multiplexing）伝送技術が注目されている。光 OFDM 信号は高い周波数利用効率と分散耐性を有する一方、ファイバー中の非線形光学効果による波形劣化の影響が大きいことが知られている。デジタル信号処理技術を用いて非線形光学効果による波形劣化を補償する方法も提案されているが、伝送路中の自然放出光（ASE: amplified spontaneous emission）と信号光との非線形相互作用によって生じる非線形位相雑音はランダムな振る舞いをするため、一般的に補償することは困難である。本報告では、光 OFDM 伝送における非線形位相雑音の影響について、定量的な解析を行い、位相雑音量を与える公式を導出している。また、数値シミュレーションの結果と比較し、解析の適用性を確認している。従来の波長分割多重（WDM: wavelength division multiplexing）伝送では四光波混合（FWM: four wave mixing）に伴う非線形位相雑音は十分小さいことが知られているが、

本解析により、光 OFDM 伝送では FWM による非線形位相雑音が支配的であることがわかった。これは、従来の WDM 伝送とは異なり、光 OFDM 伝送ではサブキャリア同士がコヒーレントに多重されていることにより、FWM を効率よく発生させているためと考えられる。また本報告では、波長分散を有する伝送路中では非線形位相雑音が低減されること、雑音量は光 OFDM 信号を構成するサブキャリアの数によらず、伝送速度に比例することも併せて示している。（図10、文献35）

今後のデジタル信号処理技術の進展により、伝送路で発生する決定論的なメカニズムに基づく波形劣化を完全に補償することが可能となった状況では、ASE に伴う非線形位相雑音は伝送システムの品質を表す重要な指標のひとつとなることが予想される。本報告ではこの点に注目し、雑音量を与える公式を導出している点で非常に興味深い。（山本 秀人）