

平成 30 年 5 月 30 日現在

機関番号：62616

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K13790

研究課題名(和文)ヘテロダイン方式近赤外光干渉計

研究課題名(英文)Heterodyne type Optical Interferometer

研究代表者

木内 等 (Kiuchi, Hitoshi)

国立天文台・チリ観測所・准教授

研究者番号：90358911

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：光領域においてファイバベースのヘテロダイン周波数変換技術を確立できれば、電波干渉計のように光を波として受信し、位相情報を得ることができる。これを用いることで大きな口径の望遠鏡を合成することができ、高角度分解能化が期待できる。さらに光ファイバ部品で全て構成が可能な場合、光軸アライメントの必要がなくなり、望遠鏡受光部と相関処理部を独立したシステムとして構成できる。光領域においてもヘテロダイン周波数変換が可能な場合、干渉のためのコヒーレンス長を周波数変換比分だけ長くすることが可能となる。

光位相データを用いた高分解能光干渉計実現のため光ヘテロダイン技術の有効性の検証を行う。

研究成果の概要(英文)：In an infrared optical interferometer, when the fiber-based heterodyne frequency conversion technology can be established, phase information of the received optical signal can be obtained, similar to a radio interferometer. This produces a synthesized large telescope, and a high angle resolution can be expected. Furthermore, when it is possible to fabricate all parts of the optical interferometer with optical fiber parts, the requirement of aligning on the optical axis no longer exists, and it can be placed in a receiver section away from the correlation processing section. In an optical signal, if the heterodyne frequency conversion is available, the coherence length of the received optical signal can be extended by the frequency conversion ratio. We will establish the effectiveness of optical heterodyne technology to realize a high-resolution optical interferometer based on the optical phase data.

研究分野：フォトニックマイクロ波

キーワード：光干渉計 光ヘテロダイン フォトニックマイクロ波 光ファイバ結合 相関処理

1. 研究開始当初の背景

量子力学によれば光は粒子であるとともに波であり、2つの性質を併せ持っている。電波望遠鏡では、電磁波を波として受信しており、観測情報には位相情報が含まれている。このために、複数の望遠鏡で受信した信号を掛け合わせて実効的に大きな口径の望遠鏡を合成する電波干渉計が構成可能であり、高角度(空間)分解能が達成されている。一方、光赤外領域では、ほとんどの場合光を粒子として検出しており、光の位相情報は得られないため他の望遠鏡と干渉させることはできない。僅かな例外として光を直接干渉させて検出しているのが赤外干渉計であるが、やはり光の位相情報は得られない。この方式では、高周波な光の状態のまま干渉させるため遅延追尾のみで相関(干渉縞: フリンジ)が得られるが、精密な遅延追尾を行うための高精度な機械的位置制御が必要であり、非常に難しい。これは遅延追尾のために Beam combiner とミラーの乗った遅延線を用い、遅延線長を物理的に変化させることで干渉縞を得る方式(図1)のため、光軸を維持したまま高精度な機械的位置制御(コヒーレンス長 2 μm)が要求されることが一因であると考えられる。

この技術を持っているのは米国・欧州などの僅かな機関であり、残念ながら日本では天文台の MIRA 計画において十分な遅延追尾の技術確立までには至らなかった。

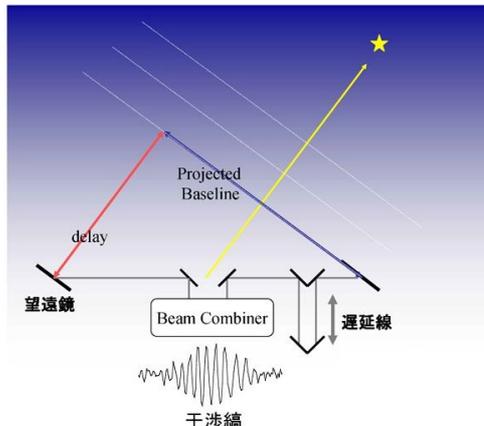


図1: 従来型光干渉計(光のまま干渉)

もし、電波干渉計のように光領域においてもヘテロダイン周波数変換が可能なら、コヒーレンス長を周波数変換比だけ長くすることが可能となり、低周波でサンプリング後に全てデジタル処理で相関(フリンジ)検出が行える。相関信号はベクトル量であり、位相情報を用いて高角度分解能を得ることができる。

研究代表者はファイバベースのフォトニック技術を用いた高周波信号発生・伝送、高周波電波干渉計用較正信号発生などの研究を行ってきた。この中で、周波数間隔の僅かに異なった2つの光コム信号のビート信号からマイクロ波コム信号の作成に成功した。これは光のヘテロダイン方式の可能性を示す

もので、天文応用としてファイバベースでのヘテロダイン光干渉計(図2)を発想するに至った。

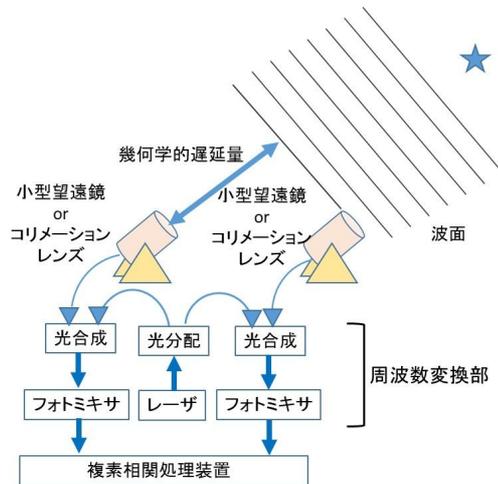


図2 ファイバベースのヘテロダイン方式光干渉計(光を周波数変換後に干渉)

2. 研究の目的

近赤外領域におけるファイバベースでのヘテロダイン方式の基本技術開発を本研究の目的とする。

光領域においてヘテロダイン周波数変換技術を確立できれば、電波干渉計のように光を波として受信し、位相情報を用いることで複数の望遠鏡で受信した信号を掛け合わせて実効的に大きな口径の望遠鏡を合成でき高角度分解能化が期待できる。また、干渉のためのコヒーレンス長を周波数変換比だけ長くすることが可能となり、低周波でのサンプリング後に相関(フリンジ)検出が行え、光の位相も測定対象になるため高角度分解能が望める。このことは、光信号情報をマイクロ波まで周波数を落とせるので、高周波数分解能での光スペクトル解析を行えることも意味している。さらに光ファイバ部品で全て構成が可能な場合、光軸アライメントの必要がなくなり、望遠鏡部と相関処理部を独立したシステムとして構成できるため自由度が大きく、大型望遠鏡への応用も期待できる。本研究により光位相を用いた超高空間分解能の干渉計を実現するための光ヘテロダイン方式の基本技術の実証を行う。

3. 研究の方法

光ヘテロダイン方式の基本技術の実証のためファイバベースでのヘテロダイン方式の光干渉計を研究対象とする。2つの超小型のコリメータレンズを集光器として用い直接ファイバにカップリングする最も簡便な光干渉計システムを構築し、2素子のヘテロダイン周波数変換、相関検出などの基本技術検証を行う。

研究代表者は 1550nm (193THz)でのフォトニック技術を用いた高周波発生・伝送・較正信号発生などの研究を行っている。この近赤外

1550nmでの測定器等を用いて本研究を進める。このため受信波長を近赤外領域としている。ファイバベースでのヘテロダイン方式近赤外干渉計の基本技術検証のため、以下の開発を行う。

地上での光干渉計を考えた場合、大気による揺らぎを無視し得る最大口径:20~40cm開口の望遠鏡を集光器素子として用いるのが信号対雑音比の観点からは望ましいが、今回はヘテロダイン方式の光干渉計への応用の可能性を探るため、超小型のコリメータレンズ(ビーム径7mm程度)を集光器として用いると共に、直接ファイバにカップリングする最も簡便なシステムを導入する。観測対象を太陽とすることで、超小型システムで原理実証に特化した実験系が可能となる。実験では2素子でのヘテロダイン周波数変換、相関検出などの検証に重点を置く。

超小型のコリメータレンズを集光器にした場合、たとえ太陽を観測対象にしても-55dBm/0.5nm程度の受光量にしかならず、高感度の光検出器を用いる必要がある。一方、光学系が小型であるので追尾系に小型のパンチルト駆動系を用いることができる。2台の独立したパンチルト駆動系を用いることで、地球回転による2素子ベースラインの回転が起こり、相関フリンジ周波数の変化が生じることになる。このフリンジの周波数の変化により、フリンジレートゼロに現れる雑音成分と真の相関フリンジとの分離が可能になると考えられる。一方、相関積分処理のためにはフリンジ回転を止める必要がある。フリンジ回転を止める操作は、フリンジレートゼロに現れる雑音成分に対しては拡散させる操作と等価になる。

平成28年度は光干渉計の基本実験系(ハード・ソフト)開発を行い、平成29年度は簡便な外部周波数によるアナログ的なフリンジ回転補正を試みる。

これらにより、ヘテロダイン方式の光干渉計へ応用する場合の技術検討を行い、ヘテロダイン赤外干渉計の実現の可能性を実際に相関フリンジを得ることで検証する。

平成28年度

光コリメータ(小型レンズでファイバと自由空間とを結合)、光分配・合成器、高感度光検出器(フォトミキサ)を2素子分とローカル周波数用高安定レーザを導入し、最も基本的なヘテロダイン光干渉計アナログ部を製作する。

平成29年度

ヘテロダイン方式を用いることで新たに考慮しなければならないことがある。その一つが相関フリンジの高速回転である。フリンジの回転は、回転する地球上でヘテロダイン周波数変換を行うことで発生してしまう。このフリンジ周波数は、天体と基線ベクトルとの位置関係で変化する。このため周波数変換を

行わない従来の光干渉計では遅延追尾のみで良かったものが、ヘテロダイン方式では遅延追尾と同時に周波数の変化するフリンジ回転補正も考慮しなければならなくなる。フリンジ回転補正も全てデジタルで行うことが理想であるが、今回はシステム実証のため外部発振器を用いてアナログ的に周波数変換を行うことでフリンジ回転を止めて短時間積分を行う。この積分により相関振幅の信号対雑音比の向上をはかり高角度分解能の確認を行う。

4. 研究成果

光でのヘテロダイン方式の開発は、現有の1.55 μ m帯の光関連の測定器を用いて行う。ヘテロダイン変換光干渉計の基礎試験を行うにあたり、最小システムとしての2素子の受光部とヘテロダイン周波数変換部の開発を行った。

4.1. 基礎実験

光ヘテロダイン変換(ファイバベース)の可能性を探るため、システムレベル試験を行った。図3にシステムレベル試験ブロックダイアグラムを示す。

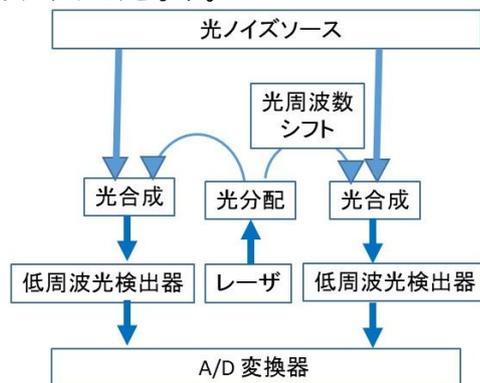


図3 光ノイズソースを用いた相関実験

使用できた光検出器は低周波(<100MHz)で低感度であったため、天体信号よりはるかに強い光ノイズソースを用いてヘテロダイン周波数変換を試みた。ヘテロダイン変換は光ノイズソースとローカル用のレーザ光を混ぜて行われた。光部品は全てファイバ部品で構成されている。

光ノイズ自体が広帯域な信号であるため、光検出器でのインターモジュレーションにより周波数残差ゼロのところに雑音成分の相関が常に発生している。これと真のヘテロダイン周波数変換による信号の相関フリンジを分離するためにレーザ光の片方に光周波数シフトを与えた。光検出器で検出し相関処理を行った結果を遅延・周波数軸上にプロットしたものを図4に示す。

図4では周波数オフセット分だけずれた位置に相関フリンジが得られているのが分かる。共通光雑音を狭帯域レーザ光で独立に周波数変換し、相関を得ることに成功した。

この結果から光帯域ノイズのヘテロダイン変換技術は有望であり、天文用ヘテロダイン光干渉計の可能性は十分にであると判断される。実際に光干渉計として応用した場合は、天体と干渉計素子の位置関係で相関フリンジの回転が起こる。これを用いて周波数残差ゼロのところの雑音成分と真の相関との分離を行えるものとする。

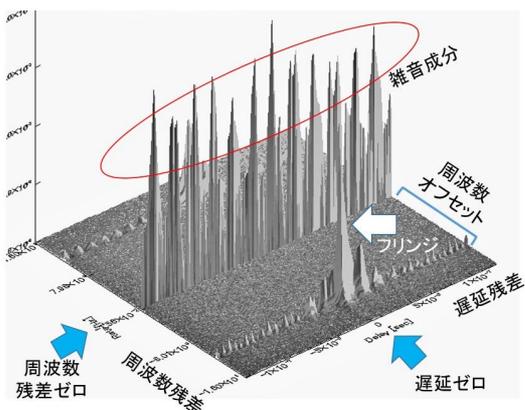


図4 検出された相関と雑音成分

4.2. 観測系

地上での光干渉計を考えた場合、大気による揺らぎを無視し得る最大口径：20～40cm 開口の望遠鏡を集光器素子として用いるのが信号対雑音比の観点から望ましいが、今回はヘテロダイン方式の光干渉計への実証を行うことに目的を絞り、超小型のコリメータレンズ(光束径7mm程度)を集光器として用い、直接ファイバにカップリングする最も簡単な観測システムを製作した(図5)。観測対象を太陽とすることで、超小型システムで原理実証に特化したシステムとすることができる。超小型のコリメータレンズを集光器にしているため、追尾系も簡易で小型なパンチルト駆動系を用いることができる。超小型のコリメータレンズを集光器として用いるため開口径が小さく、たとえ太陽を観測対象とした場合でも観測帯域幅(100MHz or 1GHz)あたりの信号強度は非常に小さくなり、高感度なアパランシェフォトデテクタ(フォトミキサ)での光・電気変換を行う必要がある。



図5 パンチルトに搭載されたファイバカプラ

4.3. 太陽追尾計算

ファイバに正確に受信光を結合するためには精密な太陽追尾が要求される。太陽の方角、仰角計算は、長谷川・長沢らの教科書を基に長時間ファイバにカップリングが可能な精度まで追い込んだ。

以上の開発を基に平成29年度にアナログ的なフリンジ回転補正を試みたが、雑音同士の相関が大きくSNRが極めて悪くなり、真の相関との分離が不十分であることが判明した。そこで計画を拡張し、広帯域化とデジタル的にフリンジ回転補正・積分が可能なXFタイプのデジタル相関処理システムを導入した。

4.4. デジタル相関器

高速A/D変換器(2048MSPs)とデジタル相関器を導入した。

デジタル相関器は、XFタイプの複素相関器であり、1024bitラグとフリンジ回転補正のための数値制御発振器(Numerically controlled oscillator)を有している。

基本性能確認のため光ノイズソースを用いた図3の試験を再度行った。

得られた相関は、広帯域化により図4よりも非常に鋭いデルタ関数の形状をしている。また、フリンジ回転補正も併せて行っているため図の中心付近に相関を検出していることが分かる。相関振幅0.058。

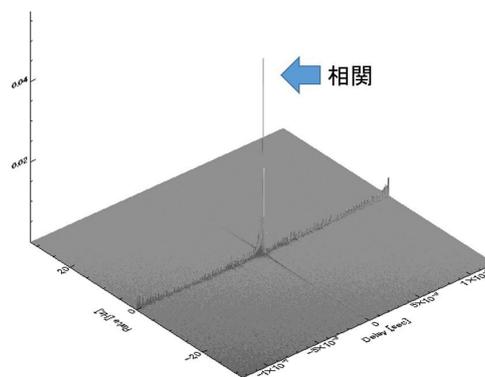


図6 デジタル相関器での人工雑音どうしの相関

4.5. 予測値計算の高精度化

地球回転で生じる相関フリンジ周波数・加速度・遅延追尾計算システムを開発した。

デジタル相関器では、相関フリンジ周波数・加速度・遅延追尾が予測値計算結果に沿って行われる。高精度の幾何学的遅延量を求めるために必要な物理量は、星の方向ベクトルと2受光器のベースラインベクトルから求められる。本予測値計算は地球回転で生じる相関フリンジ周波数・加速度・遅延追尾計算を行う。本計算は、将来の恒星観測に対応できるものにした。地球回転による座標変換には、歳差、章動、地球日周運動、極運動、光行差等を考慮した。太陽視位置は国立天文台の暦象年表を用いて計算を行った。

4.6. 太陽観測

これらの機器を用いた太陽観測実験を 8.25m 東西基線で行った。観測は、実験室の南面の窓を用いて行われた。2 台のパンチルト雲台は、独立に駆動される。パンチルト雲台は、直接床面に置かれているため軸の傾きが僅かに生じる。この補正はファイバカプラ保持機構の微調節機構（図 5）を用いてパンチルトごとに行った。

ファイバカプラで受光された信号は、周波数変換用のローカル光信号（1535 nm, 2 局共通）と混ぜられアバランシェフォトダイオードで光周波数変換及び光電気変換が行われる。光ヘテロダインにより周波数変換された IF 信号のアナログ帯域幅は、フィルタを用いて 1 GHz に帯域制限され、2048 Msps の速度で A/D 変換後、予測値計算結果に基づいた地球回転補正がデジタル複素相関器で施されフリンジ検出が行われる。

観測の結果、相関フリンジ（図 7）と考えられる信号を検出した。しかしながら、この実験において基線ベクトルの設定に一部ミスが判明した。このため本来図の中心に来るべきフリンジがずれた位置に検出されている。相関振幅 0.00098。

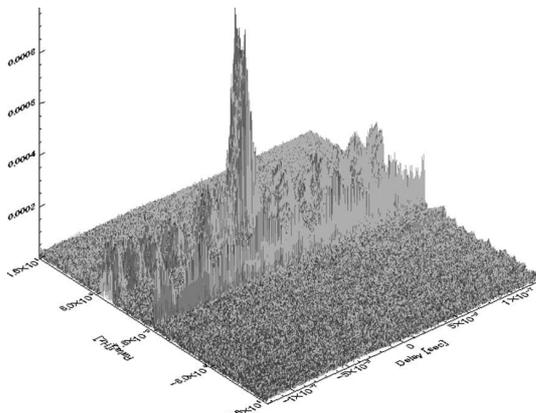


図7 デジタル相関器での太陽の相関

太陽は本システムの分解能より大きいいため分解され、上記の人工雑音を用いた相関（図 6）のような鋭いデルタ関数状にはならず、遅延、レート方向に広がりを持っている。本結果はいろいろと不満足な点が多かったため、観測系の改修を繰り返した。残念ながら、更なるアナログ部の広帯域化作業中にアバランシェフォトダイオード（高感度光検出器）の静電破壊が生じてしまった。このため本最終結果報告書に掲載できたのは、調整前の結果のみであり、満足できるものではない。観測数も十分とは言えない結果となっている。

図 7 で得られた信号が真の相関フリンジである確証と十分な観測数を得る必要があるため、新たな高感度光検出器を内部予算で購入し、検証を行いたいと考えている。検証後

に論文化を行う予定である。

光ヘテロダイン方式干渉計としては道半ばであるが、当初の目標である光ヘテロダイン方式の基本技術の実証に関しては、十分な結果が得られたものと考えている。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 2 件)

木内等、光ファイバベース 1.55 μ m(193THz)ヘテロダイン光干渉計の検討 その 3、日本天文学会 2017 年秋年会

木内等、光ファイバベース 1.55 μ m(193THz)ヘテロダイン光干渉計の検討 その 2、日本天文学会 2016 年秋年会

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木内等 (KIUCHI, Hitoshi)

国立天文台・チリ観測所・准教授

研究者番号：90358911