光学的に直角位相信号を生成する LDV 光学系の開発*

栗原 昇^{*1}, Harald MÜLLER^{*2}, Rainer KRAMER^{*2}
Gesine GROSCHE^{*2}, 寺尾 吉哉^{*1}, Dietrich DOPHEIDE^{*2}New Optical Technique for the Generation of Quadrature Signals on
Laser Doppler VelocimeterNoboru KURIHARA^{*3}, Harald MÜLLER, Rainer KRAMER,
Gesine GROSCHE, Yoshiya TERA0 and Dietrich DOPHEIDE^{*3} National Metrology Institute of Japan,
AIST Tsububa Central 3, 1-1-1 Umezono, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-8563 Japan

A novel laser Doppler velocimeter (LDV) technique which uses two single-frequency diode lasers, one for each LDV beam, is presented. The existing techniques using the optical frequency difference between two lasers for directional discrimination was enhanced by the technique described here. The Doppler frequency extracted by an optical superposition technique and a pair of quadrature signals in the base band was generated without any broadband electronic heterodyning. The electronic heterodyning on the conventional systems was implemented by an electronic mixing technique of the beat signal of the two lasers and the measuring signal generated by the scattered light of the LDV beams. This paper describes a new optical technique in contrast to these electronic heterodyning systems. In order to extract the Doppler frequency optically, undesired mixing products must be avoided. The realization of this concept is based on the superposition of four light waves on one photodetector, where only two pairs of light waves are made to forcedly interfere by polarization or by optical adjustment. Thus, the photodetector acts as an optoelectronic element that superimposes two optical beat signals, so that the Doppler frequency is obtained from the envelope of the resulting output signal directly. In order to obtain the desired directional information, a second photodetector for quadrature signal generation is required. The phase delay between the detected signals was fixed by positioning in the expanded wavefront of the reference beams. A prototype of the directional LDV, which uses two lasers and the described optical mixing, has been realized.

Key Words: Laser Doppler Velocimeter, Laser, Optical Measurement, Heterodyne, Signal Processing

1. はじめに

近年、レーザドップラー流速計(LDV または LDA)は電子・光学デバイスの進歩とともに発展し、より安価で高性能なものとなってきている。特に、半導体レーザが応用されるようになってからは、コスト面での障壁が低くなり、実験研究用として普及するようになった。それに伴い、対象も模型実験から実機試験へと、より複雑かつ高度になりつつある。これまでに、半導体レーザによるシステムで高度な処理を実現するために、さまざまな新しい工夫がなされてきた。例えば逆流測定においては、従来の音響光学素子(AOM またはブラッグセル)の代わりに直角位相信号処理を応用することで信号強度を大幅に向上させる試みがある⁽¹⁾。すなわち、AOM では使用しない次数の回折に

より損失が生じるのに対し、直角位相信号処理を行う LDV では2個のレーザ光源を使用するので、限られた光エネルギーが有効に活用されるのである。高い時間解像度により少ない周波数の信号から正方向・逆方向の速度測定が可能となる。

直角位相信号は、互いに90°の位相差をもつ信号対により光波干渉計の位相解像度を高める手段としてよく知られている。FFT等による周波数測定では、信号周期数が少ないと結果の信頼性が大幅に低下するが、この方法ではわずか数周期での測定が可能となる。LDVに応用した場合、信号のSN比が十分に高ければ信号周期数とほとんど無関係に周波数測定と方向判別を行うことができる⁽²⁾。また音響振動など、測定体積内部で急激に加速するような流れに対しても適用可能である⁽³⁾。さらに、直角位相信号の発生に各ビームにそれぞれ一つずつの半導体レーザを使用した場合、二つのレーザ間の光出力差がAOMの代わりにシフト周波数の発生源となる⁽¹⁾。このように直角位相信号処理の応用により、測定体積におけるレーザ強度は高まり、小形かつ強力なLDVシステムの実現が可能

* 原稿受付 2000年12月18日。

^{*1} 正員。独立行政法人産業技術総合研究所計測標準研究部門
(〒305-8563 つくば市梅園1-1-1 つくば中央3)。^{*2} Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Bundesallee 100,
D-38116 Braunschweig, Germany)。

E-mail: Noboru-KURIHARA@aist.go.jp

となる。

ただ、この方法ではレーザ間の光周波数差によるヘテロダイン効果を得るために電気回路を広帯域にせざるを得ず、高周波の外乱に弱いという短所があった。そのため、例えば飛行中の航空機上での測定においては機内に発生する高出力の無線信号の影響により、データレートの低下を招いたという報告がある⁽⁴⁾。この問題は、直角位相信号処理を行う LDV において光学系を改善し、測定信号と参照信号との相関を取るために電氣的なヘテロダイン効果で要求された帯域幅を小さくすれば、解決されるであろう。そこで本報では、光学的に直角位相信号を発生させる方法を考案し、その有効性を確認する実験を行った。

2. 測定原理

2.1 各ビームにそれぞれ一つのレーザを用いた LDV の原理 二つのレーザ光源における光周波数差を AOM の代わりに周波数シフトの発生源として応用する LDV の光学系を図 1 に、信号処理系を図 2 に示す。

今日では一般的となった差動形 LDV において受光信号は、両方のビームによる光学的なヘテロダイン効果により与えられる。すなわち測定信号は、二つのビーム間の周波数差が搬送周波数としてドップラー周波数に加算された信号である。図 2 のように光源の直後で採取したビームの干渉により参照信号を生成すれば、光周波数差を求めることができる。これは異なるレーザを用いた場合にも有効であり、周波数差の帯域において参照信号と測定信号との相関を取れば、ドップラー周波数が抽出される。この相関演算は測定信号と参照信号との電氣的なヘテロダイン効果により行わ

れ、図 2 のようなミキサ回路により、ドップラー信号の周波数帯において直角位相信号が生成される。

直角位相信号を用いる利点は測定体積内における粒子の移動方向だけでなく位置に関する情報が得られる点にある。一組の直角位相信号の波形を何らかの手段で記録すれば、その位相から信号周波数が算出される。いま、時間とともに変化する測定信号の振幅を $B(t)$ 、一組の直角位相信号を $\sin \phi(t)$ 、 $\cos \phi(t)$ とすると、信号の位相 $\phi(t)$ は式 (1) で求められる。

$$\phi(t) = \tan^{-1} \left[\frac{B(t) \sin \phi(t)}{B(t) \cos \phi(t)} \right] \quad \dots\dots\dots (1)$$

ドップラー周波数を f_D 、干渉じまの間隔を δ_f 、測定体積内における粒子の位置を $x(t)$ とすると、式 (1) で得られた $\phi(t)$ は、

$$\phi(t) = 2\pi f_D t = \frac{2\pi x(t)}{\delta_f} \quad \dots\dots\dots (2)$$

として表される。 f_D はこの式 (2) から求められるので、粒子が急激な加速を伴う場合や周波数が極端に低い場合であっても速度が測定できる。また、 $\phi(t)$ の符号は信号周波数の符号を表すので、流れの方向判別が可能となる。

搬送周波数はレーザ光源の光周波数差なので少なくとも 100 MHz の帯域にあり、その検出には 100 MHz よりも広い帯域幅の光検出器を用いる必要がある。ただ、測定信号と参照信号との混合で除去されるため、周波数の安定性や帯域幅が結果に及ぼす影響は無視できる。直角位相信号の生成においてハイブリッドカップラは広帯域で 90° 位相シフトを行うが、その帯域が搬送周波数の変動により制限されるのに対して、搬送周波数の最大値は光検出器の帯域幅とアナログ回路の帯域幅で決まる。使用するハイブリッドカップラによるが、帯域幅が 100 MHz 以下で位相変動がわずか数° という範囲で動作可能となる。

ドップラー信号の周波数帯にある直角位相信号対は適当な LDV 信号処理器により数値化される。直角位相信号の周波数は速度に比例するドップラー周波数であり、その位相が +90° か -90° かは測定された速度の方向により決まる。

2.2 光学的な直角位相信号の生成 散乱光と参照光によるヘテロダイン効果の利用について述べたが、これを電気回路から光学系に置き換えるには、四波混合に関する考察が必要である。光学的な遅延による位相シフトを生成するために、各ビームの偏光状態、および幾何学的な調整という別々の方法に基づいた解決法について検討した。

図 1 の光学系は、その内部で散乱光と参照光をそれ

Fig. 1 Optical set-up of an LDV system using the optical frequency difference of two tunable lasers

Fig. 2 Mixer unit for the quadrature signal generation

それぞれ異なる光検出器で受光して、測定信号と参照信号を出力する。その後、図2の回路において参照信号を分割してその一方を遅延させ、両者を測定信号と混合することで直角位相信号が得られる。すなわち、参照光を分割して片方に一定の光路長を追加し、光検出器前方において混合すれば電気的な処理過程を光学系に置き換えることができる。

図3は、図1および図2を統合して、さらに光学的な混合へと機械的に置き換えた等価概念図である。図3において、光源Bおよびbはコヒーレントなビームを単一粒子に送る。これらの光源は独立しており、それぞれのビームによる散乱光の性質も互いに異なるので、粒子上に散乱光の光源を仮想的に配置して記号Mおよびmで表す。この光学系では散乱光と参照光を受光器上で混合するために、光学系の出口手前にあるハーフミラーにより両方の送光ビームから参照光を取り出し、それらを重ね合わせ、さらに二つの光路に分割して受光器Rおよびrで検出する。

従来の直角位相信号処理では参照光同士および散乱光同士の干渉の結果を電氣的に混合するため、混合する以前の位相情報は失われている。しかし、それをそのまま光学系に置き換えると、光源の位相情報が残ることになる。図3において光学系に戻る光は、各光源からのビームによる二つの散乱光が互いに干渉した光である。一方、受光器上ではさらに搬送周波数を抽出するために参照光を重ね合わせている。したがって、受光器Rおよびrが受け取る光波はそれぞれ四つずつとなる。そこで、受光器上での複雑な干渉に関するトポロジ的な関係について検討した。

図3において各要素のつながりだけに着目すると、光源bから始まってRに至る関係はBからrまでと等価であり、光路B-M-Rおよびb-m-rのつながりは互いに対称な関係にある。Rおよびrにより受光さ

れたMからの散乱光は、もともと光源Bから発生したものである。これらの散乱光はBからの参照ビームと干渉する。したがって、光路B-M-{Rまたはr}およびB-{Rまたはr}は参照光形LDVとみなせる。光路b-m-{Rまたはr}およびb-{Rまたはr}についてもトポロジ的な関係が同様であり、図4は二つの参照光形LDVを同じ場所に構築した光学系であることがわかる。ただ、それらが干渉する過程はとても複雑になり、図3の光学系により得られた信号から適切な速度情報を取り出すことは容易ではない。

直角位相信号の抽出にはこれら4本のビームの性質を利用することになるが、最終的に必要な情報は散乱光同士および参照光同士という、二組の干渉の結果だけである。すなわち、光路{Mまたはm}-Rおよび{Bまたはb}-R、あるいは{Mまたはm}-rおよび{Bまたはb}-rは干渉すべきであるが、それ以外の組合せによる影響は除去されるべきである。この問題の解決策としては、二組の干渉光について強度を加算することが妥当である。

2.3 ドップラー信号の抽出法 十分小さな誘電体の粒子における光散乱で偏光状態はほとんど変化しないので、図3において参照光と散乱光の偏光軸を互いに直交させることで、不必要な干渉は抑えられる。ただ、従来の直角位相信号処理において電圧信号のミキシングが乗算の成分を生成するのに対し、互いに干渉しない光の重ね合わせは乗算の成分を生成しない。

レーザ光源間の周波数差を f_{shift} 、測定信号の瞬時振幅、強度および初期位相をそれぞれ A_{meas} 、 I_{meas} 、 ϕ_{meas} そして参照信号の瞬時振幅、強度および初期位相をそれぞれ A_{ref} 、 I_{ref} 、 ϕ_{ref} とすると、

$$A_{\text{meas}}(t) = I_{\text{meas}} \cos [2\pi(f_{\text{shift}} + f_D) \cdot t + \phi_{\text{meas}}] \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$A_{\text{ref}}(t) = I_{\text{ref}} \cos (2\pi f_{\text{shift}} t + \phi_{\text{meas}} + \phi_{\text{ref}}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

として表されるので、測定信号と参照信号の強度を加算した波形の瞬時振幅 E_{mix} は、

$$E_{\text{mix}}(t) = \sqrt{I_{\text{meas}}^2 + I_{\text{ref}}^2 + 2I_{\text{meas}}I_{\text{ref}} \cos (2\pi f_D t - \phi_{\text{ref}})} \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。すなわち、強度の加算により得られた信号はドップラー周波数の振幅変調を受けることになり、参照信号の位相は保存される。

このように、本システムの実出力波形は従来形のLDVと同じ性質をもたないため、出力信号を利用するには何らかの非線形処理が必要である。この状況であっても、二つの信号間の位相差は流れの方向を示す

Fig. 3 Interpreted concept of quadrature signal processing LDV with optical mixing

ものと予想される。そこで、本報では実際に光学系を製作して以上で述べた測定原理に対する実証試験を行った。

3. 実験装置および方法

3.1 概要 これまで、二つの光検出器に向かう参照光ビームにおいて光路差を設ける方法について述べてきた。実際には、光学系において光路差を設ける部分では複数のコヒーレント光を重ね合わせたビームに対する加工を行っているため、この方法は必ず干渉じまを伴い、光学系調整に対して敏感になるという問題がある。また、参照信号のビジビリティについても、ビームの重ね合わせによる干渉じまの間隔と光検出器の大きさとの比率で相対的に変化する。別の見方をすれば、干渉じまは時間的な履歴を含む空間情報という解釈も成り立つので、光路差の与え方をより簡便な方法に改善することができる。

参照光ビームの重ね合わせで発生する参照信号のようすは、元のビームの調整状態により間隔が変わる干渉じまの動きでモデル化できる。良好なビジビリティを得るためには光検出器の口径はしま模様よりも小さい必要があるが、有効径を小さくするほど受光器における信号の位相情報は幾何学的な設定に対して敏感になっていく。つまり逆に、光検出器の間の位相差を光路長ではなく位置の変化により制御したほうが位相の設定に対して有利になる。したがって、光学系の試作に当たっては、参照光ビームを拡大することで検出される各参照信号の位相差をつけることとした。また、実験において強い散乱光を得る目的から、受光光学系は前方散乱方式とした。

図4は、試作した光学系の概要である。送光光学系から前方へ向かうビームは受光光学系において取り出された参照光として使用される。本光学系では2章で

述べた不要な干渉を制限するために、参照光と散乱光について偏光軸を直交させて重ね、受光器に集光している。

3.2 光学系の仕様 送光光学系のレーザ光源には2台の周波数倍波 Nd:YAG リングレーザを用いた。本レーザには、ガウス分布に近いレーザビーム形状、20 kHz という狭い線幅、そしてモードホッピングなしで 2 GHz まで出力周波数の可変域が存在するという優れた特徴があり、各ビーム1台のレーザ光源で動作する LDV システムに対しては、この形のレーザが適している⁽⁵⁾。その応用により、1 MHz から数百 MHz までの範囲でビート周波数を取り出すことができる。

レーザ光源はそれぞれのビームに対して 6 mW まで減衰され、65 mm の距離で固定した。2本のビームのウェストを一致させ平行にするために、直径 4 mm のコリメータを2個用いた。焦点距離 310 mm のフロントレンズによりそれら平行ビームを 100 μm の測定体積に集光した。

受光光学系において、送光光学系からの直接光は重ね合わされてそれらの偏光状態は 90° 回転される。参照信号の間の位相差はシリンドリカルレンズで拡大された干渉じまの間隔により決定している。また、ハーフミラーにより参照光の光強度を散乱光と同程度に低減させた。散乱光は受光光学系のフロントレンズによりコリメートされ、ビーム状に圧縮される。散乱光のビームは光検出器であるアバランシェフォトダイオード (APD) を照射するために2本に分割される。APD の間隔は受光光学系のフレームに固定されている。拡大された参照光の干渉じま間隔は参照光ビームの調整により変更され、APD の間隔に対して最適化される。この調整は位相差を得るために検出された参照信号の位相を測定しながら容易に行うことができる。それぞれの APD は参照信号を背景とした形でビート信号を受光する。そして、流れの方向はそれぞれの信号のエンベロープによる位相シフトの方向により示される。

3.3 データ収録器および測定対象 本システムでは光周波数差を搬送周波数として利用している。発振線幅が狭く、きわめて安定な Nd:YAG レーザを使用しているにもかかわらず、わずかな操作により光周波数は MHz から数百 MHz まで掃引されることになる。そのため、実験的に本光学系の有効性を実証するには高周波に対応したデータ収録装置が必要である。また、二つの検出器からの信号間における位相差を用いる計測法であるため、それらの同時測定が必要となる。そこで本報では、1 GHz の標本化周波数と FFT 解析機

Fig. 4 Set up for an optical quadrature signal generation in the perpendicular polarization

能をもつ2チャンネルのデジタルオシロスコープ(DSA 602, ソニーテクトロニクス製)を使用した。それぞれのチャンネルに対しては、二つの受光 APD を接続し、その片方の信号波形によりトリガをかけた。

本システムの評価試験においては、任意に噴射方向を変化させることのできるノズルからの自由噴流を測定対象とした。噴孔の内径は 3 mm であり、液滴発生器(TSI 9302)により数 μm の液滴径にある水-グリセリン混合液を発生させ、散乱粒子として噴流中へ混入した。

4. 結果および考察

これまでに述べたシステムを用いて、自由噴流を測定対象とする実証試験を行った。図5に、各 APD から得られた典型的な信号波形、およびそのパワースペクトルを示す。式(3)~(5)において予想したとおり、APD からの信号はレーザ間の光周波数差近辺の高い周波数成分をもち、それより低いドップラー周波数で振幅が変調を受けている。また、APD からの信号のパワースペクトルは、レーザ間の周波数の成分および、レーザ間の周波数差にドップラー周波数が加わった成分の重ね合わせとなった。この測定の直前・直後において散乱光の光路を遮断して参照信号のみを観測したところ、その卓越周波数は速くても 1 s に数 MHz という緩やかなペースで連続的に変化してい

た。

このようなレーザ間の周波数差が変化する状況においても、信号波形の位相差は 90° を保っており、粒子が到達するごとに観測されるバースト信号において、ほとんど一定であった。そこで、同じ流速において流れを逆方向に転換したところ(図6)、信号波形の位相差は図5の状態から反転した。また、パワースペクトルに見られる測定信号の卓越周波数も参照信号の周波数を隔てて反対側に移動している。APD からの信号の挙動は噴流を方向転換させた状態でも同様であることから、位相差の反転によって流れの方向判別が可能であることがわかる。

また、参照信号において位相差が 90° からずれる場合は、光学系の調整ずれや参照信号自体の変化により生じる可能性がある。そこで、APD からの参照信号の位相差が 90° でない場合についても試験を行ったところ、噴流の方向転換によって位相差が同様に反転することが確認された。これは二つの信号の位相に限った挙動であり、ドップラー周波数の値そのものや方向判別に対してほとんど影響がない。したがって、方向判別だけが必要で粒子の位置測定を行わない場合は、不完全な調整による参照信号の位相ずれはまったく問題とならない。

図5および図6の信号波形はドップラー周波数の成分を振幅としてもたないため、そのまま低減フィルタ

Fig. 5 Photo detector signals (APD 1, APD 2) in the time domain and in the frequency domain

Fig. 6 Photo detector signal (APD 1, APD 2) in the time domain and in the frequency domain (the alternative flow direction to Fig. 5)

に通すと信号が消失する。したがって、本システムを実際の測定に応用するためには、振幅としてドップラ一周波数が抽出可能な状態に変換する必要がある。この変換は APD からの出力信号に対して非線形増幅器に通すなどの後処理により、容易に実現可能であると考えられる。

5. む す び

LDV のそれぞれのビームに対して二つの可変レーザを適用することにより、方向判別可能な LDV を実現する新しい概念について述べた。レーザ間の光周波数差により発生するビート信号を参照信号、測定体積からの散乱光を測定信号として電気的なヘテロダイン効果を利用する LDV はすでに実現されているが、本報ではそこに光学的なミキシングを適用する可能性について述べた。ドップラ一周波数(測定情報)の抽出においては、光検出器上で重ね合わされる 4 本のビームを混合するときに複雑な干渉で発生する不要な情報を除去する方法について検討を行った。この光学的なミキシングを実現するには、光検出器上に重ね合わさった光波のうち二組の光だけが互いに干渉しあうように、偏光状態あるいは波面の状態を制限する必要がある。本システムが出力する結果はドップラ一周波数の振幅変調を伴う高周波信号であり、光検出器は光学的なビート信号を重ね合わせる光電子的な素子として働く。そして、複数の光検出器を使用することにより、直角位相信号を生成させて方向判別の情報が得られる。これら一連の処理は、光学系内部において参照ビームの拡大により形成した干渉じまと光検出器との位

置関係により簡単に実現される。

二つのレーザを利用して、光ミキシングに関する新しい概念による方向判別 LDV の可能性を示した。試作した光学系の特性は理論的な予測とよく一致し、光ミキシングを応用した新しい LDV システムを展望する結果が得られた。

文 献

- (1) Müller, H., Czarske, J., Kramer, R., Többen, H., Arndt, V., Wang, H. and Dopheide, D., Heterodyning and Quadrature Signal Generation: Advantageous Techniques for Applying New Frequency Shift Mechanisms in the Laser Doppler Velocimetry, *Proc. 7th Int. Symp. Appl. Laser Tech. Fluid Mech.*, Lisbon, (1994), 23.3.1-23.3.8.
- (2) Czarske, J., Zellmer, H., Plamann, K. and Welling, H., Compact Achromatic Laser Doppler Anemometer Employing Novel Powerful Fiber Lasers and Diffraction Optics, *Proc. 9th Int. Symp. Appl. Laser Tech. Fluid Mech.*, Lisbon, (1998) 15.3.1-15.3.6.
- (3) Strunck, V., Müller, H., Grosche, G. and Dopheide, D., Aerosol Size Measurement Using a Laser Doppler Probe and Acoustic Excitation of the Flow, *Proc. 9th Int. Symp. Appl. Laser Tech. Fluid Mech.*, Lisbon, (1998), 18.3.1-18.3.4.
- (4) Grosche, E. G., Müller, H., Strunck, V. and Dopheide, D., In-flight Measurements with a Laser-Doppler Anemometer Using Two Semiconductor Laser, *Proc. 8th Int. Conf. Laser Anemometry Adv. Appl.* Rome, (1999), 147-154.
- (5) Kramer, R., Müller, H. and Dopheide, D., The Realization of a Continuously Tunable Optical Frequency Shift LDV-System at Green Wavelength for Highly Turbulent Flows Using Diode Pumped Nd: YAG Lasers and Monolithic Ring Frequency Doublers, *Proc. 7th Int. Symp. Appl. Laser Tech. Fluid Mech.*, Lisbon (1994), 14.5.