УДК 65.012.8:534.2:535.3:534.8

Журиленко Б.Є., Сєріков О.В., Степура В.І.
Шевченко В.О.

ОГЛЯД ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ І МОЖЛИВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ЛАЗЕРНИХ СИСТЕМ АКУСТИЧНОЇ РОЗВІДКИ В РОЗСІЯНОМУ СВІТЛІ

Розглянуто фізичні процеси та відповідні пристрої, які при певному технічному доопрацюванні можуть бути використані у складі лазерних систем акустичної розвідки для зняття інформації не тільки у відбитому, а і у розсіяному світлі.

Ключові слова: лазерна система акустичної розвідки (ЛСАР), лазерний доплерівський віброметр (ЛДВ), лазерний віброперетворювач, лазерний доплерівський вимірювач вібрації, ефект Доплера, розсіяне світло.

Вступ. З розвитком новітніх технологій вдосконалюються і системи розвідки. У зв'язку з цим, необхідно вдосконалювати й відповідні методі та засоби захисту інформації. Одними з найбільш ефективних методів зняття акустичної інформації є використання лазерних систем акустичної розвідки, перевагою яких є можливість безконтактного зондування тонких поверхонь, що відбивають лазерний промінь на досить значні відстані від об'єкту спостереження. Найбільш дослідженими і описаними в літературі і Інтернеті є саме такі ЛСАР, що працюють у відбитому світлі. Але наряду з цим вже досить давно існують прилади для промислового користування, які при певному технічному доопрацюванні можуть бути використані для зняття інформації у розсіяному світлі. Дослідження у даній сфері мають надзвичайно високу актуальність для захисту інформації, тому що описані нижче технології та пристрої містять майже всі необхідні конструктивні елементи для ЛСАР, широко використовуються в повсякденному житті, розповсюджені на ринку, і не потребують спеціальних дозволів на їх придбання та використання. У зв'язку з цим, необхідні подальші дослідження цієї проблеми з метою пошуку нових методів та засобів захисту мовної інформації від ЛСАР в розсіяному світлі; вдосконаленні існуючих методів та засобів, що захищають інформацію від ЛСАР у відбитому світлі; розробці нових оптичних методів вимірювання небезпечних рівнів акустичних коливань на поверхнях з різних кутів та напрямків, на основі яких саме і можливо зробити обґрунтування небезпечності таких технологій.

Аналіз джерел. У промисловості застосовуються прецизійні засоби вимірювання параметрів руху з використанням лазерів [1]. Ці засоби мають достатньо високу точність, але проблемою у всіх цих вимірюваннях є необхідність наявності дзеркальної відбиваючої поверхні на об'єкті, який рухається. У цьому випадку високоточні вимірювання параметрів руху об'єкта можуть виконуватися з використанням когерентності випромінювання.

У переважній більшості випадків в оперативній роботі не можна забезпечити відбивну поверхню на об'єктах. Проте у всіх цих випадках можна скористуватися безконтактними дистанційними вимірюваннями у розсіяному світлі, для яких шорсткість об'єкта чи поверхні не має значення й може бути будь-якою – від абсолютно дзеркально відбивною до тієї, що абсолютно розсіює лазерне випромінювання.

Таким чином, основним принципом створення оперативної техніки в цьому випадку може бути дистанційність і безконтактність знімання інформації у розсіяному світлі з прецизійним вимірюванням параметрів руху [2].

З публікацій, що існують, необхідно звернути увагу на роботи, які були пов'язані з розробкою лазерного доплерівського віброметра (ЛДВ) [3-6] в Російській Федерації, який при певній доробці може бути використаний для систем лазерного зняття акустичної інформації з вібруючих поверхонь і середовищ по опто-електронному каналу витоку за допомогою ЛСАР. У цьому випадку застосовується найбільш перспективний спосіб лазерних вимірювальних систем, який заснований на розсіянні лазерного випромінювання поверхнею, що рухається. Внаслідок ефекту Доплера частота світла, що розсіяна об'єктом, який рухається відносно джерела, змінюється, причому різниця частот залежить від швидкості руху об'єкта. Розсіяне випромінювання має дві складові від двох променів, які інтерферують.

Якщо у вихідному сигналі фотоприймача виділити частоту, що дорівнює різниці частот інтерферуючих коливань (так звану частоту биття), то вона виявляється пропорційною швидкості руху об‘єкта.

Лазерні вимірювання швидкості безконтактні, забезпечують високу точність вимірювань, працюють в діапазоні швидкостей від декількох міліметрів до сотень метрів у секунду при високій швидкодії.

Аналізуючи публікацій по ЛДВ, відмітимо, що практично всі вони торкались або способів обробки доплерівського сигналу, або присвячені конструкторським аспектам реалізації ЛДВ. При цьому в літературі практично всюди при описуванні доплерівського сигналу застосовувалась детерміністська математична модель, яка обмежує можливість дослідження впливу на параметри сигналу чисто «оптичних» факторів (шорсткості світлорозсіючої поверхні об`єкта вимірювання). Відсутність теоретичного опису доплерівського сигналу утруднює розробку програмного забезпечення для цифрової обробки сигналу ЛДВ [7]. З цієї точки зору єдина робота по ЛДВ, що враховує статичну природу доплерівського сигналу може розглядатись лише як та, що має характер короткої попередньої інформації. У зв‘язку з цим можна припустити можливість створення інших принципів вимірювань спектра вібрацій та їх амплітуд [7].

З усього вищезазначеного виходить, що хоча існує перший російський промисловий зразок ЛДВ [8], проте відсутня інформація про застосування ЛДВ у цілях розвідки. Перевага лазерних доплерівських віброметрів у високій точності та чутливості вимірювання параметрів і в їх роботі у розсіяному світлі. Недоліки полягають у тому, що ці системи дуже коштовні та складні: потребують спеціальну оптичну систему й обчислювальну техніку для обробки результатів вимірювань, мають достатньо великі габарити. Але у процесі роботи можна виключити використання обчислювальної техніки на першому етапі обробки сигналу, зменшити габарити й здешевити апаратуру.

Постановка завдання. Завданням та метою статті є аналіз сучасних технологій вимірювань, що можуть бути використані у ЛСАР в розсіяному світлі.

Викладення основного матеріалу досліджень. Існують лазерні системи для виміру швидкості потоку рідини або газу. Ці виміри надзвичайно важливі для аеродинаміки й гідродинаміки, де необхідно знати, як й яким чином потік газу або рідини обтікає тіла різної форми. При традиційних методах у потік уводиться спеціальний вимірювальний зонд, що вносить досить великі погрішності, тому що спотворює картину обтікання тіла потоком. Щоб не збурювати досліджуваний потік, застосовують оптичні методи. Найбільш перспективний з них заснований на розсіюванні лазерного випромінювання потоком, що рухається. Внаслідок ефекту Доплера частота світла, розсіяного об'єктом що рухається, відносно джерела змінюється, причому різниця частот (зрушення) залежить від швидкості об'єкта. Розглянемо схему одного із приладів, що працюють по цьому методу й називаються лазерними доплерівськими анемометрами (Рис. 1).

Випромінювання гелій-неонового лазера 1 з вихідною потужністю 10...15 мВт направляється оптичною системою лінзи 2 й 3 на світлоподілююче дзеркало 9. Це дзеркало формує два пучки (вони позначені однією й двома стрілками), що направляють на дзеркала 4 і 8. Обидва пучки фокусуються лінзами 5 й 7 у тій області потоку, де потрібно виміряти його швидкість. Фотоприймач 6 реєструє випромінювання, розсіяне, наприклад, рідиною або зваженими в ній частинками. Розсіяне випромінювання містить дві складові, обумовлені розсіюванням кожного з пучків, які інтерферують.

Якщо у вихідному сигналі фотоприймача виділити частоту, рівну різниці частот інтерферуючих коливань (так звану частоту биттів), то вона виявляється прямо пропорційною швидкості потоку.

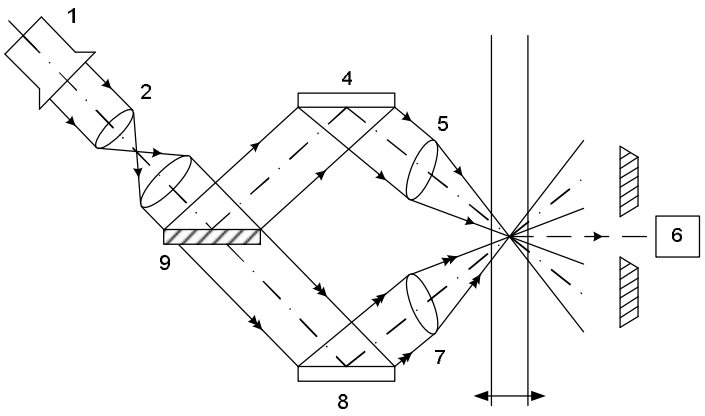

Рис. 1. Схема лазерного доплерівського анемометра

Лазерні вимірювачі швидкості потоку безконтактно забезпечують високу точність вимірювання, працюють у діапазоні швидкостей від декількох міліметрів до сотень метрів у секунду при високій швидкодії. Описана система може застосовуватися для ЛСАР у розсіяному світлі. Велика група лазерних вимірювальних систем призначена для лінійних вимірювань.

Вимірювання відстаней за допомогою лазерів залежно від дальності, умов застосування і необхідної точності здійснюється інтерферометричним, фазовим або імпульсним методом.

Інтерферометричний метод застосовують при вимірюванні невеликих (до декількох метрів) відстаней. На використанні цього методу засновані промислові лазерні вимірювальні системи для контролю переміщення вузлів верстата, точності установки затискних пристосувань, контролю операцій, тощо.

У схему інтерферометра Майкельсона (Рис. 2) встановлюється лазер 1 (найчастіше це стабілізований по частоті гелій-неоновий лазер). Випромінювання лазера розщеплюється світлоподільним дзеркалом 5 на два пучки – опорний і вимірювальний. Опорний відбивається кутовим відбивачем 8, вимірювальний – кутовим відбивачем 6; встановленим на деталі 7, відстань до якої визначається.

Обидва пучки зводяться тим же світлоподільним дзеркалом 5 і направляються на фотоприймач 4, де інтерферують. Оптична довжина шляху опорного пучка відома й постійна, а вимірювального – залежить від відстані до деталі. При зміні відстані до деталі змінюється різниця ходу між пучками. Якщо різниця ходу кратна довжині хвилі випромінювання лазера, то в результаті інтерференції фотоприймач зафіксує максимум потоку світла. Числа максимумів фіксується лічильником 3, а ЕОМ (2) обчислює відстань до об'єкта. Очевидно, що точність виміру відстані - порядку довжини хвилі (частки мікрона).

При вимірюванні великих відстаней, особливо в польових умовах (топографія, геодезія, сейсмологія й т.д.), використовують фазовий або імпульсний метод.

У фазовому методі для визначення дальності вимірюється різниця фаз посланого на об'єкт і відбитого сигналів. Розглянемо цей метод на прикладі роботи геодезичного далекоміра. У вітчизняному інфрачервоному лазерному далекомірі ГД-314 джерелом випромінювання є напівпровідниковий лазер на арсеніді галію (λ=0,91 мкм). Наприкінці вимірюваної дистанції (на об'єкті) установлюється кутовий відбивач. Відбите лазерне випромінювання надходить на фотоелектронний помножувач (ФЕП) приймального каналу. На помножувач подається також опорна напруга. При часовому впливі на ФЕП опорного й прийнятого сигналу амплітуда сигналу на виході ФЕП змінюється залежно від співвідношення фаз опорної напруги й напруги, пропорційної відбитому сигналу.

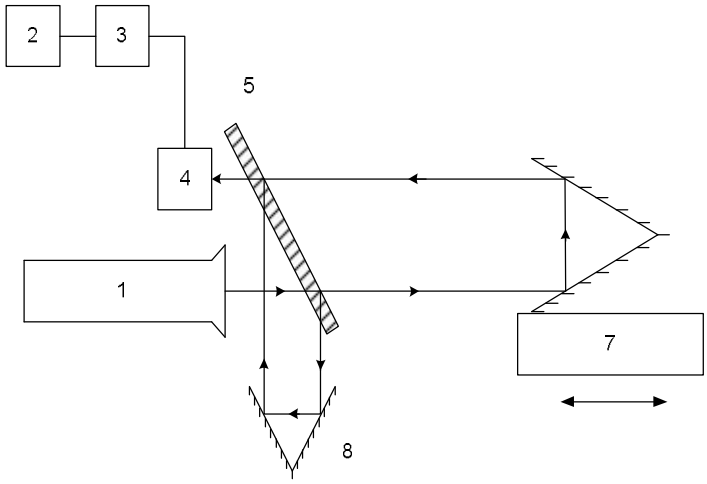

Рис. 2. Схема інтерферометричної лазерної вимірювальної системи

Плавно регулюючи фазу опорної напруги, домагаються, щоб сигнал на виході ФЕП був рівним нулю. Знявши в цей момент відлік фази по приладу, що називається фазометром, далі по таблицях визначають різницю. За допомогою далекоміра ГД-314 можна вимірювати відстані до 2000 м точністю ±5 см. Геодезичний далекомір «Квант», що використовує гелій-неоновий лазер (λ=0,63 мкм), дозволяє вимірювати відстані до 1000 м з точністю ±0,2 мм. Недолік фазових далекомірів – обов'язкове застосування дзеркального відбивача, встановлюваного на об'єкті.

В імпульсних лазерних далекомірах, широко застосовуваних у космічній техніці, випромінюється дуже короткий лазерний імпульс і виміряється час, протягом якого імпульс проходить до об'єкта й, відбившись від нього, повертається до приймача. Схема далекоміра імпульсного типу представлена на Рис. 3.

Випромінювання імпульсного лазера 4 із тривалістю імпульсу $(10...30)x10^{-9}$ с через об'єктив (лінзи 6 й 7) направляється у вигляді паралельного пучка на об'єкт. Частина лазерного випромінювання відгалужується напівпрозорим дзеркалом 5 на фотоприймач 3. У цьому каналі першим же лазерним імпульсом запускається прилад відліку часу 2. Відбите об'єктом випромінювання фокусується об'єктивом 8 і направляється на фотоелектронний помножувач 9. Посилений імпульс фотоструму передається в блок управління 10, що вмикає прилад відліку часу. Число імпульсів, що пройшли через прилад відліку часу з моменту випромінювання першого світлового імпульсу до моменту прийому відбитого сигналу, пропорційне дальності об'єкта й фіксується лічильником 1.

Точність вимірювання імпульсним далекоміром визначається частотою слідування і тривалістю імпульсів. Припустимо, що використовуються імпульси з тривалістю $\tau=2x10^{-8}$ с, що слідують із такою частотою, що інтервал між ними теж дорівнює $2x10^{-8}$ с. Тоді за час між двома імпульсами світло пройде відстань 6 м. Якщо потрібна більш висока точність, наприклад ±1 м, то тривалість лазерного імпульсу повинна бути зменшена до $3x10^{-9}$ с.

У наш час розроблено прилади для виміру коливань поверхні, які набули широкого поширення й промислового застосування і без перешкод продаються на ринку:

— лазерні доплерівські віброметри типів LSV-065, LSV-0026, LSV Series 6000, PDV-100, CLV-3D Compact 3-D Laser Vibrometr виробництва фірми «Polytec», Федеративна Республіка Германія;

— лазерний віброперетворювач LV-2 та анемометри ЛАД-03, ЛАД-06 розробки ТОВ «Лазерна техніка», Російська Федерація;

— лазерні доплерівські вимірювачі вібрації моделей 8336, 8337 та 8338 виробництва компанії «Брюль і К'єр», Королівство Данія.

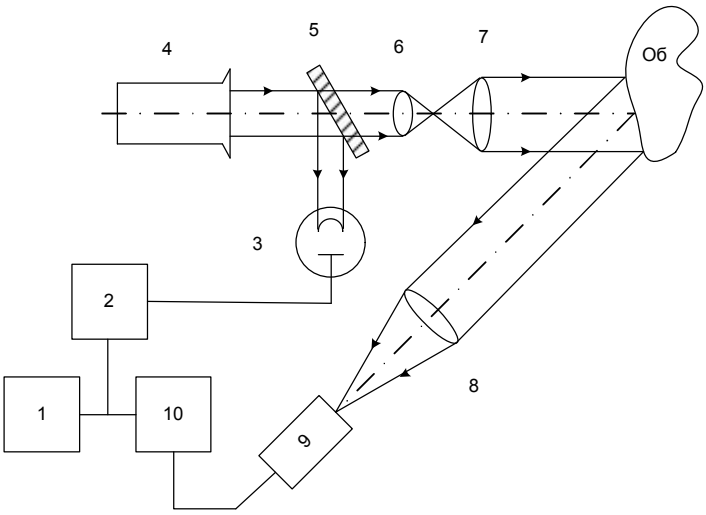

Рис. 3. Схема імпульсного лазерного далекоміра

Висновки. На підставі всього вищенаведеного, можна зробити висновок, що кожен з розглянутих фізичних процесів у певних умовах і технічних рішеннях, а також при певному технічному доопрацюванні може бути використаний в якості ЛСАР не тільки у відбитому, а і у розсіяному світлі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ю.Ф. Застрогин Прецизионные измерения параметров движения с использованием лазера. – М.: Машиностроение, 1986. – 272 с.

2. А.А. Детлаф, Б.М. Яворский Курс физики: учебное пособие для ВУЗов − М.: Высшая школа, 1989. – 608 с.

3. С.А. Куценко, А.М. Чмутин Фазовые соотношения в сигнале лазерного доплеровского виброметра. // Волгоград: ВолГУ, Препринт, 1990, N 7.

4. Н.М. Зотов и др. Анализ точности лазерного доплеровского виброметра. // «Измерительная техника», 1988, N 8.

5. А.М. Чмутин Спектральная обработка сигнала лазерного доплеровского виброметра. // Тезисы докладов Всесоюзного семинара «Метрология в прецизионном машиностроении».: Саратов, СФ ИМАШ АН СССР, 1990.

6. Журиленко Б.Є. Проблеми безконтактних дистанційних досліджень в оперативній техниці / Журиленко Б.Є. // Защита информации. Сборник научных трудов. – Киев, 2002. - Вып. 2(9) - С.100-107.

7. А.М. Чмутин К теории лазерного доплеровского виброметра. // «Лазерная техника и оптоэлектроника», М.,1993, вып. 1-2, с. 46-49.

8. Н.М. Зотов и др. Лазерный доплеровский виброметр. Промышленный образец 05.1267.00.00.00. // Тезисы докладов 3 регионального семинара «Диагностические применения лазеров». Волгоград, ВолГУ, 1990.

Надійшла: 13.09.2011

Рецензент: д.т.н., проф. Куц Ю.В.