

УДК 621.375(045)

В. М. Землянский, д-р физ.-мат. наук, проф.,
А. П. Чудесов

СИНТЕЗ ПРОТИВОФАЗНЫХ СИММЕТРИЧНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ СХЕМЫ КОГЕРЕНТНО-ОПТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Институт электроники и систем управления НАУ, e-mail: iesy@nau.edu.ua

На основе выполненных теоретических исследований создан комплекс прикладных программ синтеза фазовых противофазных симметричных пространственных фильтров для дифференциальной схемы когерентно-оптического преобразователя, использующий первый либо второй вид симметричного приёма при различных состояниях поляризации двух зондирующих пучков. Использование фазовых противофазных симметричных пространственных фильтров обеспечивает достижение отношения сигнал/шум на выходе когерентно-оптического датчика на порядок и более по сравнению с известными схемами. Это позволяет существенно повысить точность измерения скорости с помощью лазерного доплеровского анеометра, либо размера микрочастиц с помощью когерентного измерителя размеров микрочастиц.

Введение и постановка задачи. В общем случае для дифференциальной схемы когерентно-оптического преобразователя (КОП) [1], в которой приём рассеянного излучения осуществляется в некотором произвольном направлении и в ограниченной области приёма, составляющая фазы доплеровского сигнала на выходе фотоприемника, определяемая эффектами рассеяния, зависит как от параметров частиц $q = \frac{\pi d}{\lambda}$ и m (d – диаметр частицы; λ – длина волны; m – показатель преломления), так и параметров оптической схемы: угла между пучками γ , направления приёма, размера и формы приемной апертуры, а также от состояния поляризаций зондирующих пучков.

Для дифференциальной схемы КОП характерны два вида симметричного приёма, при которых наблюдается формирование фазосопреженных доплеровских сигналов [1; 2]. Первому виду симметричного приёма соответствует схема КОП, в которой для двух направлений приёма, симметричных плоскости симметрии схемы OXZ [2, рис. 1], доплеровские сигналы являются фазосопреженными, если зондирующие пучки имеют следующие поляризации: а) линейные, согласованные с направлением электрических векторов перпендикулярно плоскости пучков (OYZ); б) линейные поляризации с направлением электрических векторов в плоскости пучков; в) один пучок имеет правоциркулярную (левоциркулярную), а другой левоциркулярную (правоциркулярную) поляризацию; г) линейные поляризации с равными по модулю, но противоположными по знаку азимутами. Второму виду симметричного приёма соответствует схема КОП, в которой пучки имеют эллиптические поляризации с одинаковыми азимутами и эллиптичностью, включая круговые и линейные. В этом случае фазосопреженные доплеровские сигналы формируются при приёме излучения в двух направлениях осесимметричных относительно оптической оси схемы КОП (ось OZ), [2, рис. 1].

Основной материал. Пусть в КОП реализуется первый вид симметричного приёма (рис. 1). Обозначим комплексную амплитуду доплеровского сигнала, формируемого на выходе фотоприёмника при приёме излучения в пределах некоторой пространственной области A_1 (например ограниченной частью кругового кольца (рис. 1, а) через $J_{A1} = J_1 e^{-i\Phi_{d1}}$, где фаза доплеровского сигнала, определяемая эффектами рассеяния, значение которой находится в пределах минус $\frac{\pi}{2} < \Phi_{d1} < \frac{\pi}{2}$ (фаза сигнала, определяемая моментом вхождения

частицы в зону измерения, принимается $\Phi = 0$). Тогда доплеровский сигнал, формируемый при приёме излучения в пределах области B_1 равной по размеру области A_1 и расположенной симметрично плоскости симметрии OXZ , можно записать $J_{B_1} = J_1 e^{-i\Phi_{d1}}$ [2].

С учетом этого суммарный доплеровский сигнал, формируемый при приеме излучения от областей A_1 и B_1 , равен $i_1 = 2J_1 \cos\Phi_{d1} \cos\omega_d t$, т. е. имеет фазу равную нулю $\Phi_d = 0$. Можно также всегда выделить две идентичные области A_2 и B_2 , расположенные симметрично (рис. 1, а), для которых $J_{A_2} = J_2 e^{-i\Phi_{d2}}$ и $J_{B_2} = J_2 e^{i\Phi_{d2}}$ и фазы этих доплеровских сигналов находятся в пределах $\frac{\pi}{2} < \Phi_{d2} < \frac{3\pi}{2}$. В этом случае доплеровский сигнал от областей A_2 и B_2 равен $i_2 = -2|J_2 \cos\Phi_{d2}| \cos\omega_d t$ и находится в противофазе по отношению к сигналу i_1 от областей A_1 и B_1 . Если осуществить приём излучения одновременно от областей A_1 , B_1 , A_2 и B_2 (рис. 1), то $i_{12} = i_1 + i_2 = 2(J_1 \cos\Phi_{d1} - |J_2 \cos\Phi_{d2}|) \cos\omega_d t$ и фаза этого сигнала может принимать только два значения:

$$\Phi_d = 0, \text{ если } J_1 \cos\Phi_{d1} > |J_2 \cos\Phi_{d2}| \text{ и } \Phi_{d2} = 180^\circ, \text{ если } |J_2 \cos\Phi_{d2}| > J_1 \cos\Phi_{d1}.$$

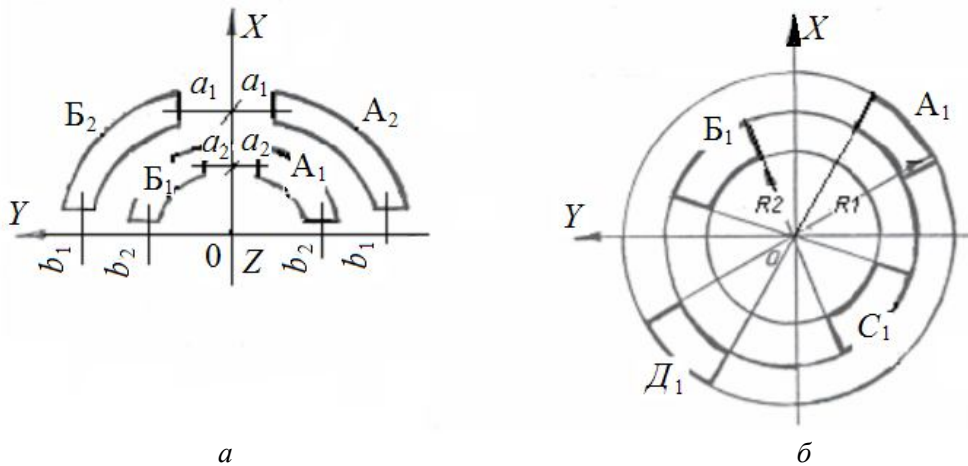


Рис. 1. Виды симметричного приёма рассеянного излучения, обеспечивающие формирование фазосопреженных сигналов: а – первый вид симметричного приёма относительно OXZ ; б – второй вид симметричного приёма относительно оси OZ

Если выполняется соотношение $\frac{J_1}{J_2} = \frac{|\cos\Phi_{d2}|}{\cos\Phi_{d1}}$, то наблюдается взаимокompенсация

доплеровских составляющих сигналов, так как $i_1 = -i_2$. Аналогичная ситуация может наблюдаться при реализации второго вида симметричного приёма (рис. 1, б) рассеянного излучения в пределах некоторых пространственных областей $A_1 - D_1$ и $B_1 - C_1$.

Рассмотрим зависимость фазы доплеровского сигнала от изменения угловой приемной апертуры. Пусть, например, в КОП используются пучки на длине волны $\lambda = 0,488$ мкм, имеющие равные мощности $P = 50$ мВт и линейные согласованные поляризации, пересекаются в измерительном объёме под углом $\gamma = 11,25^\circ$, через который движется поток воды с частицами полистирола диаметром $d_r = 3,1$ мкм. Кроме того, в схеме КОП осуществляется первый вид симметричного приема рассеянного назад излучения, а центр круглой приёмной диафрагмы совпадает с осью схемы.

Анализ результатов численных экспериментов показывает, что фаза сигнала $\Phi_d = f_7(\alpha)$ (рис. 2) равна $\Phi_d = 180^\circ$, если угловая апертура $3,5^\circ \leq \alpha \leq 9^\circ$, а при остальных значениях апертур $\Phi_d = 0$. Что касается зависимости фазы элементарной составляющей доплеровского сигнала, образуемого при приёме рассеянного излучения в пределах отверстия кольцеобразной формы малой толщины от направления наблюдения $\Phi_{di} = f_8(\alpha_i)$,

то фаза претерпевает скачки на 180° (рис. 2). При α_i соответствующих либо максимуму доплеровского сигнала (рис. 3), например, $\alpha_i = 2,25^\circ; 6,5^\circ; 11,5^\circ$ и 16° , либо минимуму сигнала, если при этом значении α_i не происходит скачок фазы Φ_d на 180° , например, при $\alpha_i = 12,25^\circ$. Такой характер изменения $\Phi_d = f_7(\alpha)$ и $\Phi_{di} = f_8(\alpha_i)$ можно объяснить на основе свойств фазовой пространственной симметрии доплеровского сигнала [1]. Первый скачок фазы Φ_{di} на 180° при $\alpha_i = 2,25^\circ$ объясняется тем, что сначала с ростом $\Phi_{d\Delta i}$ фаза сигнала $\Phi_{d\Delta i}$, формируемого при приёме излучения справа от плоскости OXZ (область А) увеличивается также, но при этом находится в пределах минус $\frac{\pi}{2} < \Phi_{d\Delta i} < \frac{\pi}{2}$, а при значениях $2,25^\circ \leq \alpha_i \leq 6,5^\circ$ фаза сигнала переходит в область $\frac{\pi}{2} < \Phi_{d\Delta i} < \frac{3\pi}{2}$

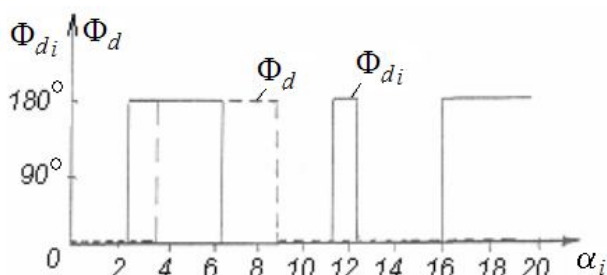


Рис. 2. Зависимость фазы доплеровского сигнала от угловой апертуры $\Phi_d = f_7(\alpha)$ и направления приема $\Phi_{di} = f_8(\alpha_i)$

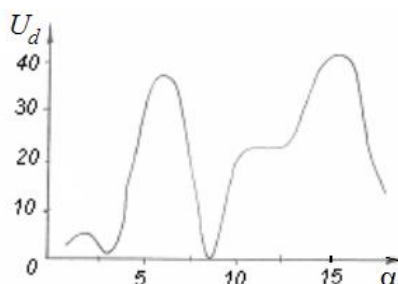


Рис. 3. Зависимость амплитуды доплеровского сигнала от угловой приёмной апертуры

Таким образом, составляющая доплеровского сигнала i_1 от области приёма $0 < \alpha < 2,25^\circ$ находится в противофазе с сигналом i_1 от области приёма $2,25^\circ < \alpha_i < 6,5^\circ$. Поэтому, при $\alpha_i = 3,5^\circ$ суммарный доплеровский сигнал стремится к нулю. Кроме того, при $\alpha_i = 3,5^\circ$ наблюдается скачок фазы Φ_d на 180° , объясняемый тем, что при $3,5^\circ < \alpha_i < 9^\circ$ амплитуда составляющей сигнала с фазой $\Phi_d = 180^\circ$ больше амплитуды составляющей сигнала с $\Phi_d = 0$.

Второй скачок фазы Φ_{di} на 180° при $\alpha_i = 6,5^\circ$ объясняется тем, что с увеличением α_i в области $6,5^\circ < \alpha_i < 11,5^\circ$ фаза сигнала от области приема А находится в пределах $-\frac{\pi}{2} < \Phi_{d\Delta i} < \frac{\pi}{2}$. Это также отражается на характере изменения амплитуды и фазы доплеровского сигнала Φ_d (рис. 2 и 3). В пределах изменения $3,5^\circ \leq \alpha_i \leq 6,5^\circ$ сигнал растет, так как фаза сигнала в этой области остается постоянной $\Phi_{di} = 180^\circ$. Далее с увеличением α до 9° сигнал, уменьшаясь, стремится к минимуму при $\alpha = 9^\circ$ (коэффициент фазового согласования [1] при $\alpha_i = 9^\circ$ равен $K_\phi = 0,006$), поскольку при $\alpha_i = 9^\circ$ составляющая сигнала i_1 от области приема $0 \leq \alpha_i \leq 2,25^\circ$ и $6,5^\circ \leq \alpha_i \leq 9^\circ$, почти взаимокompенсирует составляющую сигнала i_2 от

области приема $2,25^\circ \leq \alpha_i \leq 6,5^\circ$. Аналогичным образом можно объяснить последующие скачки фазы Φ_{di} и изменения сигнала с ростом α_i .

На основе выполненных теоретических исследований создан комплекс прикладных программ синтеза фазовых противофазных симметричных пространственных фильтров (ПСПФ) для дифференциальной схемы КОП, использующий первый либо второй вид симметричного приёма при различных состояниях поляризации двух зондирующих пучков. Некоторые результаты синтеза фазовых ПСПФ для двухканальной схемы приёма КОП при различных углах между зондирующими пучками представлены на рис. 4.

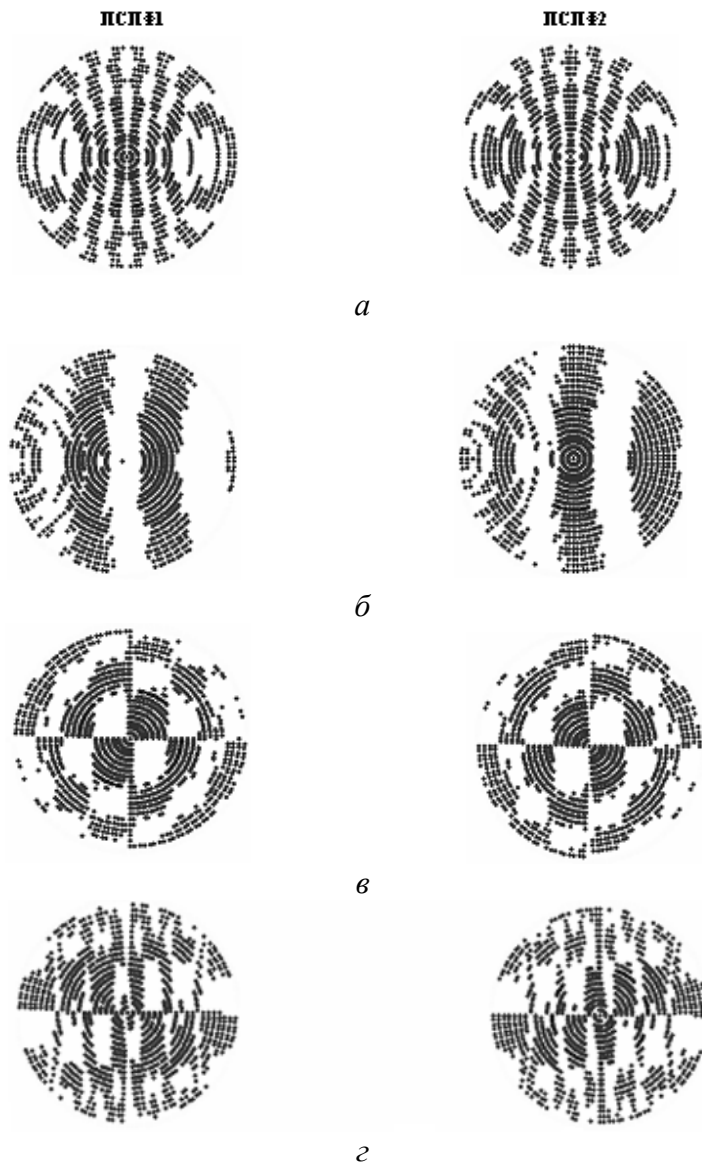


Рис. 4. Результаты синтеза оптически согласованных фазовых фильтров ПСПФ для двухканальной схемы приёма КОП (диаметр частицы $d = 2e-005$ м; длина волны излучения лазера $\lambda = 6,328e-007$ м; приемная апертура $\alpha = 5^\circ$; линейные согласованные поляризации): *а* – угол между лучами $\gamma = 20^\circ$, угол $\theta_0 = 170^\circ$; *б* – угол между лучами $\gamma = 20^\circ$, угол $\theta_0 = 20^\circ$ и -40° ; *в* – угол между лучами $\gamma = 90^\circ$, угол $\theta_0 = -45^\circ$; *г* – угол между лучами $\gamma = 90^\circ$, угол $\theta_0 = 45^\circ$

В двухканальной схеме КОП на пути рассеянных пучков перед вторым и первым фотоприёмниками устанавливаются соответственно фазовые ПСПФ1 и ПСПФ2 (рис. 4). При подаче выходных сигналов фотоприёмников на дифференциальный усилитель на его выходе формируется полезный высокочастотный сигнал на доплеровской частоте (для схемы ЛДА),

либо на частоте двухчастотного интерферометра (для схемы когерентно-оптического измерителя микрочастиц (КОИМ)).

Для дифференциальной схемы КОП с углом между зондирующими пучками $\gamma = 20^\circ$ и симметричным приёмом рассеянного назад излучения (оптическая ось приёмной оптики составляет угол $\theta_0 = 170^\circ$ со вторым зондирующим пучком) синтезированные фазовые пространственные фильтры ПСПФ1 и ПСПФ2 показаны на рис. 4, а, представлены синтезированные ПСПФ1 и ПСПФ2 для углов приёма $\theta_0 = 20^\circ$ и $\theta_0 = -40^\circ$ – на рис. 4, б для схемы КОП с углом между зондирующими пучками $\gamma = 90^\circ$ и углом приёмной оптики со вторым зондирующим пучком $\theta_0 = -45^\circ$ ПСПФ1 и ПСПФ2 – на рис. 4, в, а для $\theta_0 = +45^\circ$ ПСПФ1 и ПСПФ2 – на рис. 4, г. ПСПФ1 и ПСПФ2 выполняются в виде диафрагмы с отверстиями в пространственно не затемнённых областях. Технология изготовления ПСПФ состоит в осуществлении цифрового синтеза фазового фильтра и выдачи координат для прожига отверстий лазерным пучком. Изготовление второго фазового фильтра ПСПФ2 осуществляется после его синтеза по аналогичной технологии, т. е. лазерный пучок выжигает отверстия, которые обозначены на рис. 4 ПСП2. Анализ показывает, что ПСПФ1 и ПСПФ2 пространственно фазово согласованы экспериментально можно показать, что если принимать рассеянный пучок на один фотоприёмник в пределах одного из ПСПФ, то суммарный сигнал фотоприёмника будет состоять из синфазных высокочастотных сигналов только при соблюдении конфигурации ПСПФ. Поэтому для осуществления эффективного приёма необходимо осуществлять двухканальный симметричный приём на два фотоприёмника с установкой ПСПФ1 и ПСПФ2. В этом случае реализуется синфазный приём каждого канала, однако выходные сигналы будут находиться в противофазе.

Методика обеспечивает получение высокого отношения сигнал/шум, если прямое решение фильтрации пространственного сигнала не даёт качественного сигнала на выходе фотоприёмника.

Практическая схема реализации метода фазовой оптической фильтрации с помощью ПСПФ1 и ПСПФ2 применительно к задаче измерения размера и концентрации сферических микрочастиц приведена на рис. 5. В этой схеме синтезированные фазовые ПСПФ1 и ПСПФ2 (см. рис. 4) обеспечивают оптимальную оптическую фильтрацию полезных сигналов и, кроме того, подавление низкочастотных помех на выходе усилителя 19. Высокочастотный полезный сигнал после фильтрации поступает в анализатор размера частиц 23.

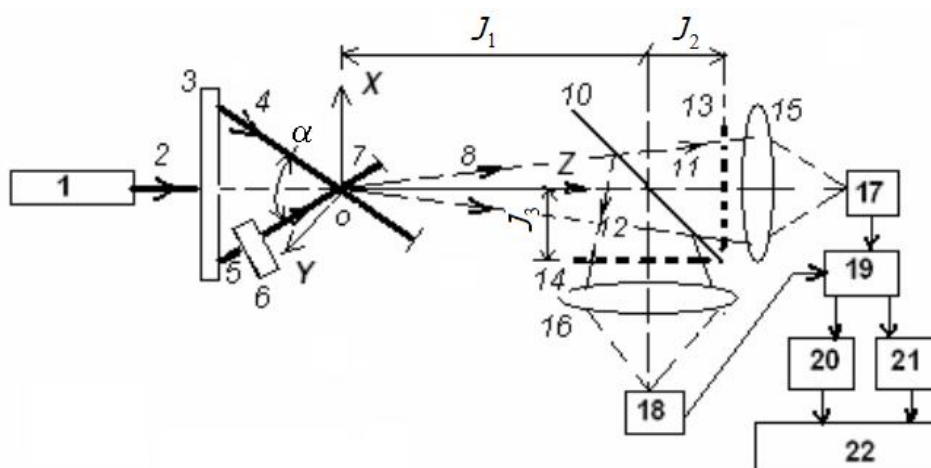


Рис. 5. Схема КОИМ, реализующая метод фазовой оптической фильтрации: 1 – лазер; 3 – расщепитель; 6 – устройство сдвига частоты; 7 – зона измерения микрочастиц; 8 – рассеяное излучение; 10 – светоделитель; 13 – ПСПФ1; 14 – ПСПФ2; 15, 16 – линзы; 17, 18 – фотоприёмники; 19 – дифференциальный усилитель; 20 – фильтр высокой частоты; 21 – фильтр низкой частоты; 22 – анализатор частиц

Схема работает следующим образом. Источник когерентного излучения 1 (рис. 5) излучает пучок 2, который делится расщепителем 3 на два пучка 4 и 5, пересекающиеся в зоне измерения под углом α . На пути зондирующего пучка 5 установлено частотоздвигающее устройство 6, с помощью которого возможно изменять фазу волны излучения. Центр зоны измерения 7 совпадает с началом системы координат $OXYZ$, а ось OZ ориентирована вдоль оптической оси схемы. Расстояние J_1 определяют от центра зоны измерения вдоль оптической оси схемы до отражающей поверхности полупрозрачного зеркала 10, расстояние J_2 вдоль оптической оси схемы определяют от отражающей поверхности полупрозрачного зеркала 10 до ПСПФ1, расстояние J_3 , перпендикулярно оптической оси схемы, определяют от отражающей поверхности полупрозрачного зеркала 10 до ПСПФ2.

Синтезированные два ПСПФ1 и ПСПФ2, соответственно 13 и 14, устанавливаются на расстояниях J_1+J_2 и J_1+J_3 ($J_2 = J_3$, рис. 5) от центра зоны измерения. Если через зону измерения вдоль оси OX проходят с постоянной скоростью V сферические микрочастицы, которые контролируют, и обеспечивают при этом наличие в зоне измерения в каждый момент времени не более одной микрочастицы, то рассеянное вперед излучение 8 разделяется полупрозрачным зеркалом 10 на два пучка излучения 11 и 12, каждый из которых собирается в пределах области, ограниченной апертурой ПСПФ1 и ПСПФ2 13 и 14, и далее направляются объективами 15 и 16 на фотоприёмники 17 и 18. В результате оптического гетеродинамирования рассеянного излучения на выходе фотоприёмников 17 и 18 формируются сигналы, каждый из которых представляет аддитивную смесь низкочастотной и высокочастотной составляющих сигнала. Предположим, что через зону измерения проходит сферическая микрочастица, диаметр которой d_1 согласован с синтезированными ПСПФ1 и ПСПФ2. В этом случае при приёме рассеянного излучения в пространственной области, которая отделена пространственным фильтром 13, оптически согласованным с заданным размером микрочастицы d_1 , на выходе фотоприёмника 17 формируется высокочастотный сигнал с высоким значением коэффициента фазового согласования $K_{\phi 1} = 1$.

Пространственный элементарный сигнал, который образуется от смещения фазы излучений, для направления приёма в пределах пространственного фильтра (ПСПФ1) 13, находятся в фазе, $K_{\phi 1} = 1$. Если одновременно осуществлять приём рассеянного излучения в пространственной области, которая отделена пространственным фильтром (ПСПФ2) 14, который согласован с фильтром 13 для заданного размера микрочастицы d_1 , то на выходе фотоприёмника 18 формируется также переменная составляющая сигнала с высоким значением коэффициента фазового согласования ($K_{\phi 1} = 1$). Переменная составляющая сигнала на выходе фотоприёмника 18 находится в противофазе с переменной составляющей сигнала на выходе фотоприёмника 17.

Этот новый результат был впервые проверен экспериментально.

Таким образом, при прохождении сквозь зону измерения сферической микрочастицы d_1 , на выходе фотоприёмников 17 и 18 образуются одинаковые по амплитуде синфазные постоянные составляющие и одинаковые по амплитуде, но противофазные переменные высокочастотные составляющие сигналов. Сигналы с выходов фотоприёмников поступают на дифференциальный усилитель 19, в выходном сигнале которого прослеживается компенсация низкочастотной составляющей при максимальном уровне высокочастотной составляющей сигнала. Сравнивая низкочастотную составляющую сигнала, выделенную фильтром низких частот 21 и высокочастотную составляющую, выделенную фильтром верхних частот 22, в анализаторе импульсов 23 определяют, когда сквозь зону измерения проходит микрочастица заданного размера d_1 . Если уровень высокочастотной составляющей сигнала на два и более порядка превышает уровень низкочастотной составляющей сигнала (при полной компенсации уровня низкочастотной составляющей, равно нулю, достигается максимальная точность измерения), то микрочастицу, которая проходит через зону измерения, необходимо классифицировать как сферическую заданного размера d_1 . При

проходженні через зону вимірювання мікрочастини другого розміра d_2 ($d_2 \neq d_1$) на виході фотоприймача 17 і 18 утворюються синфазні постійні і змінні складові сигнали, які мають різні амплітуди. Тому, в цьому випадку, на виході диференціального усилителя 19 присутні сумарні постійна і змінна складові сигнали, які свідчать про наявність мікрочастини в зоні вимірювання, що відрізняється по формі або розміру від еталонної сферическої мікрочастини діаметром d_1 .

Необхідно зазначити, що на схемі рис. 5 може бути також використаний двох-частотний лазер, наприклад лазер, в якому перетворення одночастотного лазерного випромінювання в двохчастотне здійснюється на ефекті Зеемана.

Висновок. Використання фазових ПСПФ забезпечує досягнення відношення сигнал/шум на виході когерентно-оптичного датчика на порядок і більше порівняно з відомими схемами. Це дозволяє суттєво підвищити точність вимірювання швидкості з допомогою лазерного доплерівського анемометра, або розміру мікрочастини з допомогою когерентного вимірювача розмірів мікрочастини.

Список літератури

1. Землянський В. М. Вимірювання швидкості потоків лазерним доплерівським методом. – К.: Вища шк., 1987. – 177 с.
2. V. M. Zemljanskij, N. P. Divnich, A. Chudesov On doppler signal phase in cros-beam LDV. International conference on fluid dynamic measurement and ITS applications, october 25 – 28, 1989, Beijing, China, Tsinghua University, – P. 520 – 523.

В. М. Землянський, О. П. Чудесов

Синтез протифазних симетричних просторових фільтрів для диференціальної схеми когерентно-оптичного перетворювача

На підставі виконаних теоретичних досліджень розроблено комплекс прикладних програм синтезу фазових протифазних симетричних просторових фільтрів для диференціальної схеми когерентно-оптичного перетворювача, що застосовує перший або другий вид симетричного приймання для різних станів поляризації двох зондувальних пучків.

Використання фазових протифазних симетричних просторових фільтрів забезпечує досягнення відношення сигнал/шум на виході когерентно-оптичного перетворювача на порядок і більше порівняно з відомими схемами. Це дозволяє істотно підвищити точність вимірювання швидкості з допомогою лазерного доплерівського анемометра, або розміру мікрочастинки з допомогою когерентного вимірювача розмірів мікрочастинки.

V. M. Zemlyanskyi, O. P. Chudesov

Antiphase symmetric space filter synthesis for defferential scheme COT

On the basis of the executed theoretical researches the complex of the application programs of synthesis of phase antiphase symmetric spatial filters (ASSF) is designed for COT differential block diagram by means of the first or second type of symmetric reception at the different states of polarization of two probe bunches.

Use of phase ASSF is provided by achieving signal/noise relation on the output of coherently-optical sensor on an order and more in compare with already known block diagrams. It allows increasing measuring speed accuracy substantially by LDA, or size of microparticles by the coherent meter of microparticles sizes.