

Когерентное сложение пучков излучения импульсных волоконных усилителей при активном управлении фазой^{*,**}

Х.Л.Ванг, П.Жоу, Й.Х.Ма, Х.Т.Ма, Х.Ч.Ху, Я.Ч.Лю, Й.Ч.Жао

Когерентное сложение пучков излучения импульсных волоконных лазеров – перспективный метод масштабирования мощности при одновременном сохранении хорошего качества пучка. Предлагается и демонстрируется масштабируемая архитектура когерентного сложения пучков излучения полностью волоконных импульсных усилителей при активном управлении фазой с использованием алгоритма стохастического параллельного градиентного спуска (SPGD). Для устранения флуктуаций метрической функции, связанных с использованием импульсных лазеров, и извлечения точного сигнала фазового шума вводится фильтр нижних частот. При этом строится активное управление с использованием SPGD-алгоритма и может быть получено устойчивое сложение когерентных пучков в приемной плоскости даже в турбулентном окружении. Результаты эксперимента показывают, что видность полос интерференционной структуры при длительной экспозиции увеличивается от 0 до 0.4, а мощность в главном лепестке диаграммы направленности растет в 1.6 раза при переходе системы от состояния с открытой петлей контура синфазного захвата фазы к состоянию с замкнутой петлей. Эта архитектура может быть легко отмасштабирована к более высокой мощности за счет увеличения числа каналов усиления и мощности единичного усилителя.

Ключевые слова: активное управление фазой, импульсные волоконные усилители, когерентное сложение пучков излучения.

1. Введение

Импульсные волоконные лазеры с высокой пиковой мощностью широко применяются при дистанционном зондировании, обработке материалов, нелинейной генерации частот, для доставки энергии по длинным трассам и в ряде других областей. Однако предельная пиковая мощность, достигаемая с использованием единичного волоконного лазера, ограничивается возникающими в нем тепловыми нагрузками, повреждением волокна и различными нелинейными эффектами [1]. Когерентное сложение пучков излучения импульсных волоконных лазеров является альтернативным способом масштабирования мощности при одновременном сохранении хорошего качества пучка [2]. В предыдущих работах когерентное сложение пучков излучения импульсных лазеров, включая многосердцевинный фотонно-кристаллический волоконный лазер с модуляцией добротности [3], технику внешнего резонатора с использованием дифракционной связи и пространственной фильтрацией [4], self-Fourier внешнего резонатора [5], всегда предполагало пассивную фазировку. Хотя фазовая синхронизация излучения импульсного волоконного усилителя при непрерывном (CW) лазере затравки за счет считывания фазы слабой оптической утечки между импульсами с использованием гетеродинного детектирования фазы была реализована в [6], насколько нам известно,

когерентное объединение пучков двух или более матриц импульсных волоконных усилителей при активном контроле фазы до сих пор не было осуществлено.

В настоящей работе нами продемонстрирована масштабируемая архитектура когерентного сложения пучков излучения полностью волоконных импульсных усилителей при активном контроле фазы с помощью алгоритма стохастического параллельного градиентного спуска (SPGD). Для устранения флуктуаций метрической функции, обусловленных использованием импульсных лазеров, и с целью извлечения точного сигнала фазового шума для активного управления фазой, основанного на SPGD-алгоритме, вводится фильтр нижних частот. Тем самым строится система активного управления и может быть получено устойчивое сложение когерентных пучков в приемной плоскости даже в турбулентном окружении. Видность интерференционной структуры при длительной экспозиции увеличивается от 0 до 0.4, а мощность излучения, заключенного в главном лепестке диаграммы направленности, растет в 1.6 раза при переходе системы от состояния с открытой петлей к состоянию с замкнутой петлей. Эта архитектура может быть легко отмасштабирована к более высокой мощности за счет увеличения числа каналов усиления и мощности единичного усилителя, что обеспечивает перспективность масштабируемого высокоомощного когерентного сложения пучков импульсных лазеров.

2. Теоретический анализ и численное моделирование

2.1. Теоретический анализ когерентного сложения излучения импульсных волоконных лазеров

Существуют три основных метода активного фазового контроля при активной фазировке и когерентном сложении пучков. Это гетеродинное детектирование фазы [7–9],

* Перевод с англ. В.В.Шувалова.

** Доложена на конференции «Оптика лазеров», Россия, С.-Петербург, июнь 2010 г.

X.L.Wang, P.Zhou, Y.X.Ma, H.T.Ma, X.J.Xu, Z.J.Liu, Y.J.Zhao.
College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan, 410073, China;
e-mail: chinawxllin@163.com

техника мультисглаживания [10–13], а также оптимальный алгоритм (особенно SPGD-алгоритм) [14–16]. Обладая такими достоинствами, как малое число компонентов, отсутствие необходимости применения моделей и фазового детектирования, метод когерентного сложения пучков с использованием SPGD-алгоритма делает систему компактной. Этот метод был предложен для построения новой архитектуры лазерных систем с высокой энергией. Более того, SPGD-алгоритм потенциально применим для когерентного сложения пучков импульсных волоконных лазеров.

При когерентном сложении пучков излучения непрерывных лазеров шаги SPGD-алгоритма могут быть кратко описаны следующим образом. Метрическая функция J обычно определяется как мощность в главном лепестке интерференционной картины, заданном точечной диафрагмой и детектируемом фотоприемником [15, 17, 18]. При этом $J = J(u_1, u_2, \dots, u_N)$, где u – управляющие сигналы, приложенные к фазовым модуляторам; N – число каналов лазеров/усилителей, подлежащих сложению. Алгоритм реализуется в бесконечных итерациях и может быть остановлен вручную. Каждый итерационный цикл протекает следующим образом.

1. Генерируются статистически независимые случайные возмущения $\delta u_1, \delta u_2, \dots, \delta u_N$ (все $|\delta u_i|$ малы), которые

обычно выбираются как статистически независимые переменные, имеющие нулевые средние значения и равные дисперсии: $\langle \delta u_k \rangle = 0$, $\langle \delta u_k \delta u_l \rangle = \sigma^2 \delta_{kl}$, где δ_{kl} – символ Кронекера.

2. Прикладываются управляющие напряжения с положительными возмущениями и получается метрическая функция от детектора $J^+ = J(u_1 + \delta u_1, u_2 + \delta u_2, \dots, u_N + \delta u_N)$. Затем прикладываются управляющие напряжения с отрицательными возмущениями и получается метрическая функция $J^- = J(u_1 - \delta u_1, u_2 - \delta u_2, \dots, u_N - \delta u_N)$.

3. Вычисляется разность двух метрических функций $\delta J = J^+ - J^-$.

4. Обновляются управляющие напряжения $u_i = u_i + \gamma \delta u_i \delta J$, $i = 1, 2, \dots, N$, где γ – обновленное усиление ($\gamma > 0$ соответствует процедуре максимизации, $\gamma < 0$ – минимизации).

При когерентном сложении пучков с использованием SPGD-алгоритма метрическая функция J является функцией фазы $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N$ каждого лазера при управляющих сигналах, зависящих не только от фазового шума, но и от самих управляющих сигналов. Более того, управляющие сигналы, генерируемые SPGD-алгоритмом, определяются метрической функцией J . Следовательно, получение точной метрической функции – ключевой момент при активном фазовом управлении с помощью SPGD-алгоритма. Считая, что метрическая функция обычно определена

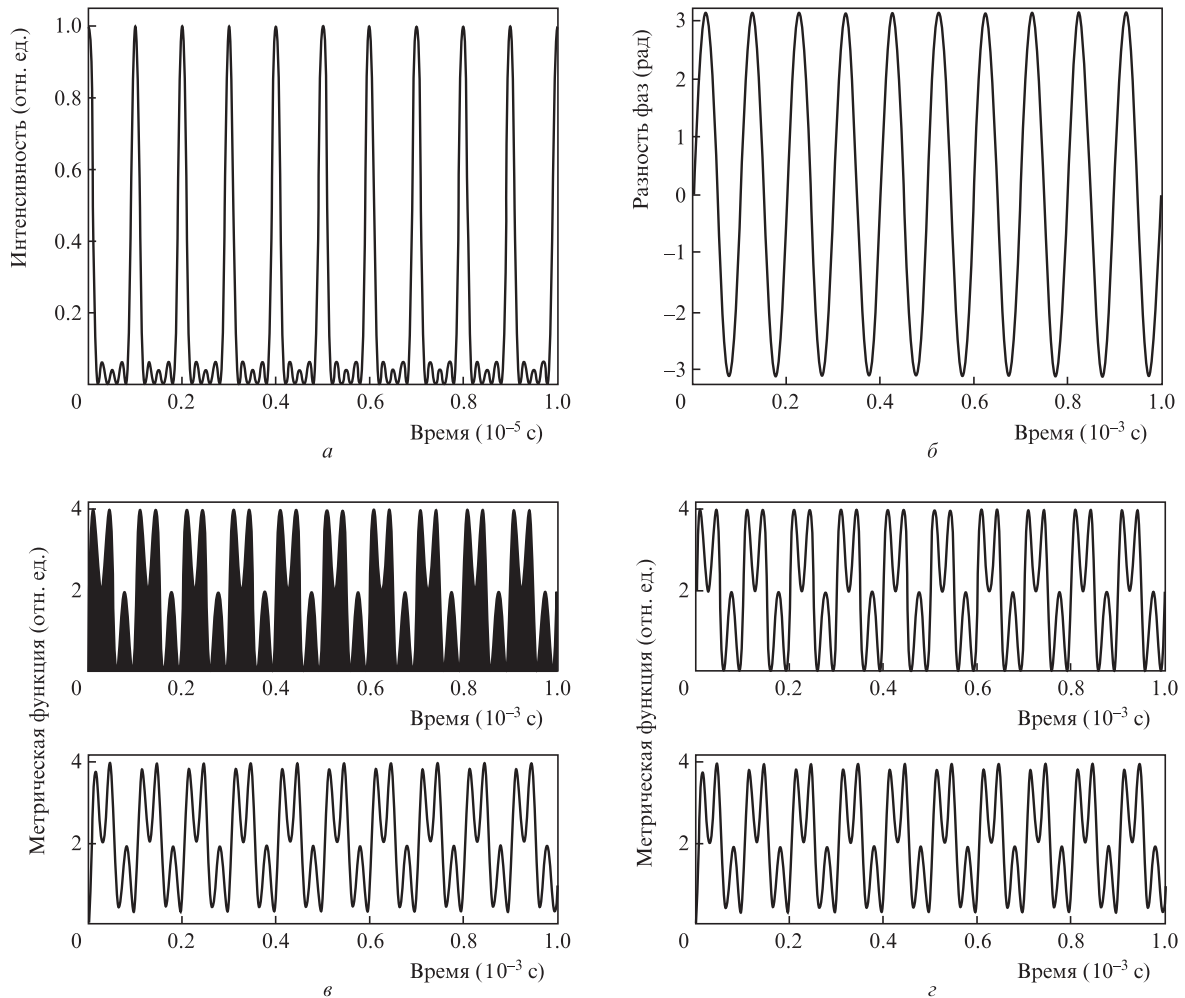


Рис.1. Результаты моделирования когерентного сложения излучения импульсных лазеров с синусоидальным фазовым шумом, работающих в режиме синхронизации мод: временной ход интенсивности излучения лазера (а), временная зависимость фазового шума (б), метрическая функция до (вверху) и после (внизу) фильтра низких частот (в) и метрическая функция при когерентном сложении излучения непрерывных лазеров (вверху) и импульсных лазеров (внизу) после фильтра нижних частот (з).

как мощность в главном лепестке интерференционной картины, заданном точечной диафрагмой, флуктуацию метрической функции можно вызвать только фазовым шумом излучения каждого лазера. Поэтому процедура максимизации метрической функции порождает фазовую синхронизацию каждого лазера при когерентном сложении пучков непрерывных лазеров. Однако при когерентном сложении пучков импульсных волоконных лазеров периодически меняющаяся метрическая функция содержит информацию не только о фазовом шуме каждого лазера, но и о флуктуациях интенсивности лазерного излучения. Поэтому использование метрической функции для активного фазового управления не подходит в случае фазовой синхронизации. Если флуктуации метрической функции, обусловленные использованием импульсных лазеров, могут быть устранены и ее часть, отвечающая точному сигналу фазового шума, может быть выделена, эта откорректированная метрическая функция может быть использована для синхронизации фаз.

Для того чтобы устранить флуктуации метрической функции, обусловленные использованием импульсных лазеров, и выделить ее часть, отвечающую точному сигналу фазового шума, может быть введен фильтр нижних частот. Учитывая, что частота фазового шума волоконного усилителя достигает почти 100 Гц, а его дисперсия на

частотах выше 1 кГц равна менее $\lambda/30$, а также то, что частота следования импульсов большинства лазеров превышает 10 кГц, низкочастотный фильтр с частотой среза (по уровню 3 дБ) 3–5 кГц эффективен для устранения флуктуаций интенсивности импульсных лазеров и извлечения точного сигнала фазового шума из метрической функции. Таким образом, с использованием откорректированной метрики (она содержит информацию только о фазовом шуме и является почти той же метрической функцией) и SPGD-алгоритма может быть установлено активное управление фазой.

Еще одним ключевым моментом для когерентного сложения пучков является синхронизация импульсов излучения каждого лазера. В большинстве случаев для точного контроля синхронизации может быть необходима линия задержки.

2.2. Численное моделирование

Проверка применимости фильтра нижних частот для устранения флуктуаций метрической функции, обусловленных использованием импульсных лазеров, и выделения точного сигнала фазового шума была проведена с помощью численного моделирования. При моделировании мы рассмотрим простейший случай – когерентное

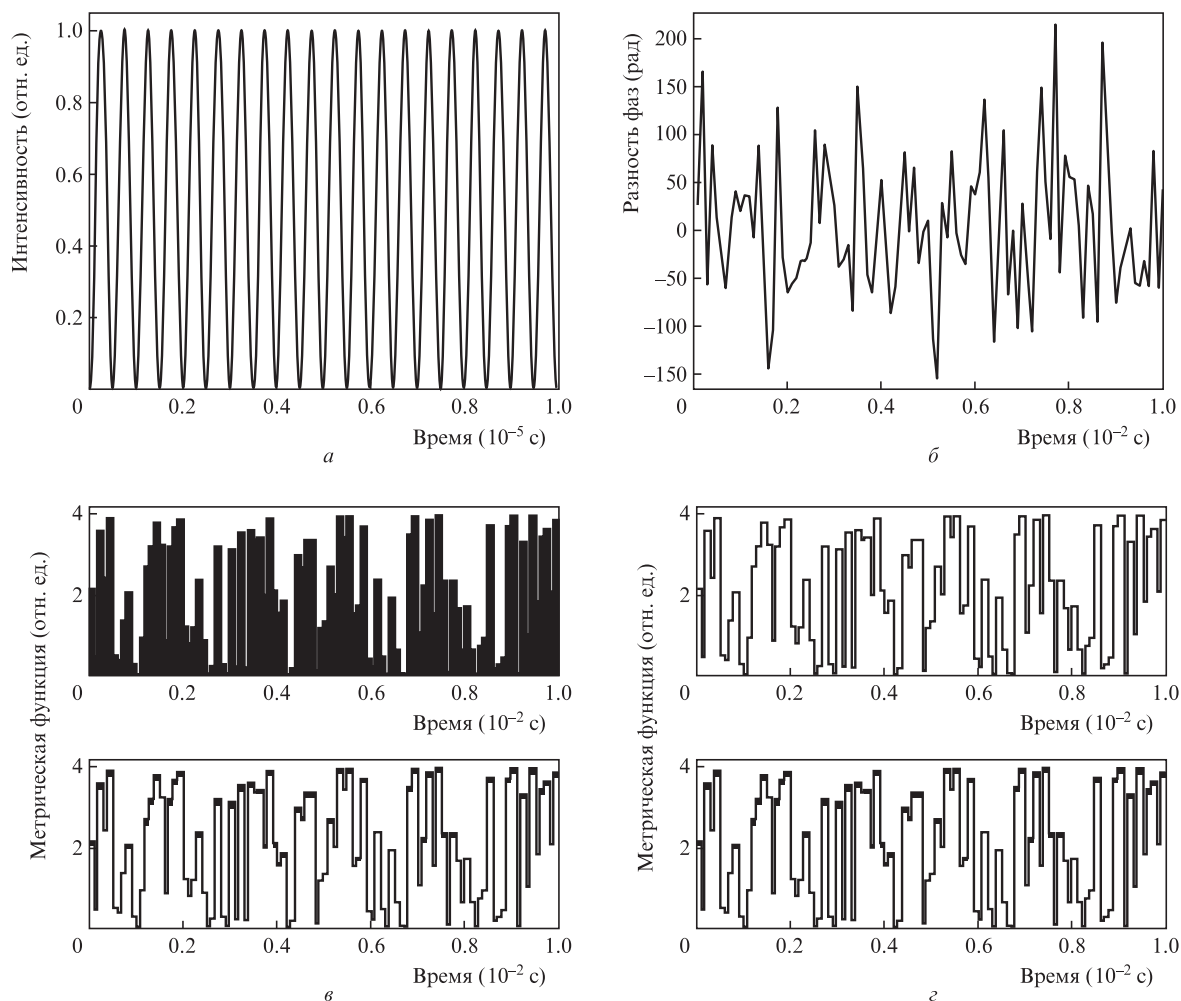


Рис.2. Результаты моделирования когерентного сложения излучения лазеров с синусоидальной модуляцией интенсивности и белым фазовым шумом: временной ход интенсивности излучения импульсного лазера (а), сигнал фазового шума (б), метрическая функция до (вверху) и после (внизу) фильтра низких частот (б) и метрическая функция при когерентном сложении излучения непрерывных лазеров (вверху) и импульсных лазеров (внизу) после фильтра нижних частот (з).

сложение пучков только двух лазеров. Использовались импульсные лазеры двух типов. Первый из них – лазер, работающий в режиме синхронизации мод с частотой следования импульсов 1 МГц и синусоидальным фазовым шумом с частотой 10 кГц. Второй – синусоидальный лазер с частотой следования импульсов 1 МГц. В этом случае в качестве модельного шума используется белый фазовый шум с амплитудой 0.5 и частотой дискретизации 10 кГц.

Учитывая, что частота следования импульсов каждого лазера равна 1 МГц, а частота фазового шума составляет 10 кГц, для устранения флуктуаций метрической функции, обусловленных использованием импульсных лазеров, применяется фильтр нижних частот с частотой среза около 100 кГц.

На рис.1 представлены результаты моделирования когерентного сложения пучков излучения волоконных лазеров с синусоидальным фазовым шумом, работающих в режиме синхронизации мод. На рис.1,2 представлены метрические функции при когерентном сложении пучков излучения непрерывных лазеров и когерентном сложении пучков излучения импульсных лазеров после фильтра нижних частот. Видно, что отношение метрических функций при когерентном сложении пучков непрерывного лазера и при когерентном сложении пучков импульсного лазера с фильтром нижних частот составляет 0.94. Это значит, что фильтр нижних частот устраняет флуктуации метрической функции, обусловленные использованием импульсных лазеров, и дает возможность извлечь точный сигнал фазового шума.

На рис.2 представлены результаты моделирования когерентного сложения пучков двух лазеров с синусоидальной формой сигнала и разностью фаз в виде белого шума. Как и на рис.1, отношение метрических функций при когерентном сложении пучков непрерывного лазера и при когерентном сложении пучков импульсного лазера с использованием фильтра нижних частот составляет 0.99. Это также говорит о том, что фильтр нижних частот устраняет флуктуации метрической функции, обусловленные использованием импульсных лазеров, и дает возможность извлечь точный сигнал фазового шума.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Схема экспериментальной установки представлена на рис.3. Одночастотный волоконный лазер (центральная длина волны 1064.3 нм, ширина линии менее 50 кГц, мощность свыше 10 мВт) модулируется модулятором интенсивности, управляемым синусоидальным сигналом, который генерируется функциональным генератором. Это соответствует генерации импульсного волоконного лазера. Пучок излучения импульсного лазера расщепляется на два, каждый из которых проходит через фазовый модулятор и оптический изолятор, а затем направляется на изготовленный нами волоконный усилитель для масштабирования средней мощности вплоть до уровня 100 мВт. В каждом усилителе волокно длиной 1.5 м, легированное ионами Yb^{3+} , накачивается излучением лазерного диода через спектральный уплотнитель каналов. Пучок усиленного лазерного излучения выделяется оптическим изолятором, а затем коллимируется коллиматором. Угол наклона лазерных пучков тщательно настраивается для обеспечения перекрытия лазерных пучков друг с другом в плоскости наблюдения

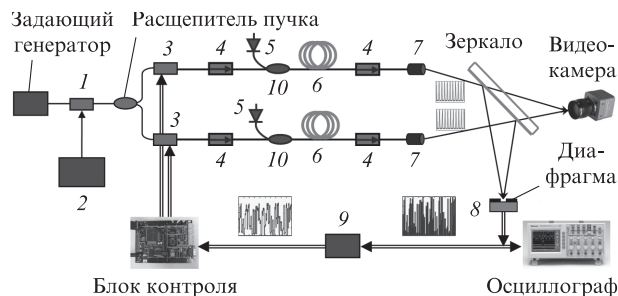


Рис.3. Экспериментальная установка для когерентного сложения пучков излучения импульсных волоконных усилителей:

1 – модулятор интенсивности; 2 – функциональный генератор; 3 – фазовый модулятор; 4 – изолятор; 5 – лазерный диод; 6 – волокно, легированное ионами Yb^{3+} ; 7 – коллиматор; 8 – фотоприемник; 9 – фильтр нижних частот; 10 – спектральный уплотнитель каналов.

видеокамеры. Массив коллимированных выходных пучков делится зеркалом. Отраженная от него часть пучка направляется на изготовленную нами точечную диафрагму с радиусом отверстия 50 мкм. Фотоприемник расположен сразу за диафрагмой. Положение диафрагмы тщательно юстируется для обеспечения максимального выходного сигнала приемника. Этот сигнал (мощность излучения) после прохождения через фильтр нижних частот определяется как весовая функция J и используется в SPGD-алгоритме. Другая часть пучка направляется на ИК видеокамеру для диагностики профиля суммарного пучка. В нашем эксперименте SPGD-алгоритм реализовывался с помощью цифрового сигнального процессора, и сигналы управления фазой направлялись на фазовые модуляторы через цифроаналоговые преобразователи.

Излучение импульсного лазера генерируется при управлении модулятора интенсивности синусоидальным сигналом с частотой 20 кГц. Как следует из рис.4, частота следования импульсов также составляет 20 кГц, а их длительность равна ~ 20 мкс. Разностью оптических путей двух пучков можно легко управлять без использования линии задержки за счет изменения длины волокон усилителя путем его отрезания или сварки. Эта разность не должна превышать 0.1 м. В итоге ошибка в синхронизации импульсов была пренебрежимо мала и не превышала 0.0017%.

В целях устранения флуктуаций метрической функции, обусловленных использованием импульсных лазеров, мы сконструировали простой RC-фильтр нижних частот. Ис-

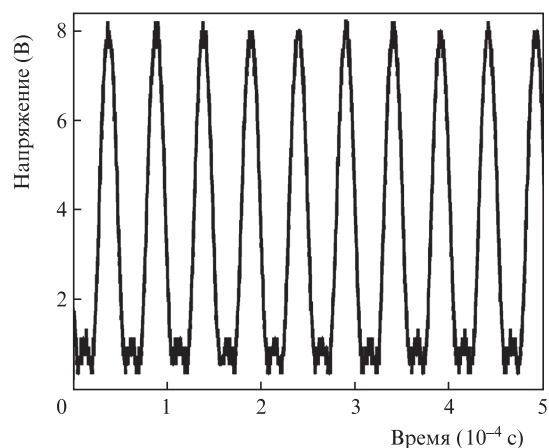


Рис.4. Интенсивность излучения импульсного лазера.

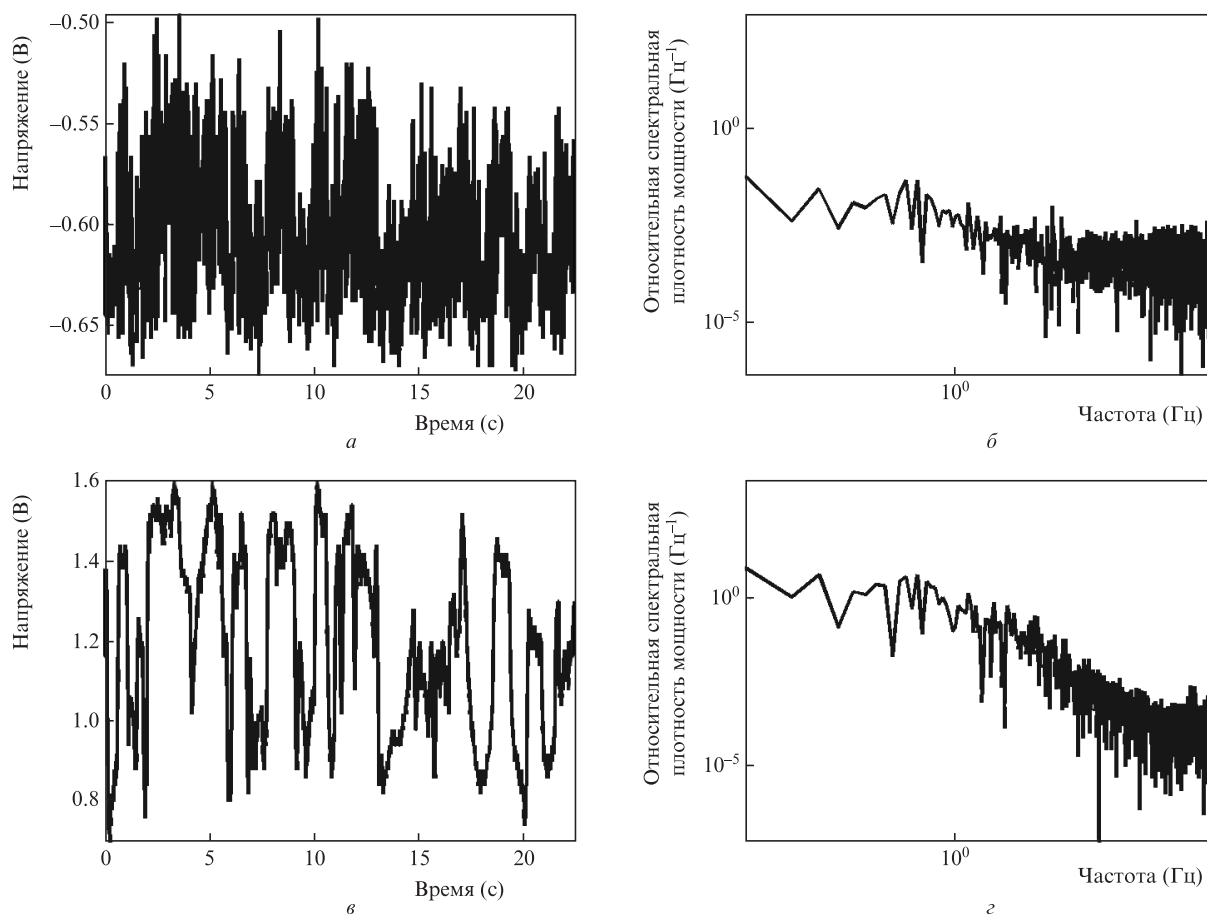


Рис.5. Характеристики метрической функции, регистрируемой до и после фильтра нижних частот. Временное (а, в) и частотное (б, з) представления до (а, б) и после (в, з) фильтра.

пользовался резистор с сопротивлением 1 кОм и конденсатор емкостью 1 мкФ. Частота среза фильтра на уровне 3 дБ составляла ~ 1 кГц. Экспериментально были исследованы метрические функции, регистрируемые до и после фильтра нижних частот. На рис.5 обе они приведены во временном и в частотном представлениях. Видно, что

сконструированный фильтр низких частот устраняет флуктуации метрической функции, обусловленные использованием импульсных лазеров, и дает возможность извлечь точный сигнал фазового шума и реализовать активное фазовое управление. В эксперименте были продемонстрированы синфазный (разность фаз между пучками излуче-

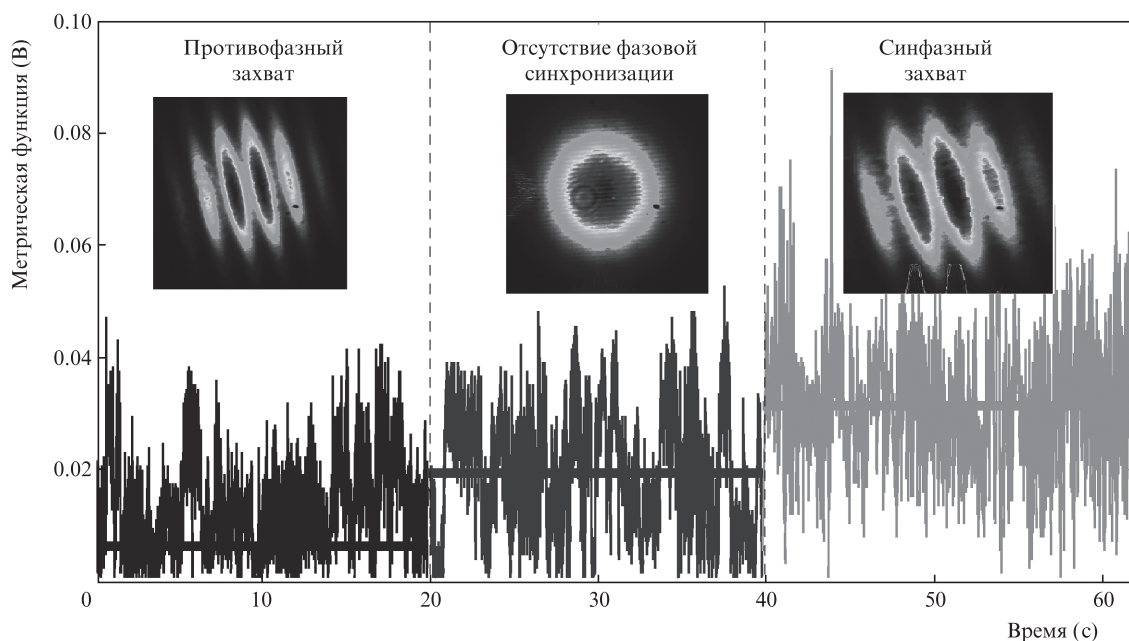


Рис.6. Результаты экспериментов по фазовой синхронизации.

ния двух лазеров равна $2\pi\tau$) и противофазный (разность фаз между пучками излучения двух лазеров равна $2\pi\tau + \pi$) захваты фазы. При противофазном фазовом захвате в четвертом шаге итерационного цикла параметр $\gamma < 0$, а при синфазном фазовом захвате $\gamma > 0$.

Результаты эксперимента представлены на рис.6. Видна эволюция метрической функции (регистрируемой до фильтра нижних частот) от состояния с противофазным захватом фаз к состоянию с разомкнутой петлей контура захвата фазы (отсутствие фазовой синхронизации) и затем к софазному захвату фаз (приведены также соответствующие интерференционные картины). В состоянии с разомкнутой петлей среднее значение метрической функции составляет 19.4 мВ, а видность долговременных интерференционных картин равна нулю. В предположении $\sigma = 0.1$ и $\gamma = -0.3$ в SPGD-алгоритме устанавливается противофазный захват фаз. Метрическая функция (среднее значение 13.7 мВ) в состоянии с противофазным захватом фаз составляет 0.7 от значения в состоянии с разомкнутой петлей. Соответствующая долговременная противофазная интерференционная картина демонстрирует видность 0.41. В предположении $\sigma = 0.1$ и $\gamma = 0.3$ в SPGD-алгоритме устанавливается синфазный захват фаз. Метрическая функция в синфазном состоянии составляет 1.61 от значения в состоянии с разомкнутой петлей, а видность интерференционных полос увеличивается от 0 до 0.33. Здесь видность определяется по формуле $(I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$, где I_{\max} и I_{\min} – интенсивности в максимуме и в смежном минимуме интерференционной картины.

Хотя средняя мощность лазерного излучения в нашем эксперименте была низкой, используемая нами архитектура управления фазой может быть легко отмасштабирована на случай высокой мощности за счет увеличения числа усилителей и мощности единичного усилителя. Это может обеспечить перспективный путь для масштабируемого до высокой мощности когерентного сложения пучков излучения импульсных лазеров.

4. Выводы

В работе предложена и продемонстрирована масштабируемая архитектура когерентного сложения излучения полностью волоконных импульсных усилителей с активным управлением фазы, основанном на использовании SPGD-алгоритма. Ключевым моментом является использование фильтра нижних частот для преобразования импульсной характеристической метрики к состоянию, отвечающему непрерывному режиму. Для устранения флуктуаций метрической функции, обусловленных использованием импульсных лазеров, и извлечения точного сигнала фазового шума вводится фильтр нижних частот с частотой отсечки 1 кГц. Это позволяет построить активное управление фазой на основе SPGD-алгоритма и реализовать устойчивое сложение когерентных пучков в приемной плоскости даже в турбулентном окружении. Результаты эксперимента показывают, что видность полос ин-

терференционной картины при длительной экспозиции увеличивается от 0 до 0.4, а мощность в главном лепестке диаграммы направленности растет в 1.6 раза при переходе системы от состояния с открытой петлей контура синфазного захвата фазы к состоянию с замкнутой петлей. При этом имеются три момента, на которые следует обращать внимание. Во-первых, частота следования импульсов волоконного лазера должна быть намного выше, чем частота фазового шума. Во-вторых, необходима точная синхронизация излучений каждого импульсного лазера. И, наконец, важен тщательный выбор параметров фильтра нижних частот, чтобы извлечь точный сигнал фазового шума для SPGD-алгоритма, на котором основано активное управление фазой. Хотя средняя мощность лазерного излучения в нашем эксперименте была небольшой, эта архитектура активного управления фазой может быть легко отмасштабирована для случая высокой лазерной мощности за счет увеличения числа усилителей и мощности единичного усилителя и обеспечить перспективный путь для масштабируемого когерентного сложения пучков излучения импульсных лазеров высокой мощности.

Работа поддержана Инновационным фондом для выпускников Национального университета оборонных технологий, Китай (грант № B080702).

- Galvanuskas A. *Opt. Photon. News*, **15**, 42 (2004).
- Jeong Y., Sahu J.K., Payne D.N., Nilsson J. *Opt. Express*, **12**, 6088 (2004).
- Michaille L., Taylor D.M., Bennett C.R., Shepherd T.J., Ward B.G. *Opt. Lett.*, **33**, 4200 (2008).
- Kong F., Liu L., Sanders C., Chen Y.C., Lee K.K. *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 151110 (2007).
- Corcoarn C.J., Durville F. *Appl. Phys. Lett.*, **86**, 20118 (2005).
- Cheung E.C., Weber M., Rice R.R. *Phase Locking of a Pulsed Fiber Amplifier* (Japan, 2008, paper WA2).
- Goodno G.D., Komine H., McNaught S.J., Weiss S.B., Redmond S., Long W., Simpson R., Cheung E.C., Howland D., Epp P., Weber M., McClellan M., Sollee J., Injeyan H. *Opt. Lett.*, **31**, 1247 (2006).
- Goodno G.D., Asman C.P., Anderegg J., Brosnan S., Cheung E.C., Hammo D., Injeyan H., Komine H., Long W.H., McClellan M. Jr, McNau S.J., Redmond S., Simpson R., Sollee J., Weber M., Weiss S.B., Wickham M. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **13**, 460 (2007).
- Augst S.J., Fan T.Y., Sanchez A. *Opt. Lett.*, **29**, 474 (2004).
- Shay T.M. *Opt. Express*, **14**, 12188 (2006).
- Shay T.M., Benham V., Baker J.T., Ward B., Sanchez A.D., Culpepper M.A., Pilkington S.D., Spring J., Nelson, D.J., Lu C.A. *Opt. Express*, **14**, 12015 (2006).
- Jolivet V., Bourdon P., Bennai B., Lombard L., Goular D., Pourtal E., Canat G., Jaouen Y., Moreau B., Vasseur O. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **15**, 257 (2009).
- Ma Y., Zhou P., Wang X., Ma H., Xu X., Si L., Liu Z., Zhao Y. *Opt. Lett.*, **35**, 1308 (2010).
- Vorontsov M.A., Kolosov V. *J. Opt. Soc. Am. A*, **22**, 126 (2005).
- Zhou P., Ma Y., Wang X., Ma H., Xu X., Liu Z. *Opt. Lett.*, **34**, 2939 (2009).
- Vorontsov M.A., Weyrauch T., Beresnev L.A., Carhart G.W., Liu L., Aschenbach K. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **15**, 269 (2009).
- Zhou P., Liu Z., Wang X., Yanxing M., Haotong M., Xu X. *Appl. Phys. Lett.*, **94**, 231106 (2009).
- Zhou P., Wang X., Ma Y., Ma H., Liu Z. *Opt. Lett.*, **35**, 950 (2010).