

Г.И. Ильин, О.Г. Морозов, Ю.Е. Польский

## ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫХ ФОРМИРОВАТЕЛЕЙ ДВУХЧАСТОТНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЛЧМ-ЛИДАРОВ

Приведены результаты сравнительного анализа характеристик формирователей двухчастотного лазерного излучения, применяемых в дифференциальных ЛЧМ-лидарах. Показана перспективность развития амплитудно-фазовых электрооптических устройств указанного класса. Рассмотрены их схемные решения. Представлены результаты экспериментальных исследований зависимости чистоты спектра выходного излучения от параметров преобразования как основной зависимости, определяющей метрологические характеристики ЛЧМ-лидара в целом.

### 1. Введение

В последнее время заметно активизировались работы по созданию принципов построения и технической реализации многоцелевых ЛЧМ-лидаров, предназначенных для дифференциальных исследований структуры и динамики естественной атмосферы. Отличительной особенностью каждой из схем лидаров является метод получения двухчастотного лазерного излучения и его модуляции: перестраиваемый с помощью пьезокерамических зеркал и переключателя длин волн  $\text{CO}_2$ -лазер [1], амплитудный электрооптический модулятор на кристалле германия и два He-Ne-лазера, генерирующих на близких переходах [2], зеэмановский расщепитель на резонансном фотоупругом модуляторе [3] и электрооптический преобразователь одночастотного когерентного излучения в двухчастотное [4].

Кроме этих устройств известны механические и акустооптические модуляторы, которые также широко используются для получения двухчастотного излучения [5]. Во всех указанных работах приводятся оценки возможностей той или иной схемы ЛЧМ-лидаров с позиций классического теоретического подхода, и ни в одной из них не приведено обоснование выбора типа формирователя двухчастотного лазерного излучения, метрологические характеристики которого в значительной степени определяют метрологические характеристики лидара в целом.

Основная цель настоящей работы заключается в определении наиболее рациональных способов формирования двухчастотного лазерного излучения и разработке на их основе устройств, обеспечивающих высокую степень чистоты и стабильность выходных спектральных характеристик и в то же время возможность плавной перестройки разностной частоты по заданному закону и с заданной скоростью, что необходимо для создания многоцелевых лидаров.

### 2. Результаты сравнительного анализа характеристик существующих формирователей двухчастотного лазерного излучения

На первом этапе исследований нами был проведен сравнительный анализ характеристик существующих формирователей двухчастотного лазерного излучения (ФДЛИ) по следующим характеристикам: воспроизводимость длин волн и их разностной частоты, диапазон разностных частот, стабильность и равенство амплитуд на обеих частотных составляющих, возможность перестройки частот излучения по заданному закону и с заданной скоростью, линейность модуляционной характеристики, особенности использования в составе лидара и стоимость технической реализации.

Некоторые исходные данные для сравнительного анализа, взятые из [1–5], приведены в таблице. Знаки «-» и «+» означают соответственно отрицательную и положительную суммарные оценки характеристик, указанных в соответствующих столбцах таблицы. Данные оценки складывались из оценки принципиальной возможности реализации указанных характеристик для данного ФДЛИ и сравнительной оценки сложности и стоимости ее реализации для различных ФДЛИ. Знак «-/+» означает наличие в литературных источниках полярных мнений.

По результатам анализа мы можем утверждать, что наиболее широкими перспективами для использования в дифференциальных ЛЧМ-лидарах обладают зеэмановские лазеры, акустооптические и электрооптические преобразователи. Однако сложность плавной перестройки частоты в первых, объяснимая нелинейной S-образной зависимостью между разностной частотой и приложенным полем, и некоторое неудобство построения оптических схем во вторых, связанное с наличием угла между исходным и сдвинутым по частоте излучениями, выдвигает на первый план использование электрооптических устройств при условии повышения чистоты и стабильности спектрального состава их выходного излучения в случае отклонения параметров преобразования от оптимальных.

Формирователи двухчастотного лазерного излучения и их характеристики	Диапазон разностных частот, МГц	Нестабильность разностной частоты	Степень спектральной чистоты выходного излучения	Возможность плавной перестройки разностной частоты	Возможность создания опорного канала для синхронной обработки информации
Вращающаяся дифракционная решетка	0...500	$10^{-3}$	-	-	-
Двухволновый лазер	100	$10^{-8}$	+	-	-
Лазер Зеемана	$100^{-3}$ ...100	$10^{-9}$	+	-/+	-/+
Акустооптический модулятор	$10^{-2}$ ...100	$10^{-6}$	+	+	+
Электрооптический модулятор: поляризационный	0...20	$10^{-6}$	-	-	+
фазовый	0...5	$10^{-6}$	-	+	+
амплитудно-фазовый	0...200	$10^{-6}$	+	+	+

Выполнение поставленных условий достигнуто нами в амплитудно-фазовом электрооптическом ФДЛИ, принцип работы и технические характеристики которого подробно описаны в [4].

### 3. Варианты схемных решений амплитудно-фазовых электрооптических ФДЛИ

В основе работы амплитудно-фазового электрооптического ФДЛИ лежит способ преобразования одночастотного когерентного излучения в двухчастотное, заключающийся в амплитудной модуляции исходного излучения управляющим полем с частотой, равной разностной частоте, и коммутации фазы полученного амплитудно-модулированного колебания при прохождении его огибающей минимума [6]. При этом спектр выходного излучения при оптимальных параметрах преобразования содержит две составляющие, расположенные симметрично относительно частоты подавленного исходного излучения и имеющие одинаковые амплитуды.

На базе данного способа нами разработаны три варианта электрооптических устройств по одно-модуляторной, двухмодуляторной и однокристалльной схемам.

Одномодуляторная схема [7], являющаяся базовой, выполнена на основе кристалла метаниобата лития электрооптического модулятора МЛ-5. Рабочая точка преобразователя выбрана на изгибе его модуляционной характеристики, что позволило реализовать преобразование частоты с помощью одного управляющего напряжения. Структурная схема одномодуляторного варианта показана на рис. 1.

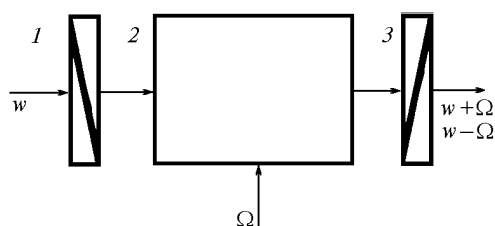


Рис. 1. Структурная схема одномодуляторного электрооптического устройства преобразования одночастотного когерентного излучения в двухчастотное. 1, 3 – поляризаторы; 2 – электрооптический модулятор

Двухмодуляторный преобразователь [8] построен также на базе электрооптических модуляторов МЛ-5 и предназначен для использования в прецизионных ЛЧМ-лидарах. Высокая чистота спектра выходного излучения в этом случае достигается за счет выбора рабочих точек амплитудного и фазового модуляторов на линейных участках их модуляционных характеристик. Структурная схема двухмодуляторного варианта показана на рис. 2.

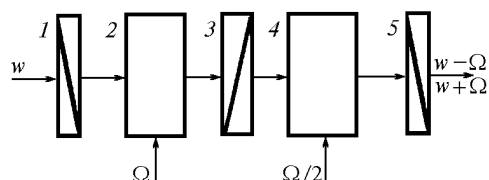


Рис. 2. Структурная схема двухмодуляторного электрооптического устройства преобразования одночастотного когерентного излучения в двухчастотное. 1, 3, 5 – поляризаторы; 2, 4 – электрооптические модуляторы

Однокристалльный преобразователь [9] содержит две пары управляющих пластин для реализации амплитудной модуляции и фазовой коммутации на одном кристалле и разработан для исследований на различных длинах волн лазерного излучения. Известные электрооптические ФДЛИ, в том числе одно- и двухмодуляторные преобразователи, содержат узкополосные четверть- или полуволновые трансформаторы поляризации, что определяет возможность их использования лишь на конкретной длине волны лазера. При использовании кристалла метаниобата лития окно прозрачности составит от 0,4 до 4,5 мкм. Структурная схема однокристалльного варианта показана на рис. 3.

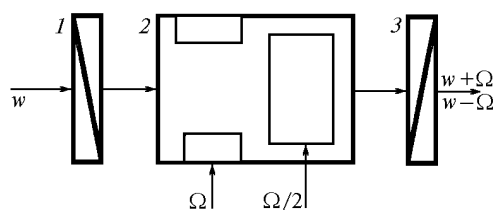


Рис. 3. Структурная схема однокристалльного электрооптического устройства преобразования одночастотного когерентного излучения в двухчастотное. 1, 3 – поляризаторы; 2 – электрооптический кристалл с двумя парами управляющих электродов

При использовании кристаллов германия, являющихся базовыми для электрооптических модуляторов МЛ-7, МЛ-8, аналогичные схемные решения могут быть реализованы в диапазоне 10,6 мкм.

#### 4. Исследование чистоты спектра выходного излучения в амплитудно-фазовых электрооптических ФДЛИ

Основными характеристиками ФДЛИ, определяющими метрологические характеристики ЛЧМ-лидара в целом, являются чистота спектра выходного излучения и ее стабильность при отклонении параметров преобразования от оптимальных.

Исследование влияния отклонения параметров преобразования от оптимальных на спектральный состав выходного излучения для различных схемных решений амплитудно-фазовых электрооптических ФДЛИ проводилось на экспериментальной установке, построенной на базе сканирующего интерферометра САИ-8.

Для двухмодуляторной и однокристалльной схем отклонение параметра фазовой коммутации на 30% от оптимального значения при сохранении оптимального напряжения амплитудной модуляции приводит к снижению амплитуд полезных и паразитных составляющих соответственно на 10 и 50%. Коэффициент нелинейных искажений в этом случае не превышает 4%. Уменьшение оптимального напряжения амплитудной модуляции на 30% при сохранении оптимального значения параметра фазовой коммутации приводит к увеличению амплитуд паразитных составляющих на 5% и незначительному уменьшению амплитуд полезных составляющих. Коэффициент нелинейных искажений в этом случае не превышает 10%. При оптимальных параметрах преобразования коэффициент нелинейных искажений составляет 1%.

Спектр выходного излучения для одномодуляторной схемы при работе в оптимальной рабочей точке  $\Gamma_{\text{опт}}$  определяется следующим выражением:

$$E_{\text{вых}}(t) = -jE_{\text{вх}} e^{j\omega t} [2 \sum J_{2k+1}(Z) \sin(2k+1) \Omega t], \quad (1)$$

где  $\omega$  – частота исходного одночастотного излучения;  $\Omega$  – разностная частота;  $J_{2k+1}(Z)$  – функция Бесселя  $(2k+1)$ -го порядка;  $Z$  – параметр преобразования, определяемый амплитудой модулирующего напряжения;  $j$  указывает на ортогональность поляризации выходного двухчастотного излучения исходному одночастотному.

При отклонении положения рабочей точки от оптимального значения картина спектра значительно изменяется и определяется выражением

$$E_{\text{вых}}(t) = -j(\sqrt{2}/2) E_{\text{вх}} e^{j\omega t} [J_0(Z) + 2 \sum J_{2k}(Z) \cos 2k \Omega t + 2 \sum J_{2k+1}(Z) \sin(2k+1) \Omega t]. \quad (2)$$

Таким образом, изменение положения рабочей точки оказывает значительное влияние на спек-

тральный состав выходного излучения. Результаты экспериментальных исследований зависимости относительно амплитуд спектральных составляющих выходного излучения  $n$  от изменения положения рабочей точки  $\Gamma$  показаны на рис. 4. Положению  $\Gamma_{\text{опт}}$  соответствует точка 0.

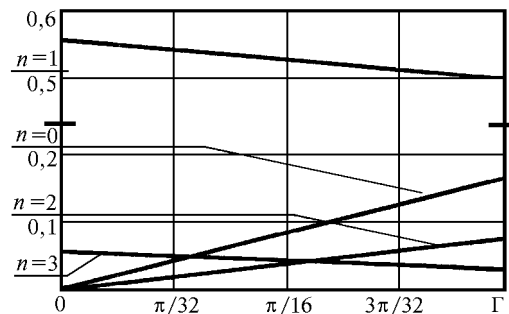


Рис. 4. Зависимость относительных амплитуд спектральных составляющих выходного двухчастотного излучения от положения рабочей точки

Следует отметить, что при всех изменениях спектрального состава равенство амплитуд полезных составляющих в силу симметричности спектра остается не нарушенным. При оптимальных параметрах преобразования коэффициент нелинейных искажений составляет 1%. Температурные изменения и неточность юстировки приводят к смещению рабочей точки преобразователя соответственно на 0,02 В/°С и 2 В/угл.мин и вызывают незначительные спектральные изменения аддитивного характера.

#### 5. Заключение

Разработка амплитудно-фазовых электрооптических формирователей двухчастотного лазерного излучения является перспективным направлением развития техники дифференциальных ЛЧМ-лидаров. Возможности устройств указанного класса могут быть использованы как в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах длин волн, так и в диапазоне 10,6 мкм. При этом обеспечиваются:

- низкий коэффициент нелинейных искажений;
- высокая стабильность частотных и энергетических характеристик преобразователей;
- возможность плавной перестройки разностной частоты по заданному закону и с заданной скоростью.

1. Гордов Е.П., Хмельницкий Г.С. // 1-й Межрес. симп. «Оптика атмосферы и океана». (Тезисы докл., ч. 2). Томск, ТНЦ СО РАН. 1994. С. 44–45.
2. Агишев Р.Р., Айбатов Л.Р., Польский Ю.Е. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 11–12. С. 1624–1629.
3. Лазерный контроль атмосферы / Под ред. Э. Хинкли. М.: Мир, 1979. 419 с.
4. Ильин Г.И., Морозов О.Г., Польский Ю.Е. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. № 12. С. 1871–1874.
5. Лазерные измерительные системы / Под ред. Ю.Н. Дубнищева. М.: Радио и связь, 1983. 380 с.

6. Ильин Г.И., Морозов О.Г., Польский Ю.Е. // А. с. N 1455687.  
7. Ильин Г.И., Морозов О.Г., Польский Ю.Е. // А. с. N 1463010.

8. Ильин Г.И., Морозов О.Г., Польский Ю.Е. // А. с. N 1466494.  
9. Ильин Г.И., Морозов О.Г., Польский Ю.Е. // А. с. N 1477130.

Казанский государственный технический университет  
им. А.Н. Туполева

Поступила в редакцию  
16 июня 1997 г.

*G.I. Il'in, O.G. Morozov, Yu.E. Pol'skii.* **Construction Peculiarities of Devices Forming Two Frequency Laser Radiation for Differential LFM-Lidars.**

The results of comparative analysis of characteristics of devices forming two frequency laser radiation for differential LFM-lidars are given. The development of amplitude-phase electrooptical devices of such class is shown to be promising. Their scheme decisions are examined. Experimental results of investigation of transformation parameters effect on purity of radiation output spectrum, as main function, which determines the metrological characteristics of LFM-lidar on the whole, are presented.