

УДК 535:628.373.8]:62-50; 535.2:621.373.826

UDC 535:628.373.8]:62-50; 535.2:621.373.826

**РАЗРАБОТКА СПОСОБА И УСТРОЙСТВА  
МОДУЛЯЦИИ ПОТОКА ОПТИЧЕСКОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ С ЧАСТОТОЙ БОЛЕЕ 1 МГц**

**DEVELOPMENT OF PRINCIPLE AND  
MECHANISM FOR MODULATION OF  
OPTICAL RADIATION STREAM WITH MORE  
THAN 1 MHZ FREQUENCY**

Мышкин Вячеслав Федорович  
д. ф.-м. н., профессор

Myshkin Vyacheslav Fedorovich  
Dr.Sc.(Phys.-Math.), professor

Хан Валерий Алексеевич  
д. т. н., профессор

Khan Valery Alekseevich  
Dr.Sc.(Tech.), professor

Ижойкин Дмитрий Александрович  
студент

Izhoykin Dmitry Aleksandrovich  
student

Панков Алексей Викторович  
студент  
*Томский политехнический университет, Томск,  
Россия*

Pankov Aleksey Victorovich  
student  
*Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia*

В статье приводятся результаты разработки метода модуляции непрерывного лазерного излучения с частотой более 1 МГц. Проведена оценка уровня сигнала, формируемого при диагностике параметров гетерогенных систем по их объему

The results of research of principle for modulation of continuous laser ray with more than 1 MHz frequency are representing in this article. The evaluation of signal level, which is forming by the volume of heterogeneous systems by diagnosis for their parameters was made

Ключевые слова: МОДУЛЯЦИЯ, ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ, ЛИДАРНОЕ УРАВНЕНИЕ, ОПТИЧЕСКАЯ ПЛОТНОСТЬ, АЭРОЗОЛЬ, ОБРАТНОЕ РАССЕЯНИЕ, ОСЛАБЛЕНИЕ, СИГНАЛ-ШУМ

Keywords: MODULATION, LASER RADIATION, LIDAR EQUATION, OPTICAL DENSITY, AEROSOL, BACK SCATTERING, IMPAIRMENT, NOISE SIGNAL

Многие задачи диагностики в физике плазмы, медицине, метрологии решаются путем регистрации изображений, поэтому формирование изображений из областей, находящихся в рассеивающих оптическое излучение средах, является актуальной задачей.

Цель исследований – разработать метод модуляции непрерывного лазерного излучения и провести оценки возможностей диагностики параметров среды внутри гетерогенных систем с помощью такого излучения.

В атмосферных условиях туман и пыль искажают изображение. Релеевское рассеяние на молекулах изменяется для коротких длин волн пропорционально  $1/\lambda^4$ , что является причиной увеличения рассеяния света в синей части спектра. Рассеяние Ми на частицах аэрозоля размерами,

сравнимыми с длиной волны излучения, возрастает для коротких длин волн. При увеличении концентрации дисперсных частиц возрастает доля многократного рассеяния.

Основное зашумляющее действие рассеивающих сред связано с уменьшением контраста изображения при появлении вуали, которое вносит существенный вклад и имеет большое значение. Например, солнечные лучи рассеиваются слоем атмосферы, в котором взвешены микрочастицы аэрозоля. Рассеянное от аэрозоля поток излучения наблюдается одновременно с излучением, рассеянным от наблюдаемого объекта, формируя тем самым вуаль.

Диагностика объемной структуры гетерогенных систем только тогда возможна, когда различные его участки различимы по своим параметрам (яркостью или спектральным составом) от окружающего фона. Если и яркость, и цвет предмета, и фона совпадают, то предмет сольется с фоном.

В настоящее время для переработки веществ перспективными являются плазмохимические и нанотехнологии. При разработке новых технологических процессов приходится регистрировать параметры плазменной системы, находящейся за оптически плотным гетерогенным слоем. При этом, из-за сильного рассеяния, ограничивается глубина слоя, параметры которого можно контролировать с помощью лазерного излучения.

Существенно более мутными средами, чем туман, являются биоткани - оптически неоднородные поглощающие среды. За счет многократного рассеяния и поглощения при распространении в биоткани лазерный пучок уширяется в поперечном направлении и затухает - в продольном. Формируется значительный поток излучения в обратном направлении (обратное рассеяние). Основными рассеивателями биотканей являются клеточные мембраны, ядра, митохондрии и гранулы меланина в клетках.

Значения коэффициентов поглощения для большинства биотканей

составляют  $10^{-2}$ - $10^4$   $\text{см}^{-1}$  [1]. В УФ- и ИК- ( $\lambda \geq 2$  мкм) областях спектра превалирует поглощение. Поэтому вклад процесса рассеяния незначителен, и свет проникает в биоткань лишь на несколько клеточных слоев. Для видимой области спектра глубина проникновения, определяемая по падению интенсивности в  $e$  раз, для типичной биоткани составляет 0,5-2,5 мм. При этом наблюдается как поглощение, так и рассеяние. В области длин волн 0,6-1,5 мкм рассеяние превалирует над поглощением, и свет проникает в биоткань до 8-10 мм. Этот спектральный диапазон может быть использован для зондирования внутренних слоев биоткани. Также существенно увеличивается интенсивность отраженного биотканью излучения (за счет обратного рассеяния) вплоть до 35-70% от падающего [1].

Различные объекты в биотканях скрыты от наблюдения из-за многократного рассеяния света на ближних слоях. Разработаны различные методы для обнаружения таких объектов с применением рентгеновских лучей, ультразвука, явления ядерного магнитного резонанса. Например, рентгеновская томография используется для обнаружения опухолей в тканях человека. Однако рентгеновские лучи опасны для здоровья человека.

В течение последних 30-ти лет разрабатывались методы использования видимого света и инфракрасного излучения для визуализации опухоли в биотканях. При оптической диагностике исследуемая часть тела облучается, и наблюдается тень от опухоли [2]. Из-за сильного рассеяния света в биоткани такая непрерывная оптическая диагностика дает плохое качество изображений. Тень от малой опухоли в глубине ткани трудно зафиксировать, поэтому эту методику нельзя применить для раннего обнаружения опухоли.

С развитием лазеров, генерирующих ультракороткие импульсы и методов детектирования импульсов рассеянного излучения, метод

рассеяния может быть улучшен за счет селективной регистрации пришедших в разные моменты времени потоков и значительным устранением шума, обусловленного многократным рассеянием. Интенсивно развивается метод разрешенной по времени визуализации, использующий различные приборы для сверхбыстрой оптической регистрации (например, стробирование по времени лидарных сигналов) [3]. Результаты этих исследований свидетельствуют о том, что объекты, находящиеся в мутной среде, могут быть зафиксированы. Поэтому методы использования лазерного излучения малой длительности и разрешенное по времени детектирование являются перспективными методами поиска опухолей в биотканях и диагностики параметров среды в оптически плотных аэрозолях.

В настоящее время разработаны источники когерентного оптического излучения, генерирующие импульсы длительностью  $10^{-15} - 10^{-3}$  с. Однако, такие источники не всегда имеются в распоряжении экспериментатора. Поэтому возникает необходимость преобразовать непрерывное излучение, обладающее высокой когерентностью и стабильностью всех параметров во времени, в импульсы длительностью менее 1 нс.

Короткие импульсы излучения можно сформировать за счет интерференции синхронизованных по фазе спектральных составляющих лазерного излучения [4]. Период следования импульсов излучения определяется спектральным сдвигом его компонент, а полуширина – количеством спектральных компонентов. Энергия пучка концентрируется в виде периодических максимумов интенсивности. Между двумя максимумами наблюдаются незначительные спадающие всплески интенсивности.

Модулятор излучения газового лазера (He-Ne) содержит 4 одинаковые плоскопараллельные пластинки из оптического стекла и непрозрачное зеркало, составляющие оптический резонатор. Эти элементы подвижны и

расположены на подвижных каретках. Каждая каретка приводится в движение отдельным электродвигателем.

На рисунке 1 приведена схема модулятора со встречным движением лазерного луча и оптических элементов. Луч, генерируемый в лазере, последовательно проходит через движущиеся пластинки, отражается от концевого зеркала и возвращается в активную среду. Возможны две модификации, связанные с нахождением отражающих элементов в конечных точках возвратно-поступательного движения: отражатели группируются возле активного элемента, отражатели возле активного элемента расходятся. Расстояние от активного элемента лазера до зеркала с полным отражением, при наибольшем его удалении, составляло 0,5 м.

При прохождении луча через каждую пластинку из оптического стекла интенсивность его ослабляется в  $\alpha_1 \approx 0,92$  раз и происходит отражение с коэффициентом  $\alpha_2 \approx 0,078$ . Интенсивность излучения после двух и более отражений от стеклянных пластинок составляет менее 1% от интенсивности исходного луча. На каждой движущейся пластине отразившийся луч испытывает доплеровский сдвиг частоты

$$f_{\partial i} \approx f_0 \frac{u_i}{c}, \quad (1)$$

где  $f_0$  - частота исходного луча;  $u_i$  – скорость отражателя;  $c$  – скорость света.

Схема формирования доплеровских частот приведена на рис. 2. Частота излучения гелий-неонового лазера составляет  $4,71 \cdot 10^{14}$  Гц. В таблице 1 приведены интенсивности и доплеровские сдвиги частот лучей, интенсивность которых превышает 1% от интенсивности исходного луча.

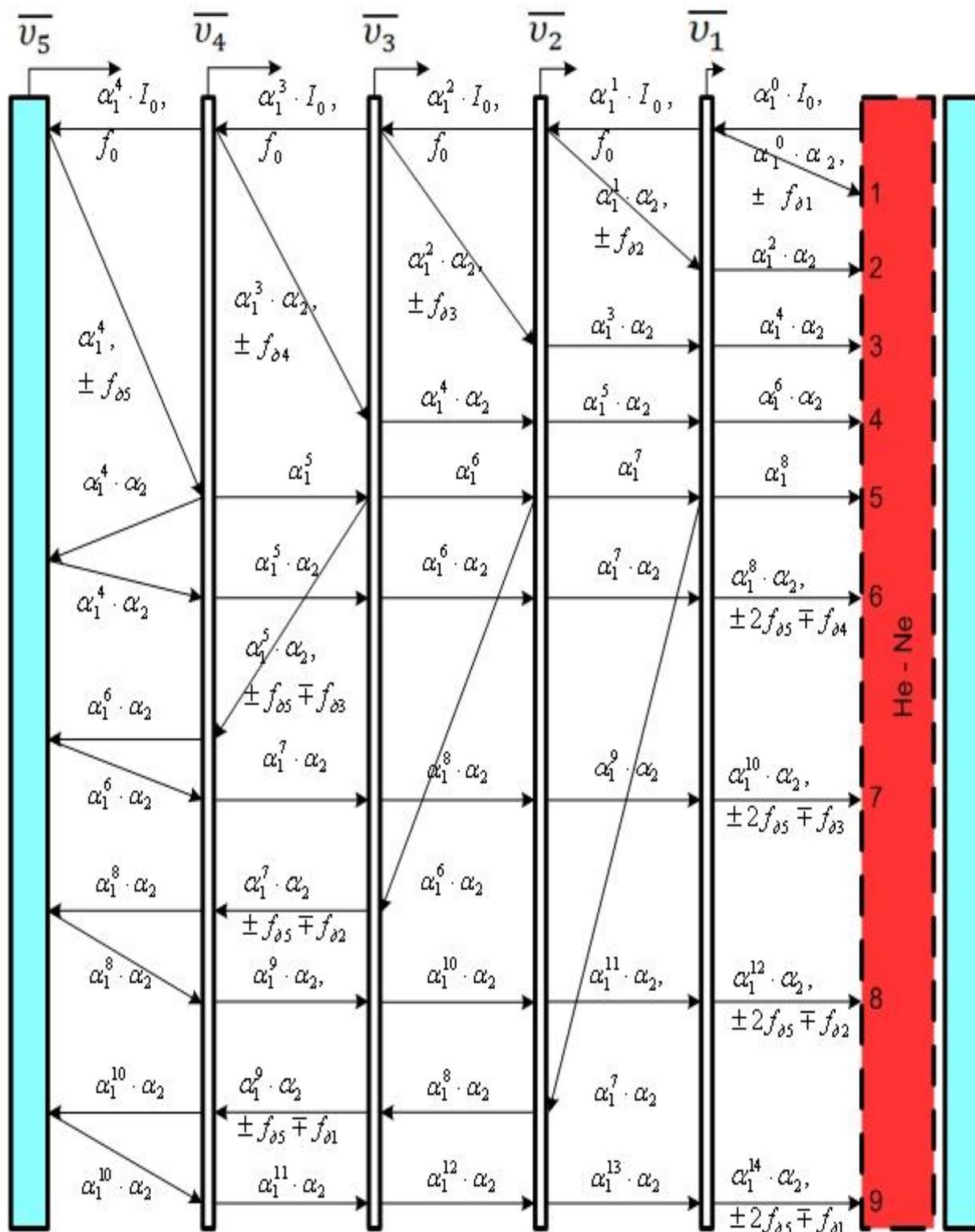


Рис. 1. Схема формирования доплеровских сдвигов лучей

Таблица 1 - Относительные интенсивности и доплеровский сдвиг лучей

№ луча	при встречном движении		при сонаправленном движении	
	Интенсивность, отн.ед.	Частота, МГц	Интенсивность, отн.ед.	Частота, МГц
1	78	1,58	78	-14,22
2	66	3,16	66	-12,64
3	56	4,74	56	-11,06
4	47	6,32	47	-9,48
5	513	7,9	513	-7,9
6	40	9,48	40	-6,32
7	34	11,06	34	-4,74
8	28	12,64	28	-3,16
9	24	14,22	24	-1,58

На рисунке 2 приведен график зависимости суммарной интенсивности когерентных пучков от времени. График зависимости повторяется как при встречном движении, так и при сонаправленном движении луча и отражающих пластин. Видно, что при использовании пластинок из оптического стекла без напыления не удастся достичь максимального уровня модуляции. Расчеты показывают, что максимального уровня модуляции удастся достигнуть при сложении лучей равной интенсивности. Поэтому необходимо использовать многослойные диэлектрические зеркала, позволяющие сформировать лучи равных интенсивностей.

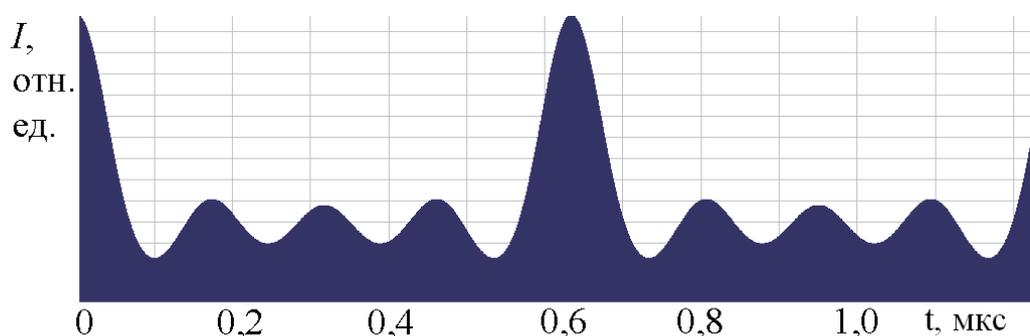


Рис. 2. График зависимости от времени излучения He-Ne лазера, глухое зеркало которого состоит из 5 подвижных элементов.

В схеме, приведенной на рисунке 3, формируются лучи на разных длинах волн равных интенсивностей. Для этого исходный поток излучения непрерывного лазера вытягивается с помощью цилиндрической линзы вдоль направления, совпадающего с радиальным направлением плоского диска. По различным радиусам диска, совершающего вращательное движение, сформированы зеркально отражающие кольца. Эти кольца позволяют формировать дискретный спектр доплеровских частот, необходимый для получения большего уровня модуляции. Вторая по ходу (уже расходящегося) пучка положительная цилиндрическая линза собирает пучки расходящихся лучей. Для формирования коллимированного пучка используется вторая отрицательная цилиндрическая линза. Направления деформации пучка лазерного излучения цилиндрическими линзами параллельны плоскости диска. При этом в вертикальном направлении пучок остается постоянного диаметра. На рисунке показан ход лучей на максимальной и минимальной частотах.

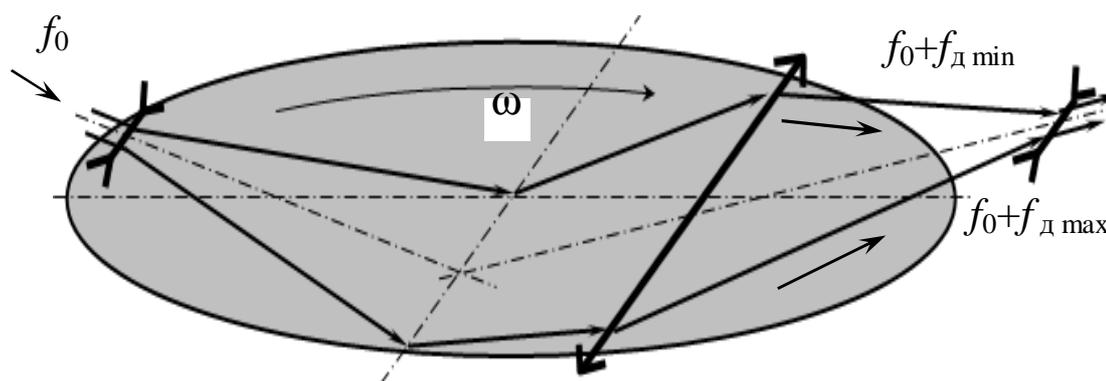


Рис. 3. Схема формирования лучей равных интенсивностей

Импульсное излучение позволяет подсвечивать, в короткие промежутки времени, лишь пространственную область, параметры которой необходимо определить. Метод пространственного стробирования в достаточной мере разработан для лидаров. Установлено, что в

интерференционном поле, сформированном в ослабляющей среде, потери энергии оптического излучения происходят лишь в областях максимума волны [5]. Однако, в то же время, распространение лазерного излучения через ослабляющие участки с помощью интерференционного потока изучены недостаточно.

При зондировании атмосферных аэрозолей и дистанционного газоанализа используют лидарное уравнение

$$P(I, z) = E(I) A(I) z^2 b_p(I, z) T^2(I, z) \quad (2)$$

где  $P(\lambda, z)$  – сигнал обратного рассеяния на длине волны  $\lambda$  с расстояния  $z$ ;  $E(\lambda)$  – энергия излучения лазера;  $A(\lambda)$  – аппаратная постоянная;  $\beta_\pi$  – коэффициент обратного рассеяния.

Известно, что интерференционный поток двух потоков электромагнитных волн на разных частотах, распространяющихся вдоль одной линии, осциллирует вдоль этого направления [6].

Анализ лидарного уравнения показывает, что невозможно определять параметры аэрозольных частиц из внутренних слоев облака на большой глубине. Рассеяние от внешних слоев аэрозольного облака будет уменьшать величину отношения С/Ш для внутренних слоев. При использовании модулированного пучка также необходимо учитывать уменьшение интенсивности на трассе до точки измерения. При расчете прохождения зондирующего модулированного лазерного излучения (многоволнового) на различных участках трассы использовали известные соотношения. Значение амплитуды в разных точках трассы когерентного пучка может быть рассчитано путем сложения амплитуд отдельных компонентов (с учетом знаков спектральных составляющих)

$$E = \sum_{i=1}^n E^i = \sum_{i=1}^n E_0^i \cos(\omega_i t - k_i z + j_0^i). \quad (3)$$

Интенсивность излучения определяется из соотношения  $I = \frac{c}{8\pi} |E'|^2$ .

Мощность электромагнитного излучения вдоль трассы распространения в ослабляющей среде уменьшается по экспоненциальному закону (закон Бугера):  $I = I_0 \exp(-\alpha z)$ , где  $\alpha$  - коэффициент ослабления.

Для проведения расчетов коэффициентов передачи через ослабляющие участки трассы потока лазерного излучения начальные фазы в выражении (3) принимали равными нулю. Ослабляющий участок располагался в области преимущественно туннельной передачи энергии излучения, симметрично относительно интерференционных максимумов.

Расчет ослабления зондирующего луча до точки рассеяния проводили двумя путями. В первом (некогерентное сложение волн) для определения суммарной начальной интенсивности все спектральные составляющие складывались по интенсивности (квадраты амплитуд с коэффициентом  $c/8p$ ). Значение интенсивности суммарной волны после ослабляющего слоя вычисляли из закона Бугера.

Для пучка из когерентных составляющих в каждой точке трассы производили векторное суммирование волн на всех длинах волн. Для ослабляющего участка из закона Бугера вычисляли изменение эффективного значения интенсивности каждой гармонической составляющей между двумя расчетными точками с учетом отношения величин суммарной интенсивности в текущей точке к интенсивности некогерентного пучка. Для следующего расчетного участка значения амплитуд напряженностей электрического поля отдельных волн заменяли их уменьшенными значениями на конце предыдущего участка, определяемого из выражения

$$E0^{bix}(i) = E0^{ex}(i) \sqrt{1 - dI0 [1 - \exp(-\alpha \Delta l)]} \quad , \quad (4)$$

где  $\alpha$  - коэффициент ослабления,  $\Delta l$  - длина расчетного участка,  $dI0$  - коэффициент, определяющий изменение интенсивности когерентного излучения на расчетном участке за счет интерференционного потока.

Рассчитывали коэффициент прохождения через ослабляющий участок трассы, расположенный симметрично относительно середины между максимумами. Это обеспечивает наилучшие условия прохождения потока оптического излучения (минимальное ослабление).

Рассчитаны коэффициенты пропускания ослабляющим участком в зависимости от спектрального состава для различных значений оптической плотности потоков некогерентного и когерентного излучений, одинакового спектрального состава. Расстояние от лазера счетного объема равно половине длины пространственного периода межмодовых биений. Первый максимум интерференции совмещали с центром счетного объема. При увеличении количества спектральных составляющих наблюдается увеличение коэффициента пропускания потока когерентных лучей.

Расчеты показывают, что модулированный зондирующий пучок, сформированный в виде импульса из когерентных составляющих, распространяется через ослабляющие участки с гораздо меньшими потерями, чем постоянной интенсивности, собранный из некогерентных составляющих. Графики, приведенные на рисунке 4, показывают закономерности распространения многоволновых пучков. Изменение спектрального состава потока когерентного излучения не влияет на характер зависимости.

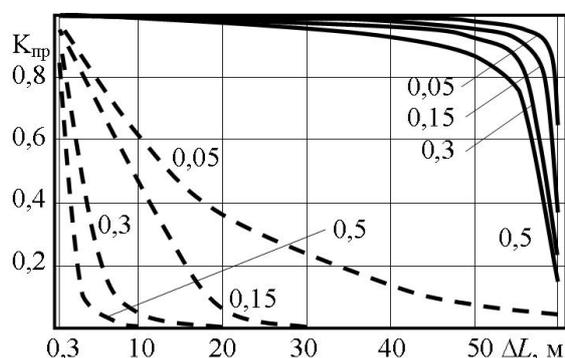


Рис. 4. Коэффициент прохождения некогерентного (пунктир) и лазерного (сплошная) модулированного во времени пучков в счетный

объем для 120 спектральных составляющих.

Интенсивность некогерентного пучка (не модулированного) уменьшается в ослабляющем слое по экспоненциальному закону. При малых значениях отношения между длиной ослабляющего участка к расстоянию между максимумами интерференции ( $\Delta L < 55$  м,  $\Delta f = 5$  МГц) влияние ослабляющего слоя незначительное. При перемещении области ослабления к максимуму интерференции потери излучения возрастают. При расширении спектра, для разных коэффициентов ослабления участка, наблюдается увеличение коэффициента пропускания потока когерентных лучей.

Были проведены оценки для определения получаемого выигрыша (увеличения С/Ш) при зондировании внутренних слоев гетерогенных систем лазерным излучением с постоянной и модулированной интенсивностями из лидарного уравнения. Для информативного сигнала обратного рассеяния из гетерогенных систем учитывали вклад промежуточных участков аэрозоля, освещаемых периферийными областями (фронтами) импульса зондирующего излучения. Частоту модуляции пучка когерентных лучей принимали равной 2,5 МГц, что соответствует расстоянию наилучшего зондирования 120 м. при этом длительность колоколообразного импульса составляет  $\approx 1$  нс. Считали, что облако капель водяного пара с коэффициентом ослабления  $0,05 \text{ м}^{-1}$  начинается с расстояния 50 м от зондирующего лазера. Для некогерентного пучка длительность импульса считали равной 1 мс.

Расчет с помощью лидарного уравнения и выражений (3), (4) показал, что при зондировании пучком некогерентных лучей поток, рассеянный их счетного объема, на три порядка слабее потока, рассеянного от переднего края облака. При зондировании модулированным лучом (пучком когерентных лучей) величины потоков рассеянных потоков, формируемых

когерентными и некогерентными лучами, сравниваются.

**ВЫВОД.** Использование пучка многоволнового когерентного излучений для зондирования внутренних областей аэрозольных систем позволяет значительно увеличить отношение С/Ш.

1. Тучин В.В. Лазеры и волоконная оптика в биомедицинских исследованиях. – Саратов: Изд-во Саратовского университета, 1998.
2. Watmough D.J. Transillumination of breast tissues: factors governing optimal imaging of lesions. // *Radiology*, 1983, vol. 147, pp. 89-92.
3. Andersson-Engels S., Berg R., Svanberg S., and Jarlman O. Time-resolved transillumination for medical diagnostics. // *Opt. Lett.*, 1990, vol. 15, pp. 1178-1181.
4. П.Крюков. Лазер – замечательное достижение XX века // *Квант.* – 2007. - №3. – С.8-18.
5. Опико-электронные методы изучения аэрозолей / С.П. Беляев, Н.К. Никифорова, В.В. Смирнов и др.- М.: Энергоатомиздат. - 1981. - 232с.
6. С.А. Афанасьев, Д.И. Семенцев. Потoki энергии при интерференции электромагнитных волн // *УФН.* - 2008. – Т. 178. – № 4. – С. 377-384.