

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
Санкт-Петербургский горный университет

Кафедра метрологии, приборостроения и управления качеством

ЛАЗЕРНЫЙ ДИСТАНЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ

**РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЛИДАРА ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ
АТМОСФЕРНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ МЕТОДОМ ДПР**

*Методические указания к курсовой работе
для студентов бакалавриата направления 12.03.01*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2021

УДК 681.383 (073)

ЛАЗЕРНЫЙ ДИСТАНЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ. Расчет параметров лидара для обнаружения атмосферного загрязнения методом ДПР: Методические указания к выполнению курсовой работы / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: *С.Е. Парахуда.* СПб, 2021. 24 с.

Методические указания к выполнению курсовой работы по дисциплине «Лазерный дистанционный контроль» составлены в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 12.03.01 «Приборостроение».

Методические указания содержат 100 вариантов задания на курсовую работу и рекомендации к ее выполнению и оформлению.

Научный редактор проф. *И.Е. Ушаков*

Рецензент канд. техн. наук *Г.Д. Фефилов* (НИУ ИТМО)

1. Цель и этапы выполнения курсовой работы

Целью курсовой работы является закрепление знаний и компетенций, полученных студентами при изучении курса "Лазерный дистанционный контроль".

Тема курсовой работы: «Расчет параметров лидара для обнаружения атмосферного загрязнения методом ДПР»

Курсовая работа является важным завершающим этапом изучения курса дисциплины. Курсовая работа позволяет произвести оценку того, насколько студент усвоил теоретический курс и его умения применить полученные знания при решении конкретных практических задач.

В процессе выполнения студент не только закрепляет, но и углубляет полученные теоретические навыки. Курсовая работа является важной частью самостоятельной работы студентов. Опыт и знания, полученные студентами на этом этапе обучения, во многом могут быть использованы в процессе подготовки выпускной квалификационной работы

Выполнение курсовой работы включает следующие этапы:

1. Формирование технического задания к курсовой работе;
2. Подбор и первоначальное ознакомление с литературой;
3. Составление предварительного плана;
4. Изучение отобранных литературных источников;
5. Составление окончательного варианта плана;
6. Выбор функциональной схемы лидара;
7. Выбор лазерных источников;
8. Предварительный габаритный расчет;
9. Уточнение размеров оптических деталей;
10. Разработка габаритного эскиза передающего телескопа;
11. Расчет «мертвой» зоны лидара;
12. Энергетический расчет лидара;
13. Составление лидарного уравнения;
14. Нахождение отношения сигналов после зоны загрязнения;
15. Расчет максимальной дальности действия лидара;
16. Оформление пояснительной записки к курсовой работе;

17. Защита курсовой работы.

2. Формирование технического задания и выбор исходных данных

По последней и предпоследней цифре индивидуального шифра студент должен выбрать исходные данные для выполнения курсовой работы.

При выполнении курсовой работы необходимо произвести расчет основных параметров лидара для обнаружения атмосферного загрязнения методом ДПР (дифференциального поглощения с рассеянием). В качестве объекта лазерного зондирования предлагается область атмосферы с характерным размером L_p , содержащая повышенную концентрацию озона O_3 .

По спектральному распределению сечения поглощения озона в полосе поглощения Шапной (Приложение 2) и характеристикам лазерных излучателей, приведенным в табл. 2, необходимо выбрать схему построения лидара, на основании которой выбрать две длины волны зондирующего излучения.

Одна из длин волн зондирующего излучения λ_1 должна находиться вблизи максимума спектра поглощения озона, вторая длина волны выбирается так, чтобы сечение поглощения излучения на λ_2 было в 1,5- 3 раза меньше.

Исходя из параметров выбранного лазерного излучателя (табл.2) и требуемых характеристик передающей системы лидара (определяются по табл. 1), произвести габаритный расчет телескопической системы передатчика. По результатам расчета выполнить габаритный эскиз передающего телескопа согласно требованиям ЕСКД на формате А4.

Рассчитать коэффициент пропускания передающей оптической системы для двух выбранных длин волн. Определить дистанцию "мертвой зоны" лидара $L_{мз}$.

Составить лидарное уравнение для метода ДПР и решить его для нахождения отношения мощностей сигналов на λ_1 и λ_2 после прохождения излучением заданной зоны атмосферного загрязнения

в случае расположения загрязнения непосредственно за "мертвой зоной" лидара.

Найти максимальную дальность обнаружения лидаром заданной области атмосферного загрязнения. Для этого необходимо определить мощность фонового излучения по заданному значению спектральной яркости фона и параметрам приемной системы лидара (см. табл. 1).

Вычислить минимальную регистрируемую мощность полезного сигнала по заданному отношению сигнал-шум, при котором возможна идентификация полезного сигнала. Для вычислений использовать параметры сигнала, испытывающего большее поглощение.

По полученному значению минимальной мощности сигнала определить максимальную дальность зондирования.

В пояснительной записке к курсовой работе должны быть отражены:

- принцип построения лидара, работающего по методу ДПР;
- функциональная схема лидара;
- габаритный расчет передающего телескопа лидара;
- расчет "мертвой зоны" лидара;
- составление лидарного уравнения и его решение для случая прохождения зондирующим излучением "мертвой зоны" и области атмосферного загрязнения;
- расчет максимальной дальности обнаружения лидаром атмосферного загрязнения.

Таблица 1

ВЫБИРАЕТСЯ ПО ПОСЛЕДНЕЙ ЦИФРЕ ШИФРА										
Исходные данные	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Размер зоны атмосферного загрязнения L_p , м	100	220	200	250	150	170	100	250	200	350
Концентрация озона, выраженная в ПДК, n	11	8	8	12	12	25	8	16	9	10
максимальная разовая среднесуточная	17			15						
Параметры передающей системы										
Угловая расходимость излучения $2\theta_L$, мрад	0.1	0.15	0.2	0.1	0.15	0.2	0.1	0.15	0.2	0.1
Конструкция телескопа:										
Галлея	+		+		+		+		+	
Кассегрена		+		+		+		+		+
Покрытие зеркала 1		Al		Ag		Ag		Au		Al
Покрытие зеркала 2		Au		Al		Ag		Au		Al

Продолжение таблицы 1										
Исходные данные	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Параметры приемной системы										
Диаметр приемного зеркала D_s , мм	350	150	200	250	100	150	300	300	150	100
Угол поля зрения приемного телескопа $2\theta_s$, мрад	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Ширина спектра пропускания $\Delta\lambda_s$, нм	1	0.7	0.5	0.9	0.8	0.5	0.6	1.1	0.7	1
ВЫБИРАЕТСЯ ПО ПРЕДПОСЛЕДНЕЙ ЦИФРЕ ШИФРА										
Условия приема сигнала										
Исходные данные	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Метеорологическая дальность видности R_I , км	10	7	6	10	5	7	8	5	10	6
Спектральная яркость фона M_s , Вт*М ⁻² *ср ⁻¹ *нм ⁻¹	$8 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-2}$	$12 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-2}$	$1.2 \cdot 10^{-1}$	$7 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-2}$
Отношение сигнал/шум ξ	1.1	1.5	1.1	1.2	1.3	1.1	1.4	1.5	1.3	1.2

Таблица 2

Тип лазера	Длина волны λ , нм	Энергия импульса E , мДж	Расходимость 2θ , мрад	Длительность импульса τ , нс	Диаметр пучка d , мм	Частота следования f , Гц	КПД η , %
N₂	331	0,5	3	40	Ø3	100	0,002
Nd:YAG ИЛТИ403	1064 532 355	250 100 25	2 2 2,5	15	Ø6,3	12-50	0,6
Nd:YAG Ekspla NL303HT	1064 523 355	800 380 250	0,6 0,6 0,6	6	Ø8	10	0,8
Nd:YAGЛ отис LS 2145N	1064 532 -	350 230 -	1,5 1,6	14	Ø6,3	5;10;15	0,8
Nd:YAG ИЗ-25	1064 532	1064 30	2,5 2,5	15	Ø6,3	20	0,6
Nd:YAG ЛИО-21	1064 532	2000 900	0,9 0,8	12 10	2×Ø8	10	2 0,9
Nd:YAG Continuum HY-104	1064 532	300 150	1 1	10	Ø6,3	25	1.2 0.6
Nd:YAG <i>Lambda</i> <i>Physics</i> L300	532 355	200 150	0.8 0.8	12	Ø8	33	0.8
РУБИН ОГМ-21	694	30	2,5	20	Ø10	1	0,02
Глория	370- 1070	15-100	1,5	20	≤15	0,2	10-15
ЛКИ403 Родамин 6G 4C Оксазин 17	575±15 590±15 620±20	8-50 6-40 4-30	2,0	10-50	Ø5	≤50	≤15% ≤10% ≤8%

3. Рекомендации к выполнению и оформлению курсовой работы

При решении курсовой работы может быть рекомендован следующий порядок действий.

1. Выбор схемы излучателя.

Реализация метода дифференциального поглощения предполагает использование лазерного источника (или лазерных источников), обеспечивающих генерацию излучения на двух длинах волн λ_1 и λ_2 , одна из которых λ_1 совпадает с одной из линий поглощения детектируемого вещества, в то время, как другая λ_2 не испытывает значительного поглощения. Для повышения помехозащищенности метода и для упрощения обработки и интерпретации полученной при зондировании информации спектральный интервал $\Delta\lambda=|\lambda_1-\lambda_2|$ должен быть по возможности минимален. Конкретные значения длин волн и величины спектрального интервала определяются конкретным видом спектра поглощения детектируемого вещества. Спектр сечения поглощения озона O_3 представлен в Приложении 2.

Спектральные линии зондирующего излучения выбираются из условия, чтобы отношение сечений поглощения отличалось как минимум в 1,5-3 раза. Для реализации излучателя ДПР - лидара могут быть предложены две наиболее распространенные схемы.

Первая из них представлена на рис. 1 (см. Приложение 1) и представляет собой два лазера. Первый лазер генерирует излучение, часть которого непосредственно используется в качестве зондирующего, другая часть служит для когерентной накачки лазера на красителе. При этом должно выполняться условие попадания этой длины волны в спектр возбуждения выбранного красителя. Следует также учесть правило Стокса: возмущающее излучение должно иметь меньшую длину волны, чем вызываемая им генерация.

Современная технология получения интерференционных диэлектрических покрытий позволяет обеспечить как деление одного пучка с практически любым соотношением мощностей, так и эффективное сведение двух пучков с разными длинами волн при условии $\Delta\lambda \geq 10$ нм. Другим подходом является схема, представленная на рис.2 (Приложение1). В этой схеме один лазер используется для накачки сразу двух перестраиваемых лазеров, обеспечивающих возможность настраивать длины волн зондирующего излучения наибо-

лее оптимальным образом, решая при этом более широкий круг задач.

Каждая из предложенных схем имеет свои преимущества, но не свободна от недостатков.

Первая схема обладает большей простотой, использует только два лазера, что позволяет существенно снизить массу и габариты лидарной системы, а также делает систему более надежной и дешевой. Кроме этого, использование в качестве зондирующего излучения лазера накачки существенно (почти в 2 раза) снижает требования к энергии импульса. Что, в свою очередь, позволяет выбрать излучатель более легкий, компактный, не требующий дополнительных квантовых усилителей (в случае твердотельных лазеров) и дополнительно снизить стоимость системы. С другой стороны, более жесткие требования предъявляются к угловой расходимости излучения, что предполагает применение более сложных конструктивных решений, а также дорогостоящих элементов и материалов. В таких случаях применяются дорогостоящие материалы для изготовления резонаторов (инвар, специальные углепластики, кварц), используются зеркала с переменным по радиусу коэффициентом отражения (гауссовы зеркала), внутрирезонаторные телескопы и т.д.

К недостаткам этой схемы излучателя могут быть отнесены невозможность перестройки одной из длин волн зондирующего излучения и необходимость согласования расходимости излучения и диаметра пучка лазера накачки и перестраиваемого лазера.

При выборе второй схемы требования к расходимости излучения лазера в значительной степени снижены. При этом предъявляются повышенные требования к энергии импульса и пиковой мощности. Наиболее типичные значения эффективности преобразования излучения накачки в генерацию для жидкостных перестраиваемых лазеров на органических красителях приведены в табл.1. Для красителей, внедренных в твердую полимерную матрицу, эффективность генерации снижается в 1,3-1,5 раза. Особенностью генерационных свойств лазеров на органических красителях является повторение временной формы импульса накачки импульсом генерации. При выборе исходных данных необходимо и для схемы 1 и для

схемы 2 принять длительность импульса зондирующего излучения τ равной длительности импульса лазера накачки $\tau_{\text{нак}}$

Энергия импульса генерации перестраиваемого лазера должна находиться в диапазоне значений, указанном в табл. 1 для соответствующих типов красителей.

Диаметр пучка перестраиваемого лазера и его угловая расходимость в случае выбора схемы 1 приравниваются соответствующим значениям выбранного лазера накачки.

Для схемы 2 значения диаметров пучков обоих лазеров и их угловые расходимости выбираются равными и находятся по табл. 1.

Деление энергии импульса накачки производится таким образом, чтобы начальные импульсные мощности зондирующих пучков были равными (допускается разница в пределах 5%).

После выбора схемы и лазера накачки заполните таблицу с исходными данными:

Таблица 3

Параметр	Лазер 1	Лазер 2
Марка лазера		
Длина волны, нм		
Энергия импульса, Дж		
Длительность импульса, нс		
Диаметр пучка $d_{п}$, мм		
Полная расходимость 2θ , мрад		

II. Габаритный расчет согласующего телескопа.

1. Первоначально необходимо найти кратность согласующего телескопа.

Увеличение диаметра пучка после телескопа в Γ^x раз приводит к уменьшению угловой расходимости в то же число раз. Величина Γ^x называется кратностью телескопа и равна $\Gamma^x = f_2/f_1$.

Следовательно, для того чтобы обеспечить требуемую по условиям задания расходимость зондирующего излучения $2\theta_L$, необходим согласующий телескоп с кратностью $\Gamma^x = 2\theta/\theta_L$.

2. Найдем световой диаметр первого оптического элемента телескопа (для телескопа Галилея – линзы, для телескопа Кассегрена – зеркала):

$$d_{1св} = (1,2 \dots 1,5) d_{п}$$

3. Габаритный диаметр первого элемента:

$$d_{г1} = d_{1св} + (1 \dots 2) \text{ мм}$$

Габаритный диаметр всегда больше светового из-за фасок и необходимости крепления оптических деталей.

Окончательное значение габаритного диаметра первого элемента выбирается ближайшее большее из значений стандартного ряда линейных размеров. (ГОСТ 6636-69)

4. Фокусные расстояния.

Для того чтобы оптические поверхности не были слишком крутыми, фокусные расстояния выбирают из соотношения:

$$f_1 \geq 2,5d_{e1};$$
$$f_2 = f_1 \Gamma^x$$

5. Нахождение габаритного размера второго элемента

Световой диаметр второго элемента телескопа:

$$d_{св2} = \Gamma^x d_{1св};$$

Габаритный диаметр второго элемента телескопа:

$$d_{e2} = d_{св2} + (1 \div 2) \text{ мм}$$

Окончательно за значение габаритного диаметра выбирается ближайшее равное или большее значение из стандартного ряда, определяемого по ГОСТ 66636-69 Линейные размеры.

6. Произвести расчет радиусов сферических поверхностей линз (для телескопа Галилея) или зеркал (для телескопа Кассегрена).

Толщины оптических деталей можно выбрать из условия:

$$\Delta = d/4 \dots d/7 \text{ при } d \leq 100 \text{ мм}; \quad \Delta = d/7 \dots d/12 \text{ при } d > 100 \text{ мм};$$

6.1 Для телескопа Галилея:

Радиусы поверхностей линз необходимо рассчитать по формуле

$$1/f = (n-1)(1/r_1 - 1/r_2) + \Delta(n-1)^2 / (n \times r_1 \times r_2)$$

При условии, чтобы r_1 / r_2 было около 1/6 для компенсации сферической аберрации.

6.2 Для телескопа Кассегрена фокусные расстояния зеркал: $f = r/2$

Полученные в результате расчета радиусы скорректировать в соответствии с

ГОСТ 1807-75 Радиусы сферических поверхностей.

7. Нахождение K_λ – спектрального коэффициента пропускания передающей оптической системы.

Для телескопа Галилея пропускание рассчитывается в предположении отсутствия поглощения материалом линз. В этом случае потери обусловлены остаточным отражением от просветленных поверхностей r_λ .

$$K_\lambda = T^4,$$

где:

$$T = 1 - r_\lambda;$$

Для длин волн видимого диапазона значение остаточного отражения можно принять равным: $r_\lambda = 0,005$.

Для телескопа Кассегрена спектральный коэффициент пропускания передающей оптической системы определяется потерями при отражении от зеркал и потерями за счет затенения части апертуры малым зеркалом:

$$K_\lambda = r^2(d_{e2}^2 - d_{e1}^2) / d_{e2}^2,$$

где r - коэффициент отражения от одной зеркальной поверхности.

Коэффициенты отражения от зеркальных поверхностей находятся по спектрам отражения соответствующих материалов, приведенных в Приложении 3

III. Расчет мертвой зоны лидара.

Для расчета мертвой зоны лидара необходимо первоначально найти расстояние между главными оптическими осями приемного и передающего телескопов:

$h \geq D_s/2 + d_{e2}/2 + \Delta$, где Δ – промежуток между телескопами, необходимый для размещения элементов корпусов телескопов и их крепления. Можно принять:

$$\Delta = (20 \div 50) \text{ мм.}$$

Из достаточно простых геометрических построений для случая параллельности главных оптических осей телескопов и считая угол расходимости и апертурный угол приемного телескопа малыми (углы, меньшие 10^0 для приближенных расчетов считают малыми и для них принимают $\sin(\alpha) \approx \text{tg}(\alpha) \approx \alpha$), длина мертвой зоны может быть найдена :

$$L_{M3} = 2h / (2\theta_s + 2\theta_L).$$

IV. Лидарное уравнение и его решение.

Для метода ДПР составляются лидарные уравнения для каждой длины волны:

$$P_{\lambda_1} = \frac{K_{\lambda} P_{0\lambda_1} L_p A \beta}{R^2} \exp(-2(\alpha_1^A R + \sigma_{\lambda_1} N L_p));$$

$$P_{\lambda_2} = \frac{K_{\lambda} P_{0\lambda_2} L_p A \beta}{R^2} \exp(-2(\alpha_2^A R + \sigma_{\lambda_2} N L_p));$$

где:

- K_{λ} - спектральное пропускание оптической системы;
- $P_{0\lambda_i}$ - начальная импульсная мощность зондирующего сигнала на i -й длине волны;
- L_p - ширина зоны атмосферного загрязнения;
- A - площадь приемного телескопа;
- β - лидарное отношение;
- α_i^A - показатель ослабления сигнала за счет аэрозольного рассеяния на i -й длине волны;
- σ_{λ_i} - сечение поглощения озоном излучения на i -й длине волны;
- N - концентрация озона;
- R - текущее значение дистанции.

V. Нахождение отношения мощности сигналов на дистанции R

$$\rho = \frac{P_{\lambda_1}}{P_{\lambda_2}}.$$

Подставляя выражения для мощностей принимаемых сигналов получаем:

$$\rho = \frac{P_{0\lambda_1}}{P_{0\lambda_2}} \exp(-2[(\alpha_1^A - \alpha_2^A)R + (\sigma_{\lambda_1} - \sigma_{\lambda_2})NL_p]).$$

Для нахождения начальной импульсной мощности необходимо энергию зондирующего импульса на соответствующей длине волны разделить на длительность импульса:

$$P_{0\lambda_i} = \frac{E_{0\lambda_i}}{\tau};$$

показатель ослабления аэрозольного рассеяния:

$$\alpha_i^A = \frac{3.91}{R_V} \left(\frac{550}{\lambda_i} \right)^q [\text{км}^{-1}],$$

где: $q=0.585R_V^{1/3}$ для метеорологической дальности видности $R_V < 6$ км, и $q=1.31$ для $R_V \geq 6$ км.

Значения сечения поглощения определяются по графику спектра поглощения озона.

Концентрация озона определяется из соотношения:

$N=N_{\text{ПДК}}*n$; где n – число превышений предельно допустимой концентрации, определяемое по табл.2.

$$N_{\text{ПДК}} = \frac{N_A C_{\text{ПДК}}}{44,6M} [\text{м}^{-3}],$$

где: N_A - число Авогадро; $N_A = 6,02 \times 10^{23}$;

$C_{\text{ПДК}}$ - предельно допустимая концентрация озона (0,16 мг/м³ - максимальная разовая и 0,03 мг/м³ - среднесуточная); M - молярная масса озона. Дистанция, при которой производится расчет отношения сигналов равна сумме дистанции мертвой зоны и ширины зоны загрязнения:

$$R = L_{\text{мз}} + L_p$$

VI. Расчет максимальной дальности зондирования.

Для расчета максимальной дальности зондирования выбранным лидаром атмосферного загрязнения необходимо воспользоваться методом последовательных приближений (методом половинного деления).

Минимальная регистрируемая лидаром мощность полезного сигнала определяется чувствительностью приемной аппаратуры, мощностью фонового излучения и отношением сигнал/шум, при котором возможно распознавание полезного сигнала на фоне помех. В настоящей курсовой работе расчет производится в предположении, что чувствительность системы достаточно высока и прием полезного сигнала ограничен исключительно мощностью фонового излучения.

Мощность фонового излучения:

$$P_F = M_F \times 2\theta_s \times \Delta\lambda \times A_s;$$

где:

M_F - спектральная яркость фона;

$2\theta_s$ - угловая апертура приемного телескопа;

$\Delta\lambda$ - ширина спектра пропускания приемного канала лидара;

A_s - площадь приемного телескопа $A_s = \pi D_s^2 / 4$.

Минимальная мощность принимаемого излучения может быть найдена через отношение сигнал/шум:

$$P_{\text{min}} = \xi P_F.$$

Для определения максимальной дальности зондирования необходимо решить нелинейное уравнение:

$$P(R) = P_{\text{min}},$$

$$\text{где: } P(R) = \frac{K_\lambda P_0 A_s L_p \beta}{R^2} \exp(-2\sigma N L_p) \exp(-2\alpha^A R)$$

-мощность принимаемого полезного сигнала, которую можно представить в более простом виде:

$$P(R) = C \frac{\exp(-2\alpha^A R)}{R^2}.$$

В последнем уравнении все величины, не меняющие своего значения в данном расчете, учтены в виде константы

$$C = K_{\lambda} P_0 A_s L_p \beta \exp(-2\sigma N L_p).$$

В том случае, если аналитическое решение уравнения вызывает трудности, можно применить метод приближенного вычисления.

Для этого необходимо найти такое значение R , для которого будет выполняться условие:

$$P(R) = P_{\min} \pm \Delta P \quad (1)$$

Это значение дистанции R и принимается за максимальную дальность зондирования R_{\max} . Для приближенного расчета выберем $\Delta P = 0,1 P_{\min}$

В качестве первого приближения дистанции R_1 можно выбрать значение:

$$R_1 = (5 \dots 10) L_{\text{мз}}$$

Для этого значения дистанции производится расчет принимаемой мощности и проверяется условие (1).

Если условие выполняется, расчет прекращается и принимается $R_{\max} = R_1$.

В случае, если условие не выполняется, возможны два варианта:

$$P(R) \gg P_{\min} \pm \Delta P; \quad (2)$$

$$P(R) \ll P_{\min} \pm \Delta P \quad (3)$$

При выполнении условия (2) выбирается новое значение дистанции $R_2 = 2 \cdot R_1$ и повторяется процедура вычислений и сравнения с граничным условием (1).

В том случае, если вновь выполнится условие (2), дистанция на каждом шаге вычислений удваивается до тех пор, пока не выполнится условие (3).

Если на i -м шаге вычисления выполнилось условие (3), то следующее значение дистанции выбирают из условия $R_{i+1} = (R_i + R_{i-1})/2$.

При дальнейших вычислениях производят последовательное деление пополам интервалов дистанции, внутри которых находится

решение. При выполнении условия (1) вычисления прекращают и в качестве решения используют последнее значение дистанции.

$$P(R_k) = P_{\min} \pm \Delta P; \quad R_k = R_{\max}$$

По окончании всех вычислений производят оформление пояснительной записки к курсовой работе, в которой представляют все полученные результаты.

Библиографический список

Основной:

1. Дистанционное зондирование Земли : учебное пособие / под ред. В.М. Владимирова ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Сибирский Федеральный университет. - Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2014. - 196 с. : табл., схем. - Библиогр. в кн. - ISBN 978-5-7638-3084-2 ; -

URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=364521>

2. *Скворцов, Л.А.* Лазерные методы дистанционного обнаружения химических соединений на поверхности тел : монография / Л.А. Скворцов. - Москва : Техносфера, 2014. - 208 с. : ил., схем., табл. - (Мир физики и техники).

Дополнительный:

3. *Межерис, Раймонд М.* Лазерное дистанционное зондирование/ Р.Межерис; пер. с англ.:И.Г.Городецкого,В.В.Филюшкина под ред. А.Б.Карасева.-М.:Мир,1987. — 550 с.

4. *Агапов, Н.А.* Прикладная оптика: учебное пособие / Н.А. Агапов. — Электрон. дан. — Томск: ТПУ, 2017. — 286 с.

5. *Юрчук, С.Ю.* Приборы квантовой и оптической электроники : курс лекций [Электронный ресурс] : учебное пособие / С.Ю. Юрчук, М.Н. Орлова, И.В. Борзых, И.В. Щемеров. — Электрон. дан. — Москва : МИСИС, 2016. — 118 с.

6. *Зуев В.Е.* Прозрачность атмосферы для видимых и инфракрасных лучей. —из-во Советское Радио, 1966г.;- 186 с.

7. *Мицель А.А., Пономарев Ю.Н.* Оптические модели молекулярной атмосферы для лазерного излучения/отв. Ред. С.Д. Творогов;АН СССР, Сиб. отд-ние Ин-т оптики атмосферы.-Новосибирск: Наука. Сиб отделение, 1988 – 126 с

Функциональные схемы лидаров

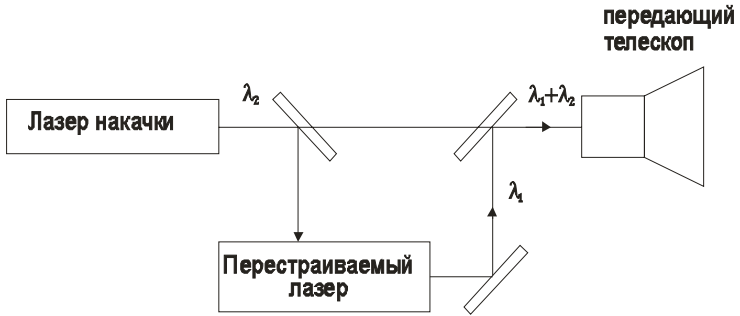


Рис.1 - Функциональная схема лидара с одним перестраиваемым лазером.

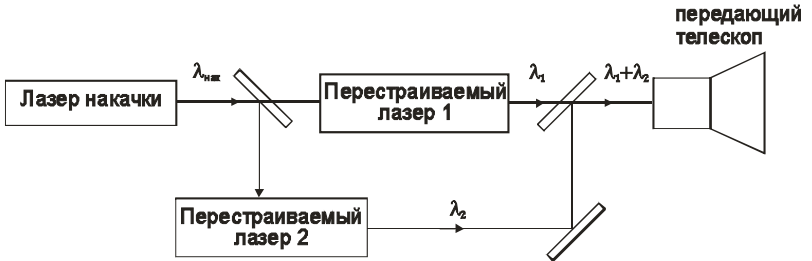
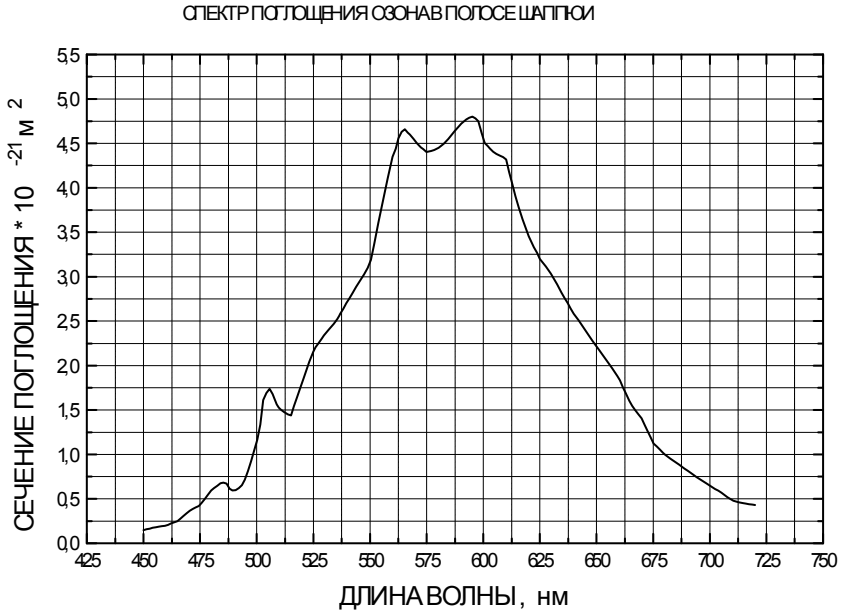


Рис.2 - Функциональная схема лидара с двумя перестраиваемыми лазерами

Спектр поглощения озона



ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Коэффициенты отражения металлических покрытий

Материал	Длина волны, нм	Коэффициент отражения %
Алюминий Al	220	91.8
	260	92.0
	300	92.1
	340	92.3
	380	92.6
	436	92.7
	492	92.2
	546	91.6
	650	90.7
	700	88.8
	800	86.4
Серебро Ag	950	91.2
	400	93.9
	500	97.9
	600	98.4
	700	98.7
	800	98.9
	950	99.1
	2000	99.1
Золото Au	4000	99.1
	450	39.7
	500	50.4
	550	81.5
	600	91.4
	700	96.7
	800	97.4
	900	97.8
1000	98.1	

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Рекомендуемые марки стекол для линз телескопа

Марка стекла	Показатель прелом- ления		Средняя дисперсия		Коэффициент дис- персии	
	n_e	n_D	$n_F' - n_C'$	$n_F - n_C$	γ_e	γ_D
ЛК 3	1,4891	1,4874	0,00700	0,00696	69,87	70,02
ЛК4	1,4922	1,4903	0,00758	0,00753	64,93	65,11
ЛК7	1,4846	1,4828	0,00732	0,00728	66,20	66,31
ЛК6	1,4721	1,4704	0,00708	0,00704	66,69	66,81
ФК14	1,5821	1,5799	0,00898	0,00891	64,82	65,08
К8	1,5183	1,5163	0,00812	0,00806	63,83	64,05
К14	1,5168	1,5147	0,00856	0,00849	60,38	60,62
К19	1,5208	1,5187	0,00848	0,00841	61,41	61,67
ТК2	1,5749	1,5724	0,01005	0,00996	57,20	57,46
ТК4	1,6138	1,6111	0,01105	0,01095	55,55	55,81
ТК8	1,6168	1,6140	0,01125	0,01114	54,82	55,11
ЛФ10	1,5509	1,5480	0,01209	0,01195	45,57	45,85
Ф1	1,6169	1,6128	0,01681	0,01659	36,70	36,93
Ф4	1,6285	1,6242	0,01762	0,01738	35,67	35,91
Ф13	1,6241	1,6199	0,01730	0,01706	36,07	36,33
ТФ1	1,6522	1,6475	0,01940	0,01912	33,62	33,86
ТФ2	1,6776	1,6725	0,02118	0,02087	31,99	32,22
ТФ3	1,7232	1,7172	0,02469	0,02431	29,29	29,50
ТФ4	1,7462	1,7398	0,02670	0,02628	27,95	28,15
СТФ3	2,1863	-	0,07022	-	16,89	-

Длина волны, нм	Обозначение	Хим.элемент
546	e	Hg
589,3	D	Na
480	F'	Cd
486,1	F	H
643,8	C'	Cd
656,2	C	H

**ЛАЗЕРНЫЙ ДИСТАНЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ
РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЛИДАРА ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ
АТМОСФЕРНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ МЕТОДОМ ДПР**

*Методические указания к курсовой работе
для студентов бакалавриата направления 12.03.01*

Сост. *С.Е. Парахуда*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой
метрологии, приборостроения и управления качеством

Ответственный за выпуск *С.Е. Парахуда*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 26.04.2021. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 1,4. Усл.кр.-отт. 1,4. Уч.-изд.л. 1,2. Тираж 75 экз. Заказ 365.

Санкт-Петербургский горный университет
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2