

В.А.Соломатин

Методические указания к выполнению расчетных заданий
по курсу « Лидары и сканеры»

Москва
Издательство МИИГАиК

2015

УДК 528.5

Рецензенты

Кафедра оптико-электронных систем и дистанционного зондирования
Томского государственного университета НИ ТГУ

Зав.кафедрой конструирования и метрологии МИИГАиК
Проф. Парвулюсов Ю.Б.

Соломатин В.А.

Методические указания к выполнению расчетных заданий по курсу
«Лидары и сканеры». Учебное пособие. – М.: Изд-во МИИГАиК, 2015.-

ISBN 978-5-94275-754-0

Пособие предназначено для студентов факультета оптико-информационных систем и технологий. Содержит формулировку целей выполняемых расчетов, краткие теоретические сведения, порядок расчетов, справочные данные и требования к содержанию отчета по каждому заданию.

УДК 528.5

ISBN 978-5-94275-754-0

В.А.Соломатин
Издательство МИИГАиК, 2015

Содержание

Расчетное задание №1 Энергетический расчет атмосферного аэрозольного лидара

Расчетное задание №2 Расчет пороговых параметров мультиспектрального pushbroom –сканера

Расчетное задание № 3 Расчет точности наземного лазерного сканера

Энергетический расчет атмосферного аэрозольного лидара

Цель расчетного задания : изучение методики расчета параметров наземного атмосферного лидара, предназначенного для измерения концентрации аэрозоля в атмосфере.

Распределение аэрозолей в атмосфере по высоте таково, что максимум концентрации приходится на приземный слой, а затем с увеличением высоты содержание аэрозоля убывает в среднем по экспоненциальному закону до 5–6 км. Выше этих высот оптические свойства атмосферы не зависят от изменения концентрации аэрозоля приземного слоя. При этом прозрачность этого пятикилометрового нижнего слоя, составляя около 80 % от вертикальной прозрачности всей толщи атмосферы, испытывает довольно большие изменения в зависимости от конкретных метеоусловий в данной местности.

Таким образом, для определения аэрозольного профиля необходим лидар, максимальный радиус действия которого составляет не менее 5 км. Свыше этого расстояния оптические свойства атмосферы можно рассчитать из таблиц стандартной атмосферы, конкретный вид которых выбирается на основе измерений прозрачности атмосферы на высотах 2–3 км.

Содержанием расчета является определение основных параметров лидара, при которых обеспечивается заданная дальность действия, и исследование зависимости отношения сигнал/шум и дальности действия от параметров конструкции лидара.

Принципиальная схема лидара приведена на рис. 1

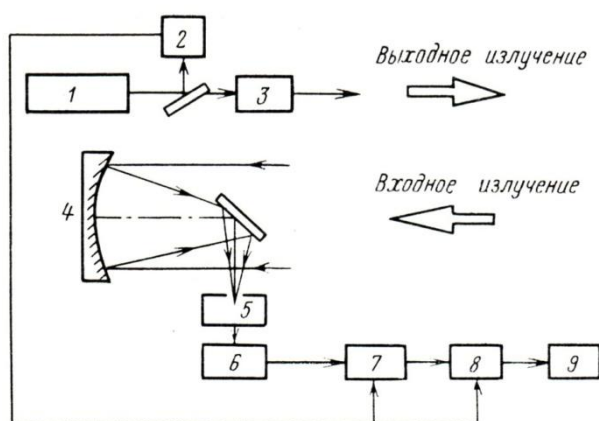


Рис. 1. Принципиальная схема лидара:

1 – лазер, 2 – блок контроля входного излучения, 3 – передающая оптическая система, 4 – приемная оптическая система, 5 – спектроанализатор, 6 – приемник излучения, 7 – усилительно-преобразующий электронный тракт, 8 – процессор, 9 – выходное устройство.

Излучение лазера формируется передающей оптической системой, которая наиболее часто коллимирует выходной пучок, минимизируя его расходимость. В атмосферных лидарах коллимирование может отсутствовать при использовании лазеров с малой угловой расходимостью излучения. Часть лазерного излучения отводится полупрозрачным зеркалом на блок контроля выходного излучения, связанного с усилительно-преобразующим электронным трактом и процессором. Блок контроля выходного излучения задает начало отсчета времени и используется для калибровки интенсивности импульса, необходимой для проведения количественной интерпретации данных. В ряде случаев, когда длина волны выходного излучения перестраивается, блок контроля выходного излучения выполняет функции измерения и контроля длины волны излучения. Отраженное от объекта исследования излучение собирается приемной оптической системой и поступает в спектроанализатор, предназначенный для выделения рабочего спектрального диапазона, в котором производятся измерения. Одновременно спектроанализатор подавляет фоновое излучение (помеху), т. е. он осуществляет спектральную фильтрацию сигнала. Сигнал с выхода приемника излучения усиливается, фильтруется и обрабатывается в цифровой или аналоговой форме. Выходным устройством может быть, например, дисплей.

Поток излучения на длине волны λ , падающий во входной зрачок приемной системы лидара вследствие обратного атмосферного рассеяния на участке длиной Δl определяется как

$$\Phi_{ex\lambda}(l) = \frac{\Phi_{0\lambda} \beta_{\lambda}(l) \Delta l \tau_{\lambda}^2(l) A_{ex}}{l^2}, \quad \text{где}$$

$\Phi_{0\lambda}$ — поток излучения выходящий из передающей оптической системы, $\beta_{\lambda}(l)$ — коэффициент обратного объемного рассеяния, $\tau_{\lambda}(l)$ — пропускание атмосферы на заданной трассе, A_{ex} — площадь входного зрачка приемной оптической системы, l — текущее расстояние (дальность).

Если длительность импульса лидара равна t_c , то пространственная длина этого импульса будет $t_c c$, c — скорость света. Пространственное разрешение, даваемое одиночным сигналом, определяется половиной длины импульса $t_c c/2$. При приеме сигнала обычно используют накопление (интегрирование) в течение t_n , тогда пространственное разрешение будет несколько хуже и определяется величиной $\Delta l = t_n c/2$.

Работа лидара сопровождается действием внешних и внутренних помех. Основной внешней помехой является фоновое излучение – рассеянное атмосферой излучение Солнца. Внутренние помехи связаны, прежде всего, с шумами приемника излучения. Допустим, что солнечное излучение равномерно рассеивается по небосводу (в телесном угле 2π). Тогда фоновая облученность, создаваемая рассеянным излучением Солнца на входном зрачке приемной системы лидара, равна

$$E_{\phi} = E_{\phi\lambda} \Delta\lambda,$$

где $E_{\phi\lambda}$ - спектральная плотность энергетической облученности на длине волны λ , $\Delta\lambda$ – полоса пропускания (спектральный диапазон работы лидара). Поток излучения от фоновой засветки, попадающий во входной зрачок

$$\Phi_{\phi} = \frac{E_{\phi} A_{\text{вх}}}{\pi f'^2} q,$$

где q – площадь диафрагмы поля приемной оптической системы, q/f'^2 -

угловое поле приемной оптической системы лидара.

Пороговый поток лидара , ограниченный шумами приемника излучения, определяется как

$$\Phi_{n \text{ оэс}} = \frac{\sqrt{A_{nu} \Delta f}}{D^* \tau_0},$$

где A_{nu} - площадь чувствительной площадки приемника излучения, Δf – шумовая полоса частот схемы включения приемника излучения, D^* - удельная обнаружительная способность приемника излучения τ_0 - коэффициент пропускания приемной оптической системы, учитывающий потери при прохождении излучения через нее.

Параметром , определяющим работоспособность лидара с точки зрения энергетики, является отношение сигнал/шум μ .

При учете внешних и внутренних шумов в рамках принятых допущений

$$\mu = \frac{\Phi_{\text{вх}\lambda}(l)}{\Phi_{\phi} + \Phi_{n \text{ оэс}}}$$

При подстановке в это соотношение развернутых выражений для $\Phi_{\text{вх}\lambda}(l)$, Φ_{ϕ} и $\Phi_{n \text{ оэс}}$ можно получить уравнение , связывающее параметры лидара и условия зондирования. На основании этого уравнения могут быть рассчитаны параметры лидара и определена дальность его действия.

Исходными данными для расчета являются следующие.

Параметры лазера:

Длина волны излучения λ

Длительность импульса t_c

Энергия импульса $W_{\text{и}}$

Расходимость излучения θ

Параметры оптической системы:

Диаметр входного зрачка объектива приемной системы $D_{\text{вх}}$

Фокусное расстояние объектива f'

Диаметр диафрагмы поля d

Полоса пропускания $\Delta\lambda$

Коэффициент пропускания τ_0

Параметры приемника излучения:

Удельная обнаружительная способность D^* , определенная по эталонному излучателю

Площадь чувствительной площадки $A_{\text{ли}}$

Параметры атмосферы:

Метеорологическая дальность видимости l_m

Спектральный коэффициент рассеяния на рабочей длине волны λ .

Требуемая минимальная дальность действия l .

Порядок расчета

1. Составить развернутое выражение для отношения сигнал/шум μ .
2. Рассчитать значения $\Phi_{\text{вх}\lambda}(l)$, $\Phi_{\text{ф}}$ и $\Phi_{\text{н оэс}}$ и μ , учитывая следующее:

- зондирование производится в зенит,
- пропускание атмосферы на вертикальной трассе в видимой области спектра может быть рассчитано по закону Бугера как

$$\tau_{\lambda} = \exp(-\alpha_{\lambda p} l),$$

где $\alpha_{\lambda p}$ - спектральный монохроматический коэффициент аэрозольного рассеяния, связанный с метеорологической дальностью видимости соотношением: $l_m = 3.912 / \alpha_{\lambda p}$.

- коэффициент обратного объемного рассеяния β_{λ} для типичных распределений аэрозоля находится в пределах

$$0.01 \text{ ср}^{-1} \leq \beta_{\lambda} / \alpha_{\lambda p} \leq 0.10 \text{ ср}^{-1},$$

- удельную обнаружительную способность приемника излучения D^* , определенную по эталонному излучателю, необходимо пересчитать к монохроматическому потоку излучения с заданной длиной волны,

- шумовая полоса частот схемы включения приемника излучения может быть принята равной $\Delta f = 1 / t_c$.

3. Рассчитать и построить графическую зависимость параметра μ от расстояния зондирования l . Определить по графику максимальную дальность действия лидара l_m .

4. Исследовать зависимости параметра μ от диаметра входного зрачка объектива приемной системы $D_{\text{вх}}$, углового поля приемной оптической системы и порогового потока лидара $\Phi_{\text{н оэс}}$. Построить соответствующие графики.

Содержание отчета: расчетные формулы, результаты расчетов, графики.

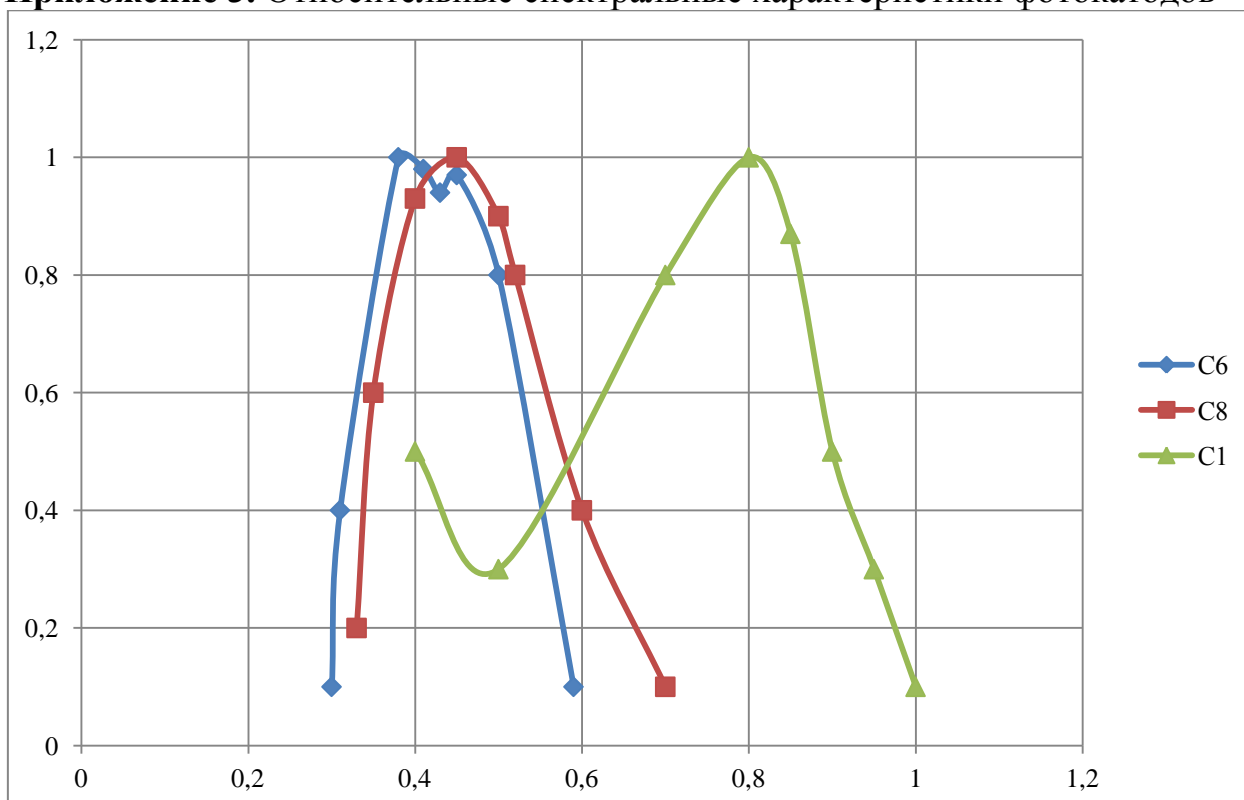
Приложение 1. Параметры фотоэлектронных умножителей

Тип прибора	Диаметр фотокатода, мм	Тип спектральной характеристики	Пороговый поток в единичной полосе частот, $\text{лм} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$
ФЭУ-86	10	С6	$5 \cdot 10^{-11}$
ФЭУ-112	5	С1	$5 \cdot 10^{-11}$
ФЭУ-114	10	С8	$3 \cdot 10^{-12}$
ФЭУ-115	25	С8	$2 \cdot 10^{-12}$

Приложение 2. Коэффициенты использования излучения черного тела с температурой $T = 2850\text{K}$.

Тип спектральной характеристики, отн. ед.	Коэффициент использования
С1	0.1
С6	0.015
С8	0.017
Спектральная характеристика глаза	0.02

Приложение 3. Относительные спектральные характеристики фотокатодов



Расчет пороговых параметров мультиспектрального pushbroom –сканера

Целью расчетного задания является изучение методики расчета пороговых шумовых параметров бортовых многоспектральных сканеров, в которых используются ПЗС. Общая схема получения данных сканером, установленным на борту космического летательного аппарата приведена на рис.1.

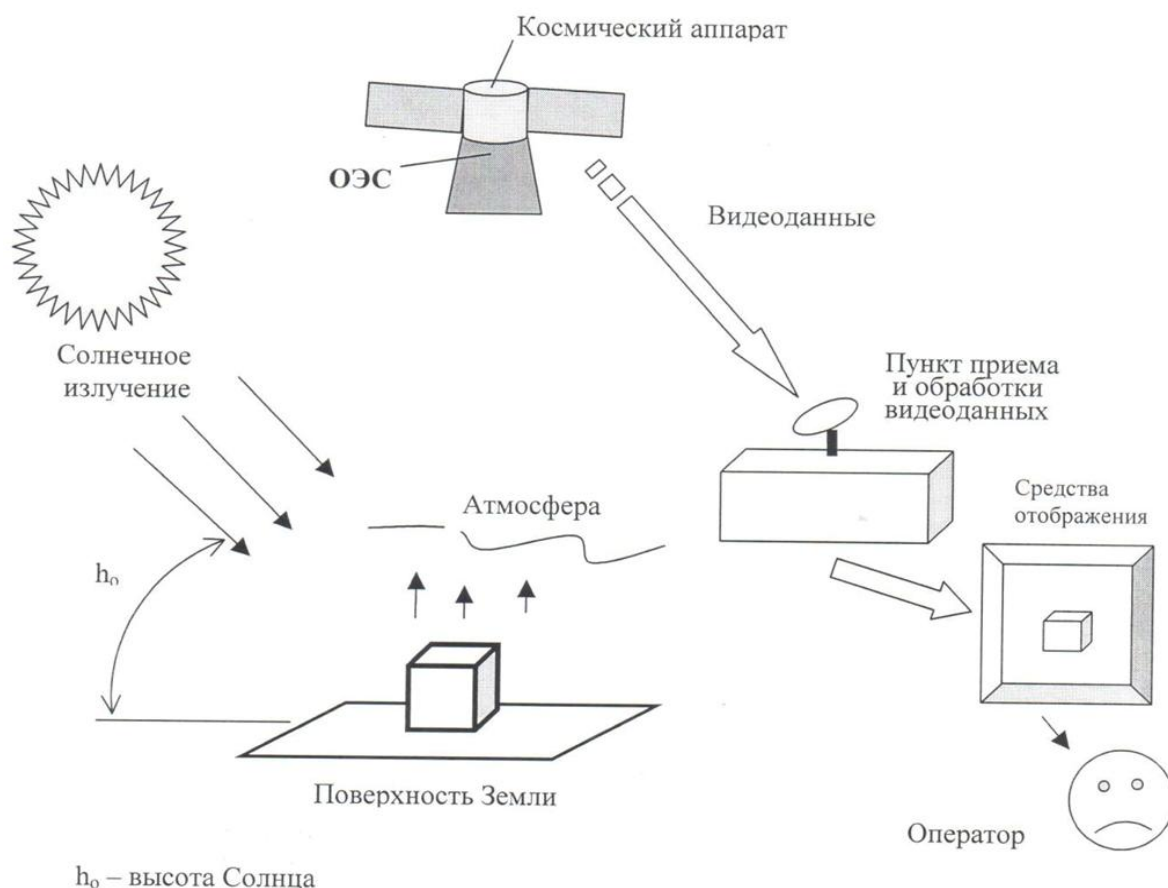


Рис.1. Схема получения данных сканером.

В современных съемочных бортовых оптико-электронных системах с высоким пространственным разрешением используется технология pushbroom, предполагающая фотоэлектронное сканирование с использованием многоэлементных приемников излучения, наиболее часто – ПЗС. Линейка приемников располагается перпендикулярно направлению полета (рис.2,а). Кадр строится построчным сканированием, при этом могут использоваться как линейки, так и матрицы приемников излучения. При

использовании длиннофокусных объективов, необходимых для получения высокого пространственного разрешения, для обеспечения достаточно широкого углового поля требуются линейки приемников с весьма большим числом элементов. Когда оказывается, что одна линейка или матрица не позволяет перекрыть требуемое угловое поле, используют стыковку приемников излучения в фокальной плоскости. Для исключения разрывов между строками матрицы или линейки приемников располагают в два ряда с перекрытием зон сканирования (рис.2, б). Сшивка строк осуществляется с использованием соответствующих процедур при цифровой обработке изображения. Для увеличения отношения сигнал/ шум используются матрицы приемников излучения, работающие в режиме задержки и интегрирования сигнала (рис.2, в).

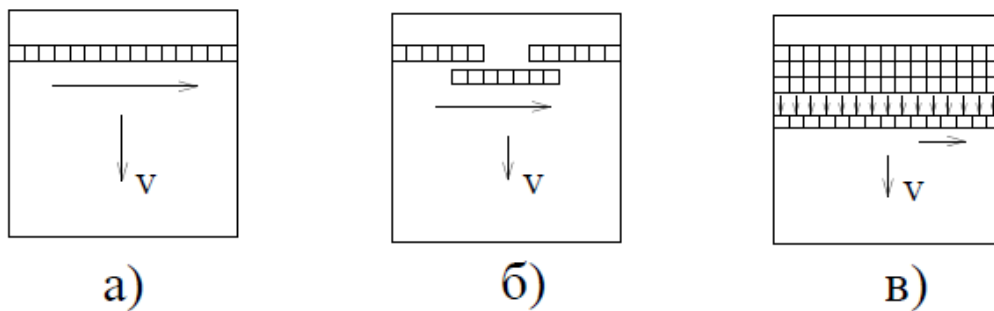


Рис.2. Схемы фотоэлектронного сканирования (технология pushbroom):
а)– строчное, б) – со сшивкой строк, в) – с временной задержкой и интегрированием

Пороговые параметры и характеристики сканера (пороговый поток, пороговая облученность, пороговый контраст и другие) определяются энергетическими соотношениями между полезным сигналом и шумом, которые, в свою очередь, зависят от параметров конструкции сканера (параметров объектива, приемника излучения, режима сканирования), внешних условий работы (уровень фона, пропускание атмосферы) и параметрами сканируемых объектов (условия освещения, тип поверхности).

Содержанием расчета является определение пороговых (минимальных) значений освещенности и соответствующего потока излучения, попадающего на одиночный пиксель ПЗС, при которых обеспечивается заданное отношение сигнал/шум в диапазоне линейности энергетической характеристики, а также рабочего диапазона облученности объекта сканирования.

Отношением сигнал/шум (S/N), измеряемое в децибелах, определяется как

$$S/N = 20 \lg \left(\frac{u_c}{\sqrt{\bar{u}_{ш}^2}} \right),$$

или

$$\mu = 10^{S/N/20} \text{ крат,}$$

где u_c - уровень видеосигнала, $\sqrt{\bar{u}_{\text{ш}}^2}$ - среднеквадратическое значение шума. Уровни сигнала и шума и отношение сигнал/шум можно выразить через соответствующие числа сигнальных n_c и шумовых $n_{\text{ш}}$ электронов, создающих зарядовый пакет в ПЗС:

$$\mu = \frac{n_c}{n_{\text{ш}}} = \frac{n_c}{\sqrt{n_{\text{вн ш}}^2 + n_{\text{фш}}^2}}$$

Внутренние (собственные) шумы ПЗС $n_{\text{вн ш}}$ определяются многими факторами: это тепловые шумы в полупроводнике, шумы переноса зарядов, шумы выходного устройства - преобразования пакетового заряда в напряжение на выходе ПЗС и другие. Практически для всех современных высококачественных ПЗС, широко используемых в промышленном и прикладном телевидении, количество шумовых электронов составляет (15 - 25). Это количество определяется, в основном, типичной для всех кристаллов ПЗС, техникой исполнения выходного устройства, в котором происходит преобразования заряда пикселя в напряжение. Внешние шумы (фотонный шум) являются следствием дискретной природы и подчиняются закону Пуассона (статистике). Число шумовых электронов $n_{\text{фш}}$ также следует этой статистике, и согласно ей, фотонный шум равен квадратному корню из числа сигнальных электронов. Таким образом, при $n_{\text{фш}}^2 \gg n_{\text{вн ш}}^2$, $n_{\text{фш}} = \sqrt{n_c}$ и отношение сигнал/шум будет равно корню квадратному из числа сигнальных фотонов:

$$\mu = \sqrt{n_c}.$$

Число электронов, образующих зарядовый пакет за цикл накопления на элементе (пикселе) ПЗС на длине волны λ , определяется как

$$n_\lambda = \frac{E_\lambda A_{\text{пик}} t_n}{W_\lambda} \eta_\lambda,$$

где E_λ - спектральная облученность пикселя (здесь и далее используются энергетические величины, взятые в узком спектральном диапазоне $\Delta\lambda$, при этом $E_\lambda = E_{e\lambda} \Delta\lambda$, $E_{e\lambda}$ - спектральная плотность энергетической облученности) $A_{\text{пик}}$ - площадь пикселя, t_n - время накопления, $W_\lambda = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ - энергия фотона на длине волны λ , η_λ - квантовый выход ПЗС, $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·сек - постоянная Планка.

Если положить в этой формуле число электронов n_λ равным шумовому числу $n_{\lambda ш}$, то соответствующая облученность пикселя будет равна пороговой величине:

$$E_{ш\lambda} = \frac{W_\lambda n_{\lambda ш}}{A_{nu} t_n \eta_\lambda}.$$

Известно, что спектральная облученность ПЗС определяется соотношением:

$$E_\lambda = \frac{E_{об\lambda} r_\lambda \tau_{ол} \tau_{ал}}{4} \left(\frac{D}{f'}\right)^2,$$

где $E_{об\lambda}$ - спектральная облученность объекта, r_λ - спектральный коэффициент отражения объекта, $\tau_{ол}$ - спектральное пропускание оптической системы, $\tau_{ал}$ - спектральное пропускание атмосферы, $\frac{D}{f'}$ - относительное отверстие объектива.

Полагая $E_{об\lambda} = E_{п\lambda}$, получим значение пороговой облученности объекта, при которой сигнал пикселя равен шуму :

$$E_{п\lambda}^{об} = \frac{4W_\lambda n_{\lambda ш}}{A_{nu} t_n \eta_\lambda r_\lambda \tau_{ол} \tau_{ал} \left(\frac{D}{f'}\right)^2} = \frac{4 E_{ш\lambda}}{r_\lambda \tau_{ол} \tau_{ал} \left(\frac{D}{f'}\right)^2}.$$

Максимальная спектральная облученность объекта в диапазоне линейности энергетической характеристики равна:

$$E_{\lambda max}^{об} = \frac{4W_\lambda n_{\lambda с}}{A_{nu} t_n \eta_\lambda r_\lambda \tau_{ол} \tau_{ал} \left(\frac{D}{f'}\right)^2} = E_{п\lambda}^{об} \mu.$$

Исходными данными для расчета являются следующие.

Параметры ПЗС:

Спектральная характеристика s_λ , отн. ед.

Отношением сигнал/шум (S/N), дБ

Размеры пикселя, мкм x мкм

Квантовый выход η_λ на рабочих длинах волн

Время накопления сигнала t_n

Параметры оптической системы:Относительное отверстие D/f' , объективаСпектральные диапазоны работы сканера $\Delta\lambda$ Коэффициенты пропускания в заданных спектральных диапазонах $\tau_{o\lambda}$ **Параметры объекта:**Спектральный коэффициент отражения r_λ Спектральное пропускание атмосферы $\tau_{a\lambda}$ **Порядок расчета.**

1. Рассчитать отношение сигнал/шум μ .
2. Рассчитать число сигнальных и шумовых электронов в зарядовом пакете.
3. Рассчитать пороговую облученность пикселя ПЗС $E_{ш\lambda} = E_{п\lambda}$ в заданных спектральных диапазонах работы сканера.
4. Рассчитать пороговую облученность объекта в заданных спектральных диапазонах сканера $E_{п\lambda}^{об}$.
5. Рассчитать максимальную спектральную облученность объекта в диапазоне линейности энергетической характеристики в заданных спектральных диапазонах работы сканера $E_{\lambda max}^{об}$.
6. Пересчитать полученные значения $E_{п\lambda}^{об}$ и $E_{\lambda max}^{об}$ в соответствующие фотометрические величины $E_{п\nu}^{об}$ и $E_{\nu max}^{об}$, определяющие пороговый и максимальный уровни естественного солнечного освещения объекта.
7. Заполнить таблицу

Спектральный диапазон, мкм	$\lambda_1 - \lambda_2$	$\lambda_3 - \lambda_4$	$\lambda_5 - \lambda_6$	$\lambda_7 - \lambda_8$
Средняя длина волны диапазона				
$E_{ш\lambda}, \text{Вт}/\text{м}^2$				
$E_{п\lambda}^{об}, \text{Вт}/\text{м}^2$				
$E_{\lambda max}^{об}, \text{Вт}/\text{м}^2$				
$E_{п\nu}^{об}, \text{ЛК}$				
$E_{\nu max}^{об}, \text{ЛК}$				

Приложение 1. Квантовый выход и относительная спектральная характеристика ПЗС

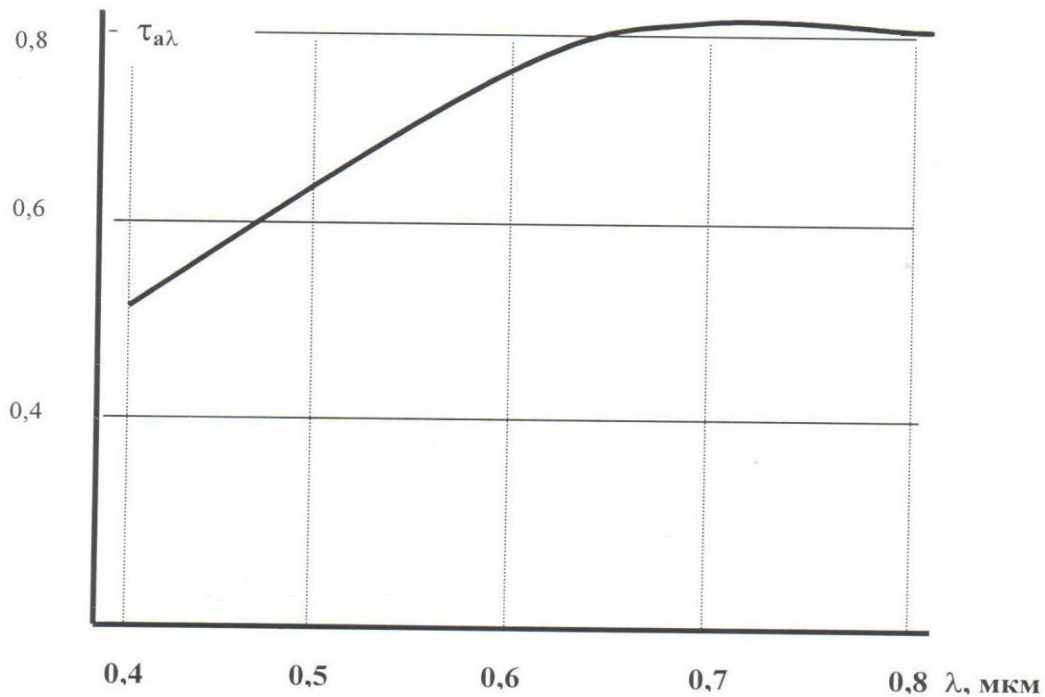
λ, MKM	η_λ	S_λ	λ, MKM	η_λ	S_λ
0.390	-	-	0.730	0.21500	0.64114
0.400	0.34000	0.55556	0.740	0.20000	0.60458
0.410	0.39400	0.65989	0.750	0.18500	0.56679
0.420	0.39000	0.66912	0.760	0.18000	0.55882
0.430	0.39500	0.69383	0.770	0.16000	0.50327
0.440	0.42000	0.75490	0.780	0.15000	0.47794
0.450	0.44500	0.81801	0.790	0.14000	0.45180
0.460	0.46500	0.87377	0.800	0.12500	0.40850
0.470	0.45500	0.87357	0.810	0.11300	0.37390
0.480	0.45200	0.88627	0.820	0.11300	0.37851
0.490	0.47000	0.94077	0.830	0.10000	0.33905
0.500	0.47500	0.97018	0.840	0.09000	0.30882
0.510	0.48000	1.00000	0.850	0.08000	0.27778
0.520	0.46500	0.98775	0.860	0.07600	0.26699
0.530	0.44000	0.95261	0.870	0.07000	0.24877
0.540	0.42300	0.93309	0.880	0.05600	0.20131
0.550	0.41200	0.92565	0.890	0.04700	0.17087
0.560	0.41000	0.93791	0.900	0.04000	0.14706
0.570	0.40600	0.94534	0.910	0.03500	0.13011
0.580	0.40300	0.95482	0.920	0.03200	0.12026

0.590	0.39200	0.94477	0.930	0.03000	0.11397
0.600	0.38000	0.93137	0.940	0.02700	0.10368
0.610	0.37000	0.92198	0.950	0.02200	0.08538
0.620	0.35000	0.88644	0.960	0.02000	0.07843
0.630	0.33000	0.84926	0.970	0.01800	0.07132
0.640	0.32500	0.84967	0.980	0.01200	0.04804
0.650	0.31600	0.83905	0.990	0.01700	0.06875
0.660	0.30500	0.82230	1.000	0.01000	0.04085
0.670	0.29700	0.81287	1.010	0.00600	0.02475
0.680	0.29200	0.81111	1.020	0.01000	0.04167
0.690	0.28000	0.78922	1.030	0.00400	0.01683
0.700	0.27000	0.77206	1.040	0.00200	0.00850
0.710	0.24500	0.71058	1.050	0.0	0.0
0.720	0.23500	0.69118	1.060	0.0	0.0

Приложение 2. Коэффициенты использования глазом потока излучения черных тел

Температура излучателя, К	КПД глаза	Температура излучателя, К	КПД глаза
1 200	$6,10 \cdot 10^{-6}$	5 500	$1,30 \cdot 10^{-1}$
1 300	$2,00 \cdot 10^{-5}$	5 750	$1,34 \cdot 10^{-1}$
1 400	$5,60 \cdot 10^{-5}$	6 000	$1,36 \cdot 10^{-1}$
1 500	$1,42 \cdot 10^{-4}$	6 500	$1,37 \cdot 10^{-1}$
1 600	$2,82 \cdot 10^{-4}$	7 000	$1,35 \cdot 10^{-1}$
1 700	$4,77 \cdot 10^{-4}$	7 500	$1,31 \cdot 10^{-1}$
1 800	$6,00 \cdot 10^{-4}$	8 000	$1,26 \cdot 10^{-1}$
1 900	$1,58 \cdot 10^{-3}$	8 500	$1,21 \cdot 10^{-1}$
2 000	$2,45 \cdot 10^{-3}$	9 000	$1,14 \cdot 10^{-1}$
2 100	$3,65 \cdot 10^{-3}$	9 500	$1,07 \cdot 10^{-1}$
2 200	$5,16 \cdot 10^{-3}$	10 000	$9,88 \cdot 10^{-2}$
2 300	$7,03 \cdot 10^{-3}$	11 000	$9,48 \cdot 10^{-2}$
2 400	$8,50 \cdot 10^{-3}$	12 000	$8,90 \cdot 10^{-2}$
2 500	$9,33 \cdot 10^{-3}$	13 000	$7,60 \cdot 10^{-2}$
2 600	$1,20 \cdot 10^{-2}$	14 000	$6,47 \cdot 10^{-2}$
2 700	$1,51 \cdot 10^{-2}$	15 000	$5,83 \cdot 10^{-2}$
2 800	$1,88 \cdot 10^{-2}$	16 000	$5,11 \cdot 10^{-2}$
2 900	$2,43 \cdot 10^{-2}$	17 000	$4,45 \cdot 10^{-2}$
3 000	$3,09 \cdot 10^{-2}$	18 000	$3,85 \cdot 10^{-2}$
3 100	$3,52 \cdot 10^{-2}$	19 000	$3,33 \cdot 10^{-2}$
3 200	$4,04 \cdot 10^{-2}$	20 000	$3,06 \cdot 10^{-2}$
3 300	$4,47 \cdot 10^{-2}$	25 000	$1,73 \cdot 10^{-2}$
3 400	$4,95 \cdot 10^{-2}$	30 000	$1,18 \cdot 10^{-2}$
3 500	$5,57 \cdot 10^{-2}$	35 000	$8,61 \cdot 10^{-3}$
3 750	$6,82 \cdot 10^{-2}$	40 000	$5,37 \cdot 10^{-3}$
4 000	$8,10 \cdot 10^{-2}$	45 000	$3,84 \cdot 10^{-3}$
4 250	$9,24 \cdot 10^{-2}$	50 000	$3,58 \cdot 10^{-3}$
4 500	$1,03 \cdot 10^{-1}$	55 000	$3,18 \cdot 10^{-3}$
4 750	$1,11 \cdot 10^{-1}$	60 000	$2,64 \cdot 10^{-3}$
5 000	$1,19 \cdot 10^{-1}$	65 000	$2,11 \cdot 10^{-3}$
5 250	$1,25 \cdot 10^{-1}$	70 000	$1,33 \cdot 10^{-3}$

Приложение 3. Спектральное пропускание атмосферы в видимой области.



Приложение 4. Относительная спектральная чувствительность глаза

Длина волны λ , нм	$V(\lambda)$	Длина волны λ , нм	$V(\lambda)$
380	0,00004	580	0,870
390	0,00012	590	0,757
400	0,0004	600	0,631
410	0,0012	610	0,503
420	0,0040	620	0,381
430	0,0116	630	0,265
440	0,023	640	0,175
450	0,038	650	0,107
460	0,060	660	0,061
470	0,091	670	0,032
480	0,139	680	0,017
490	0,208	690	0,0082
500	0,323	700	0,0041
510	0,503	710	0,0021
520	0,710	720	0,00105
530	0,862	730	0,00052
540	0,954	740	0,00025
550	0,995	750	0,00012
555	1,000	760	0,00006
560	0,995	770	0,00003
570	0,952	780	0,000015

Расчет точности наземного лазерного сканера

Целью расчетного задания анализ точности координатных измерений, осуществляемых наземным лазерным сканером.

Наземный лазерный сканер можно рассматривать как сканирующий лазерный «безотражательный» дальномер, обычно импульсного или фазового типа. Дальномер измеряет расстояние l от точки установки O до точки A отражения лазерного луча (рис. 1). Сканирование по азимуту как правило осуществляется разворотом сканера вокруг вертикальной оси, а сканирование по углу места - качанием или вращением зеркала или призмы с определенным шагом по соответствующим угловым координатам α и h . Шаг сканирования (интервал выборки) задается управляющей программой. Для каждого шага текущие угловые координаты измеряются с помощью соответствующих преобразователей угловых перемещений – энкодеров. Для каждого положения (шага) сканера по результатам измерения дальности l и прямых координат α и h вычисляются трехмерные координаты x , y , z отдельных точек, совокупность которых образует «облако точек».

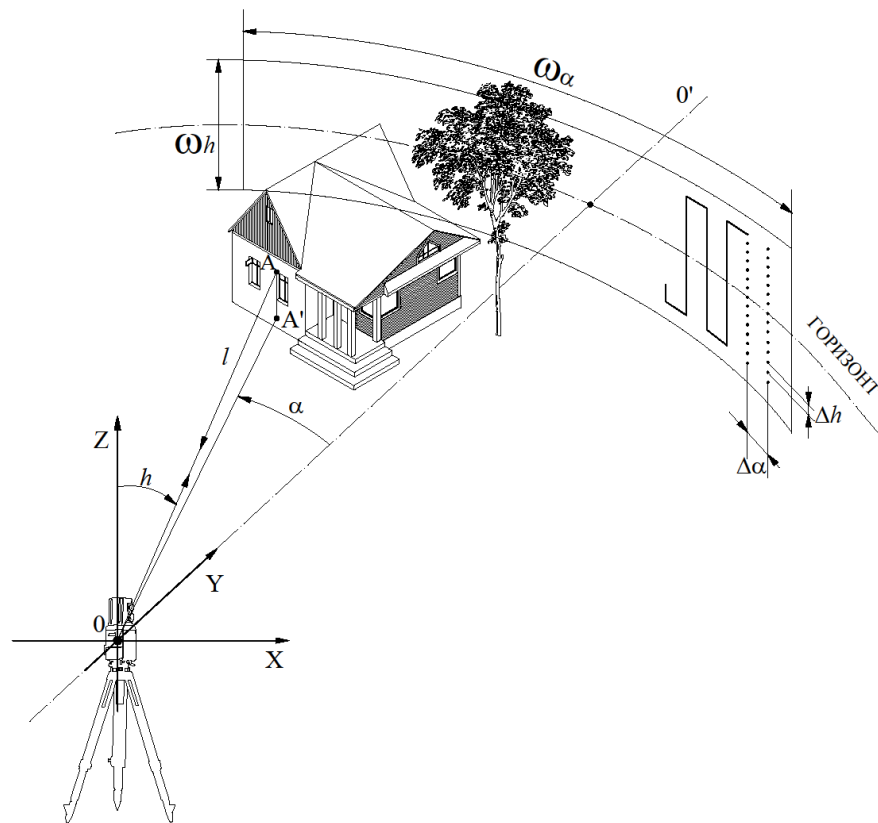


Рис.1 Схема сканирования.

Точность координатных измерений, осуществляемых с помощью сканера, характеризуется результирующей погрешностью, которую можно представить как суперпозицию инструментальной, флуктуационной и методической составляющих. Инструментальная погрешность связана в основном с точностью измерений временных интервалов в импульсных дальномерах, с точностью фазовых измерений в фазовых дальномерах и с точностью преобразователей угловых перемещений (энкодеров), установленных на осях сканера. Флуктуационная погрешность зависит от целого ряда факторов, определяющих энергетические соотношения – от мощности лазера, расстояния до объекта, пороговой чувствительности сканера, типа отражающей поверхности и др. И, наконец, методическая погрешность зависит от параметров лазерного пучка и режима сканирования.

Инструментальная погрешность

При импульсном методе измерения дальности расстояние определяется по формуле

$$l = \frac{c\tau}{2},$$

где c - скорость света, τ - время прохождения светового импульса по дистанции в прямом и обратном направлениях. Время τ можно определить по числу счетных импульсов, заполняющих интервал времени между ушедшим на дистанцию и пришедшим после отражения импульсами.

Относительная погрешность измерения интервала τ определяется как

$$\delta\tau = \pm \left(\delta_o + \frac{t_{сч}}{\tau k} \right), \quad \text{где}$$

$\delta_o = \frac{\Delta f}{f}$ – относительная погрешность частоты генератора счетных

импульсов, $t_{сч} = \frac{1}{f}$ - период счетных импульсов, k - число усреднений

(измерений интервала τ).

Относительная погрешность измерения дальности будет равна по величине $\delta\tau$, а абсолютная предельная погрешность

$$\Delta l_{\text{ии}} = l \delta\tau = 2l \left(\delta_o + \frac{t_{сч}}{\tau k} \right).$$

При фазовом методе измерения дальности расстояние определяется по формуле

$$l = \frac{c}{2f_m} \left(\frac{\varphi}{2\pi} \right),$$

где f_m - частота модуляции излучения, φ - фазовый сдвиг принятого сигнала относительно переданного на дистанцию. Фазовый сдвиг включает целое число фазовых циклов от 0 до 2π и дробную часть меньше 2π . При погрешности измерения фазового сдвига $\Delta\varphi$ погрешность измерения дальности будет равна

$$\Delta l_{\text{иф}} = \frac{c}{2f_m} \left(\frac{\Delta\varphi}{2\pi} \right).$$

В инструментальную погрешность измерений войдут также составляющие, определяемые точностью энкодеров, установленных на осях сканирования.

Угловые погрешности энкодеров дают соответствующие линейные погрешности координат в плоскости объекта в соответствии с зависимостями:

$$\Delta x_3 = \Delta\alpha_3 l \quad ; \quad \Delta y_3 = \Delta h_3 l,$$

где Δx_3 и Δy_3 линейные погрешности, $\Delta\alpha_3$ и Δh_3 - угловые погрешности энкодеров в радианах по осям a и h , соответственно.

Флуктуационная погрешность

При приеме импульсного сигнала на фоне белого гауссовского шума средняя квадратическая погрешность оценки временного положения импульса не может быть меньше значения

$$\sigma_\tau = \frac{1}{\sqrt{\mu} \Delta f_c}, \text{ с}$$

где μ - отношение сигнал/шум по мощности, Δf_c - полоса частот, занимаемая сигналом, которая по приближенным оценкам может быть равной $\Delta f_c = 1/t_{\text{и}}$, $t_{\text{и}}$ - длительность импульса. При приеме серии из k

импульсов погрешность оценки уменьшается в \sqrt{k} раз. Предельная флуктуационная погрешность измерения дальности импульсным дальномером определяется как

$$\Delta l_{\text{фли}} = \frac{3c}{2} \frac{\sigma_\tau}{\sqrt{k}} = \frac{3c}{2\Delta f_c \sqrt{k\mu}}$$

При измерении фазового сдвига $\Delta\varphi$ на фоне гауссовского белого шума средняя квадратическая погрешность оценки фазы равна

$$\sigma_\varphi = \frac{1}{\sqrt{\mu}}, \text{ рад}$$

При усреднении результатов серии из k измерений погрешность оценки также уменьшается в \sqrt{k} раз. Предельная флуктуационная погрешность измерения дальности фазовым дальномером определится как

$$\Delta l_{\text{флф}} = \frac{3c}{4\pi f_m \sqrt{k\mu}}.$$

Методическая погрешность

Рациональным для повышения точности координатных измерений, осуществляемых с помощью наземного лазерного сканера, представляется режим сканирования, при котором угловой шаг сканирования равен половине угла расходимости лазерного пучка. Методическая погрешность измерения трехмерной координаты точки объекта Δ_m при таком режиме сканирования может составлять значение $\Delta_m = 1,5d$, где d – диаметр пятна излучения лазера в плоскости объекта. Величина d зависит от угла расходимости лазерного излучения и дальности. Методическую погрешность часто исключают из суммарной погрешности сканера и определяют как «точность моделирования поверхности».

Содержанием расчета является определение конструкторско-технологических условий обеспечения заданной точности измерения пространственных координат при наземном лазерном сканировании.

Исходными данными для расчета являются суммарная погрешность измерения пространственной координаты Δ_{Σ} , тип дальномера (импульсный или фазовый) пределы частоты модуляции и длительности импульсов, параметры лазера (длина волны, мощность излучения, расходимость), дальность действия сканера.

Порядок расчета

1. Составить композицию учитываемых инструментальных $\Delta l_{\text{и}}$, $\Delta x_{\text{э}}$, $\Delta y_{\text{э}}$, флуктуационной $\Delta l_{\text{фл}}$ и методической Δ_m , погрешностей, считая их независимыми и суммируя предельные значения:

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{\Delta l_{\text{и}}^2 + \Delta x_{\text{э}}^2 + \Delta y_{\text{э}}^2 + \Delta l_{\text{фл}}^2 + \Delta_m^2}$$

2. Полагая частные погрешности равными по величине $\Delta l_{и}^2 = \Delta x_{э}^2 = \Delta y_{э}^2 = \Delta l_{фл}^2 = \Delta_{м}^2 = \Delta_i^2$ вычислить предельное значение частной погрешности Δ_i :

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_i \sqrt{5}, \quad \Delta_i = \frac{\Delta_{\Sigma}}{\sqrt{5}}.$$

3. Считая $\Delta l_{ии} = \Delta_i$ или $\Delta l_{иф} = \Delta_i$ задаться рациональным сочетанием значений относительной погрешности частоты генератора счетных импульсов δ_o , периода счетных импульсов $t_{сч}$, числа усреднений k (измерений интервала τ) при использовании импульсного дальномера, частоты модуляции излучения f_m и погрешности фазометра $\Delta\phi$ при использовании фазового дальномера.

3. Считая $\Delta x_{э} = \Delta y_{э} = \Delta_i$ определить требуемую точность (предельно допустимую погрешность) энкодеров $\Delta\alpha_{э}$ и $\Delta h_{э}$.

4. Считая $\Delta l_{фли} = \Delta l_{флф} = \Delta_i$ рассчитать требуемое отношение сигнал/шум по мощности μ , длительность импульса $t_{и}$ (при использовании импульсного дальномера), уточнить частоту модуляции сигнала f_m при использовании фазового дальномера.

Уточнить число усреднений k и рассчитать время измерений, необходимое для реализации требуемого значения k .

Полученное значение μ может использоваться для проведения энергетического расчета сканера.

5. Рассчитать значение методической погрешности $\Delta_{м} = 1,5\theta l$, и определить угол расхождения излучения лазера θ , при котором $\Delta_i = \Delta_{м}$.

6. По рассчитанным параметрам сканера и требованиям к его элементам сделать проверочный точностной расчет. Проанализировать влияние отдельных составляющих погрешности на точность измерений.

7. Результаты вычислений свести в таблицу 1.

Табл. 1 Параметры наземного лазерного сканера.

Параметр	Значение
Максимальное расстояние до объекта, м	
Расходимость излучения лазера, рад.	
Частота сканирования, точек в с.	
Шаг сканирования, рад.	
Частота модуляции (фазовый дальномер), МГц	
Частота импульсов (импульсный дальномер), КГц	
Длительность импульса(импульсный дальномер),с	
Суммарная погрешность, мм	
Точность моделирования поверхности, мм	
Время измерения координат одной лазерной точки,с	
Максимальная частота сканирования, Гц	

Содержание отчета: расчетные формулы и результаты расчета по пунктам 1-5, таблица параметров сканера