

УДК 629.7.05:623.746.-519

**Характеристики лазерных локационных систем для коррекции
бесплатформенной инерциальной навигационной системы
беспилотных летательных аппаратов**

Старовойтов Е.И.

Научно-производственный комплекс «Электрооптика»,

ул. Стромынка, 18, корп.1, Москва, 107076, Россия

info@electrooptika.ru

Аннотация

В работе определены характеристики лазерных локационных систем (ЛЛС), предназначенных для коррекции бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) беспилотных летательных аппаратов. Рассмотрены конструкции ЛЛС на основе 3D Flash Ladar-технологии и оптико-механических сканеров. Проведен анализ производительности оптико-механических сканеров, энергетические расчеты и сравнение эффективности разных конструкций ЛЛС. Показаны преимущества ЛЛС на основе оптико-механического сканера гибридного типа, с использованием волоконных лазеров и лавинных фотодиодов.

Ключевые слова: лазерная локационная система, сканирование, беспилотный летательный аппарат, навигация, бесплатформенная инерциальная навигационная система, коррекция

Введение

Одним из основных направлений в развитии беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) является совершенствование бортовых навигационных комплексов. Это связано с расширением задач, выполняемых перспективными БПЛА, которые подразумевают увеличение автономности от человека-оператора, скорости, радиуса действия, длительности и диапазона высот полета.

Для навигации БПЛА широко используются данные глобальных спутниковых навигационных систем (СНС) – ГЛОНАСС и GPS. Но в условиях сильных помех СНС не работоспособны.

Автономная навигация БПЛА без использования СНС может осуществляться с помощью бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС). Однако с увеличением длительности полета возрастают погрешности определения координат (уходы БИНС), что затрудняет выполнение задач, требующих позиционирования с точностью до долей метра (например, посадки на аэродром по-самолетному).

Для коррекции БИНС при полетах над сушей может применяться метод одновременной локализации и построения карты (SLAM) с использованием видеокамер и лазерных локационных систем (ЛЛС) [1-7].

При выборе типа датчиков для установки на БПЛА, должны учитываться эксплуатационные отличия ЛЛС и видеокамер [8]. Преимущество ЛЛС состоит в круглосуточной работоспособности, а применение видеокамер ограничено продолжительностью светового дня. Кроме того, в ряде задач не представляется

возможным использование наземных ориентиров с заданными характеристиками (контраст, огни).

Задача настоящей работы состоит в определении основных характеристик ЛЛС, предназначенных для коррекции БИНС в бортовых навигационных комплексах перспективных БПЛА. Здесь может эффективно использоваться накопленный к настоящему времени опыт разработки бортовых ЛЛС для космической техники [9,10].

Конструкция и элементная база лазерных локационных систем

В процессе картографирования подстилающей поверхности ЛЛС формирует т.н. «облако точек». Отдельная «точка» представляет собой единичное измерение координат подстилающей поверхности и находящихся на ней объектов. Облако точек – это множество точек, полученных при зондировании всего углового поля обзора ЛЛС.

Для определения дальности до точек используется времяпролетный метод измерений (измерение времени задержки между излучением зондирующего импульса и приемом эхо-сигнала).

В навигационных комплексах БПЛА могут быть использованы три типа конструкций ЛЛС.

1. ЛЛС на основе оптико-механического сканера (ОМС) традиционного типа, выполняющего последовательный просмотр поля обзора узкой диаграммой зондирующего излучения и совмещенным с ней полем зрения приемного канала (см. рис. 1).

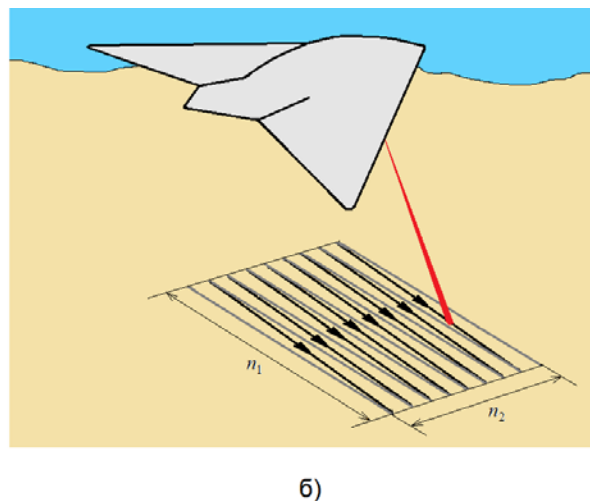
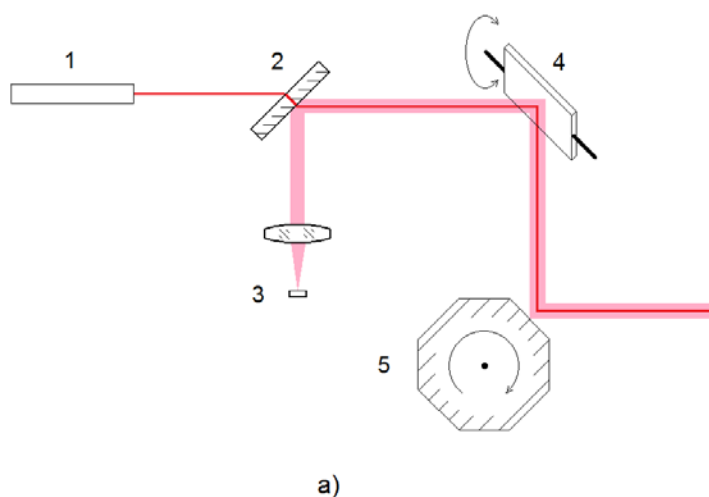
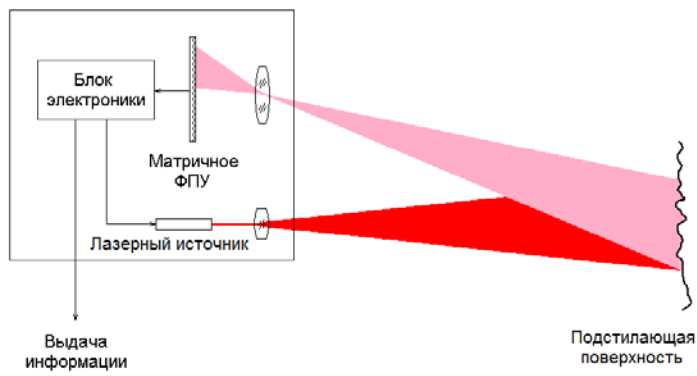


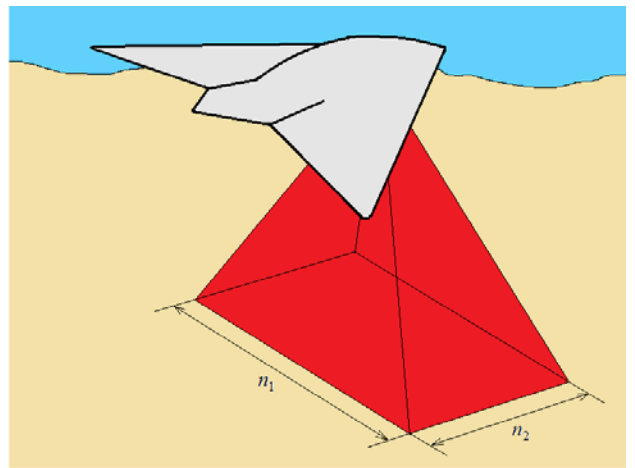
Рисунок 1 – а) Схема ОМС традиционного типа: 1 – лазерный источник; 2 – полупрозрачное зеркало; 3 – фотоприемное устройство (ФПУ); 4 – качающееся зеркало; 5 – вращающееся зеркало; б) Строчная развертка при сканировании подстилающей поверхности с борта БПЛА-носителя

2. ЛЛС на основе 3D Flash Ladar технологии (см. рис. 2), в которой используется широкая диаграмма зондирующего излучения, полностью перекрывающая поле обзора, и матричное ФПУ для измерения дальностей до разных участков подстилающей поверхности без использования сканирования.

3. ЛЛС на основе ОМС гибридного типа (см. рис. 3), выполняющего одномерное сканирование т.н. «веерной» или «ножевой» диаграммой зондирующего излучения в одном направлении, с использованием ФПУ на базе линейки фотодетекторов [11]. Этот вариант сочетает преимущества двух предыдущих конструкций.

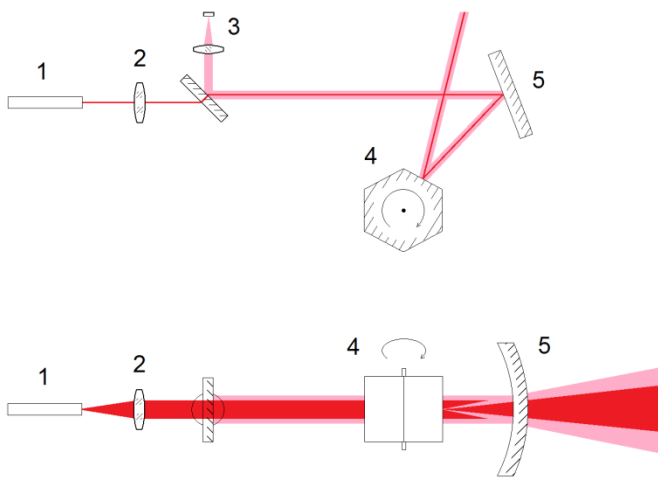


а)

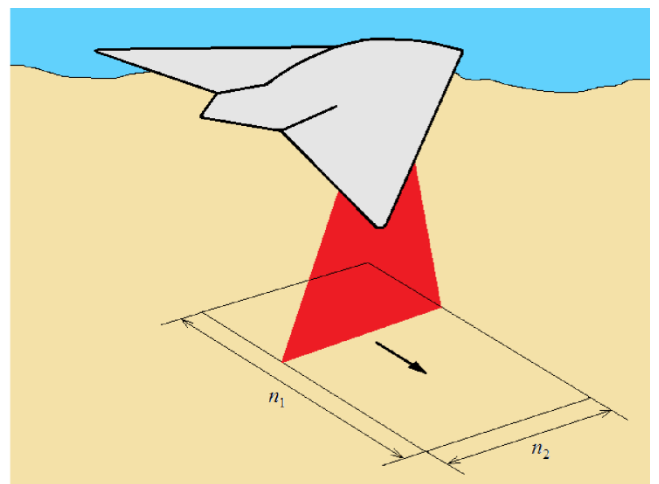


б)

Рисунок 2 – а) Схема ЛЛС на базе 3D Flash Ladar технологии; б) Зондирование подстилающей поверхности 3D Flash Ladar-системой с борта БПЛА-носителя



а)



б)

Рисунок 3 – а) Схема ОМС гибридного типа: 1 – лазерный источник; 2 – линза; 3 – ФПУ на базе линейки фотодетекторов; 4 – вращающееся зеркало; 5 – цилиндрическое зеркало; б) Сканирование «веерной» диаграммой зондирующего излучения подстилающей поверхности с борта БПЛА-носителя

В работе [1] предлагается использовать для коррекции БИНС измерения, полученные 3D Flash Ladar-системой, т.к. при работе ОМС в условиях полета могут возникать искажения, которые необходимо определять и компенсировать.

В то же время, результаты анализа характеристик бортовых ЛЛС для стыковки космических аппаратов [11] показывают, что системы на основе ОМС обладают лучшими пространственной производительностью (отношение объема зондируемого пространства ко времени обзора), удельными характеристиками по массе и энергопотреблению, а 3D Flash Ladar-системы обеспечивают лучшую информационную производительность (предельное число точек в трехмерном пространстве, получаемое в единицу времени).

Недостатки ОМС состоят в задержках при просмотре поля обзора (из-за ограниченных скоростей подвижных частей) и ограниченном сроке службы, связанном с износом механизма в процессе эксплуатации.

Основное преимущество 3D Flash Ladar-систем состоит в том, что один зондирующий импульс позволяет сразу получить трехмерное изображение подстилающей поверхности. Недостатками этой технологии в настоящее время являются небольшая дальность измерений (сотни метров при поле обзора в десятки градусов), ограниченное разрешение (лимитируется количеством фотодетекторов в ФПУ) и низкая помехоустойчивость.

Кроме того, ФПУ для 3D Flash Ladar систем выпускаются небольшим числом иностранных производителей.

В 3D Flash Ladar-системах облучается полностью все поле обзора и эхо-сигнал распределяется на большое количество отдельных фотодетекторов. Поэтому в ФПУ

как правило используются лавинные фотодиоды (ЛФД) – фотодетекторы с внутренним усилением, позволяющие детектировать слабые эхо-сигналы.

В ОМС обоих типов могут быть использованы ФПУ на базе ЛФД, а также ФПУ на базе pin-фотодиодов (pin-ФД), имеющих меньшую стоимость и большую доступность. Также pin-ФД могут использоваться в ФПУ для 3D Flash Ladar-систем. Однако из-за использования фотодетекторов без внутреннего усиления чувствительность ФПУ будет ниже примерно на два порядка в сравнении с ФПУ на базе ЛФД.

В качестве источников излучения в ЛЛС возможно применение твердотельных лазеров с диодной накачкой (ТТЛ), полупроводниковых лазерных диодов (ЛД) и волоконных лазеров (ВЛ).

ТТЛ и ВЛ формируют узкую диаграмму направленности излучения (< 1 мрад), при этом ТТЛ имеют большую энергию зондирующих импульсов E_u (десятки и сотни мДж), а ВЛ обеспечивают высокую частоту их повторения (сотни кГц). Достоинства полупроводниковых ЛД состоят в их компактности, простоте и надежности. Применение ЛД ограничивают малая энергия импульсов (менее 1 мДж) и широкая диаграмма направленности излучения ($\sim 10^\circ \times 30^\circ$).

Основные характеристики лазерных источников [9], которые могут использоваться в ЛЛС, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Основные характеристики лазерных источников, используемых в ЛЛС

Лазерный источник	E_u	t_u	f	Масса
ТТЛ	8...200 мДж	7...35 нс	3...30 Гц	0,2...5,0 кг
ВЛ	45...200 мкДж	3...50 нс	35...700 кГц	2,3 кг

Лазерный источник	E_u	t_u	f	Масса
ЛД	1...50 мкДж	100 нс	5...10 кГц	1,0...20,0 г

Анализ производительности оптико-механических сканеров

При картографировании земной поверхности плотность сканирования ЛЛС должна обеспечивать хорошую информативность получаемого облака точек и высокую производительности просмотра поля обзора. При этом нежелательно перекрытие соседних точек [12,13].

ОМС традиционного типа должен обеспечивать равномерность распределения получаемых точек по подстилающей поверхности и простоту технической реализации. Этим критериям в полной мере отвечает строчная развертка с помощью вращающейся призмы или зеркала (см. рис. 1, а). Строчная развертка осуществляется перпендикулярно направлению полета (см. рис. 1, б).

Скорость сканирования связана с диапазоном рабочих высот. Минимальная и максимальная рабочие высоты определяются скоростью вращения зеркала или призмы, а также частотой повторения импульсов лазерного источника.

Длительность просмотра поля обзора связана с дальностью до подстилающей поверхности (высотой полета) выражением [14]

$$t_{обз} = \frac{2D \cdot \Omega_{обз}}{c \cdot \Omega_{нз}}, \quad (1)$$

где D – дальность до подстилающей поверхности; $\Omega_{обз}$ – телесный угол поля обзора ЛЛС; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света; $\Omega_{нз}$ – телесный угол мгновенного углового поля зрения приемного канала.

Частота повторения зондирующих импульсов ограничена максимальной рабочей высотой измерений

$$f = \frac{c}{2D_{\max}}. \quad (2)$$

Практически можно повысить частоту повторения зондирующих импульсов с увеличением высоты, усложнив конструкцию ЛЛС: использовать ФПУ на базе линейки фотодетекторов или ввести в схему два спектральных канала и кодирование сигнала [15].

Принимая разрешение ЛЛС по углам Δ равным по обеим осям координат в плоскости построчного сканирования, получаем зависимость длительности просмотра поля обзора от скорости вращения призмы (зеркала)

$$t_{\text{обз}} = \frac{n_1 \cdot n_2}{\Delta \cdot \omega}, \quad (3)$$

где n_1, n_2 – угловой размер поля обзора ЛЛС по двум осям в плоскости сканирования; ω – скорость вращения призмы (зеркала).

Так как $n_1 \cdot n_2 = \Omega_{\text{обз}}$, то

$$t_{\text{обз}} = \frac{\Omega_{\text{обз}}}{\Delta \cdot \omega}. \quad (4)$$

Принимая $\Omega_{\text{нз}} = \Delta^2$, получаем

$$\frac{c}{2D} = \frac{\omega}{\Delta}. \quad (5)$$

Для ОМС с постоянной частотой повторения зондирующих импульсов и скоростью вращения призмы (зеркала) максимальная рабочая высота составит

$$D_{\max} = \frac{c \cdot \Delta}{2\omega}. \quad (6)$$

Нижняя граница высот будет ограничена линейным сдвигом (искажением) облака точек вследствие перемещения БПЛА-носителя

$$\delta l = v \cdot t_{обз}, \quad (7)$$

где v – скорость полета БПЛА-носителя.

Искажение облака точек не будет проявляться, если его величина не превышает $\Delta/2$. Тогда

$$\delta l = D_{\min} \cdot \frac{\Delta}{2}. \quad (8)$$

Время, за которое наступает искажение облака точек

$$t_{иск} = \frac{D_{\min} \cdot \Delta}{2v}. \quad (9)$$

Для отсутствия искажения необходимо чтобы

$$t_{обз} \geq t_{иск}, \quad (10)$$

и тогда, с учетом (4) скорость полета не должна превышать значение

$$v = \frac{D \cdot \Delta^2 \cdot \omega}{2\Omega_{обз}}. \quad (11)$$

Из (5) следует, что ω определяется через D , поэтому

$$v_{\max} = \frac{c \cdot \Delta^3}{4\Omega_{обз}}. \quad (12)$$

Для ОМС гибридного типа выражения (6), (11) и (12) будут иметь вид

$$D_{\max} = \frac{c}{2\omega}, \quad (13)$$

с учетом $\Omega_{обз} = n_1 \times n_2$ и $\Omega_{n3} = \Delta \cdot n_2$

$$v = \frac{D \cdot \Delta \cdot \omega}{2n_2}, \quad (14)$$

$$v_{max} = \frac{c \cdot \Delta^2}{4n_2}. \quad (15)$$

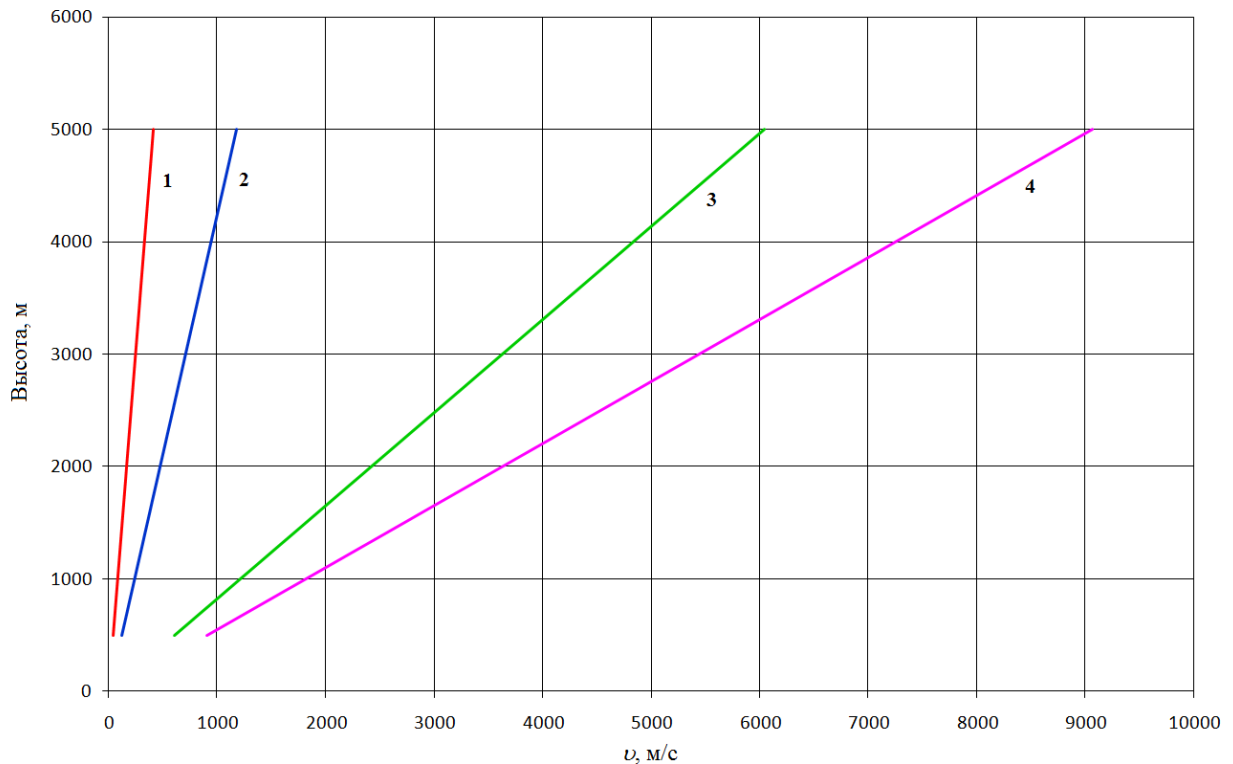


Рисунок 4 – Зависимость высоты полета от допустимой скорости БПЛА-носителя для ОМС традиционного (1, 2) и гибридного типов (3, 4): 1 – $\Omega_{обз} = 5^\circ \times 30^\circ$; 2 – $\Omega_{обз} = 3^\circ \times 18^\circ$; 3 – $n_2 = 45^\circ$; 4 – $n_2 = 30^\circ$

На рис. 4 представлены кривые зависимости высоты полета от допустимой скорости БПЛА-носителя (при которой не наступает искажение облака точек) для ОМС традиционного и гибридного типа ($\Delta = 0,25^\circ$; $\omega = 1250$ об/мин).

Из рисунка следует, что в том же диапазоне высот для ОМС гибридного типа максимально допустимая скорость полета БПЛА-носителя будет выше на порядок, чем у ОМС традиционного типа.

Из выражений (12) и (15) следует, что максимально допустимая скорость полета БПЛА-носителя, при которой не наступает искажения облака точек, определяется отношением углового разрешения к размеру поля обзора ЛЛС с ОМС. При размере поля обзора $\Omega_{обз} = n_1 \times n_2 = 30^\circ \times 30^\circ$ и $\Delta = 0,25^\circ$ для ОМС традиционного типа

$$v_{\max} = 81,8 \text{ км/ч,}$$

а для ОМС гибридного типа ($n_2 = 32^\circ$)

$$v_{\max} = 9203,9 \text{ км/ч.}$$

Для увеличения допустимой скорости полета, на которой может использоваться ОМС традиционного типа, потребуется сузить его поле обзора. Это можно обеспечить путем уменьшения числа строк сканирования (перпендикулярных направлению полета), сохранив их длину (см. рис. 5). Захват набегающей подстилающей поверхности широким полем обзора обеспечивает наибольшую информативность получаемых данных.

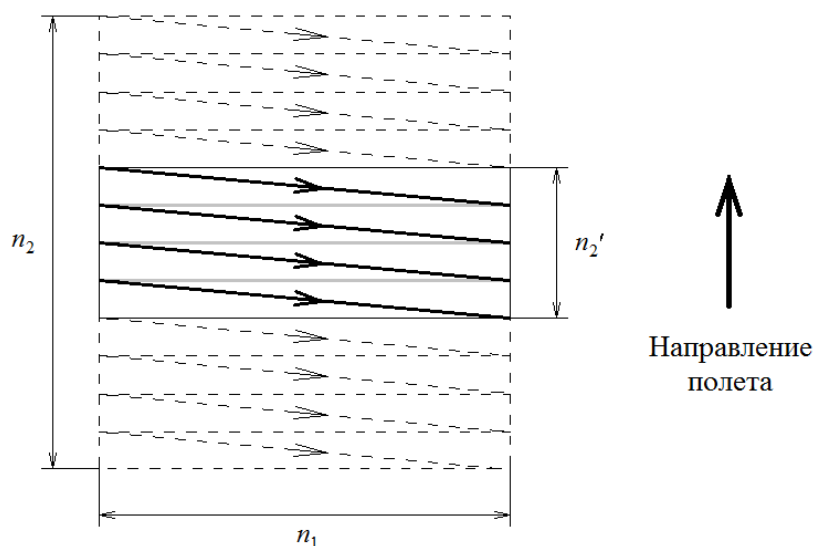


Рисунок 5 – Сужение поля обзора ОМС традиционного типа за счет уменьшения количества строк сканирования

Если сузить поле обзора ЛЛС до $\Omega_{обз} = 5^\circ \times 30^\circ$, тогда

$$v_{\max} = 490,9 \text{ км/ч.}$$

Энергетическая оценка зондирования подстилающей поверхности

Максимальную рабочую высоту ЛЛС можно оценить с помощью «классического» уравнения лазерной локации на основе приближений геометрической оптики [9,14]. Если принять подстилающую поверхность диффузно рассеивающей излучение, то дальность измерений ЛЛС определяется выражением

$$D = \sqrt{\frac{P_u \cdot d_{np}^2 \cdot \rho \cdot \tau_{nep} \cdot \tau_{np} \cdot \tau_a^2}{4 \cdot N \cdot P_{nop}}}, \quad (16)$$

где P_u – мощность лазерного импульса; d_{np} – диаметр приемного объектива (приемной апертуры); ρ – коэффициент отражения подстилающей поверхности; N –

количество фотодетекторов (для многоэлементных ФПУ); $P_{пор}$ – пороговая мощность сигнала, регистрируемая ФПУ; $\tau_{пер}$ – коэффициент пропускания передающего оптического тракта; $\tau_{пр}$ – коэффициент пропускания приемного оптического тракта; τ_a – коэффициент пропускания атмосферы.

Минимальная дальность измерений ЛЛС определяется динамическим диапазоном фотодетекторов, используемых в ФПУ. Из выражения (16) следует, что динамический диапазон измерений ЛЛС рассчитывается из отношения

$$\nu = \frac{D_{max}^2}{D_{min}^2}. \quad (17)$$

Динамический диапазон отраженного сигнала ограничен типом фотодетектора: для ЛФД он составляет 25...30 дБ, а для pin-ФД ~ 60 дБ.

Эхо-сигнал может приниматься при наличии световых помех (засветок). В дневное время подстилающая поверхность рассеивает солнечный свет, создавая фоновую засветку ФПУ. Мощность фоновой засветки определяется выражением

$$P_{\phi} = \frac{1}{\pi} \cdot \rho \cdot \Phi_{\lambda} \cdot \Delta^2 \cdot S_{np} \cdot \tau_n \cdot \delta, \quad (18)$$

где Φ_{λ} – поток солнечного излучения в единичном интервале длин волн, проходящий через единицу поверхности; S_{np} – площадь приемной апертуры; $\delta\lambda$ – ширина полосы пропускания интерференционного фильтра.

Для достоверного измерения мощность принятого эхо-сигнала должна превышать мощность внешних и внутренних помех, регистрируемых фотодетектором. Отношение сигнал/шум представляет собой отношение тока сигнала к шумовому току фотодетектора

$$q = \frac{i_c}{i_{ш}}, \quad (19)$$

где i_c – ток сигнала; $i_{ш}$ – шумовой ток.

Полный шумовой ток включает шумовой ток фотодетектора и шумовой ток усилительного каскада [16]

$$i_{ш} = \sqrt{i_{ш\phi\delta}^2 + i_{шy}^2}, \quad (20)$$

где $i_{ш\phi\delta}$ – шумовой ток фотодетектора; $i_{шy}$ – шумовой ток усилительного устройства.

Шумовой ток фотодетектора определяется выражением [14]

$$i_{ш\phi\delta} = \sqrt{f_n \cdot \left(\frac{4kT}{R} + 2e \cdot M^2 \cdot F \cdot (i_T + S_i \cdot P_{\phi\delta}) \right)}, \quad (21)$$

где f_n – ширина полосы пропускания; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; R – сопротивление нагрузки; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона; M – коэффициент внутреннего усиления фотодетектора по току (для ЛФД); $F = M^x$ – коэффициент шума лавинного умножения (для ЛФД); x – показатель шума избыточного лавинного умножения; i_T – темновой ток фотодетектора; S_i – токовая чувствительность фотодетектора.

Ширина полосы пропускания и сопротивление нагрузки определяются как

$$f_n = \frac{2}{t_u}, \quad (22)$$

$$R = \frac{1}{2C \cdot f_n}, \quad (23)$$

где t_u – длительность импульса излучения; C – емкость перехода фотодетектора.

Таким образом, выражение (20) принимает вид

$$q = \frac{S_i \cdot M^2 \cdot P_c}{\sqrt{f_n \cdot \left(\left(\frac{4kT}{R} + 2e \cdot M^2 \cdot F \cdot (i_T + S_i \cdot (P_{\phi z} + P_c)) \right) + \varpi_{uy}^2 \right)}}, \quad (24)$$

где P_c – мощность принятого эхо-сигнала; ϖ_{uy} – шум усилителя.

Как следует из сопоставления выражений (2), (6), (13;) с выражением (16), максимальная дальность измерений ОМС определяется в первую очередь скоростью сканирования и частотой повторения зондирующих импульсов, а уже во вторую их мощностью.

При оценках характеристик ЛЛС, предназначенных для коррекции БИНС в бортовых навигационных комплексах, также должны учитываться их отличия от систем для воздушной лазерной съемки (для топографии, природопользовании и т.д.) [12,13,17,18] и систем для обеспечения безопасности маловысотных полетов [19-21].

Анализ характеристик лазерных локационных систем разных конструкций

Для оценки характеристик ЛЛС определим уровень естественных помех, создаваемых фоновой засветкой. Большая часть новых разработок ЛЛС выполняется с учетом требований лазерной безопасности, поэтому для их излучения выбирается «безопасный» спектральный диапазон (1,5...1,6 мкм) [9,21].

На длине волны около 1,5 мкм $\Phi_\lambda = 0,27 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{нм})$ [22]. При $\rho = 0,5$; $\tau_{np} = 0,8$; $\Delta = 0,25^\circ$; $d_{np} = 2 \dots 10 \text{ см}$; $\delta\lambda = 20 \text{ нм}$, оценка показывает, что $P_{\phi z} \leq 1 \cdot 10^{-7} \text{ Вт}$.

Далее принимаем: $q = 10$; $\tau_{nep} = 0,8$; $T = 293$ К; $\varpi_{шy} = 2$ пА/Гц^{1/2}. Основные характеристики фотодетекторов для ФПУ [10] и рассчитанные для них величины пороговой энергии сигнала ($E_{nop} = P_{nop} \cdot t_u$), представлены в таблице 2.

Таблица 2

Основные характеристики фотодетекторов, используемых в ФПУ

Показатели	Тип фотодетектора	
	ЛФД	pin-ФД
i_T , нА	2,2	120
S_{i_s} , А/Вт	7,2	0,85
C_s , пФ	0,23	270
M	10	–
M^x	5,5	–
E_{nop} , Дж при $t_u = 20$ нс	$3,4 \cdot 10^{-17}$	$7 \cdot 10^{-14}$

Оценки по выражению (24) показывают, что наличие фоновой засветки не снижает чувствительность ФПУ на базе вышеуказанных фотодетекторов.

В таблице 3 представлены характеристики трех типов конструкций ЛЛС, в которых используются разные лазерные источники и фотодетекторы (характеристики указаны в таблицах 1 и 2). Для учета потерь в атмосфере сделаны следующие допущения: для дальностей менее 1 км $\tau_a \approx 1$; для бóльших дальностей $\tau_a \geq 0,8$; в первом приближении помеха обратного рассеяния не учитывается.

Из таблицы 3 можно сделать следующие выводы:

1. Замена ЛФД на pin-ФД в ФПУ для 3D Flash Ladar приведет к снижению максимальной дальности измерений на порядок (даже с учетом увеличения приемной апертуры). Дальность можно увеличить за счет использования более мощного ТТЛ, но это повлечет увеличение массы и потребляемой мощности (т.е. потерю основных преимуществ 3D Flash Ladar-систем).

Характеристики трех типов конструкций ЛЛС с разными лазерными источниками и фотодетекторами

ЛЛС	Лазер	ФПУ	D_{\max} / D_{\min}	$t_{\text{обз}}$	ω	v_{\max}^*
1. 3D Flash Ladar: $\Omega_{\text{обз}} = 32^\circ \times 32^\circ$; $d_{\text{лр}} = 2 \text{ см}$	ТТЛ: 8 мДж; 20 нс; 10 Гц	Матрица 128×128 ЛФД	680 м / 125 м	10,0 мс	–	–
2. 3D Flash Ladar: $\Omega_{\text{обз}} = 32^\circ \times 32^\circ$; $d_{\text{лр}} = 10 \text{ см}$	ТТЛ: 8 мДж; 20 нс; 10 Гц	Матрица 128×128 pin-ФД	75 м / 15 м	10,0 мс	–	–
3. ОМС традиционного типа: $\Omega_{\text{обз}} = 5^\circ \times 30^\circ$; $d_{\text{лр}} = 10 \text{ см}$	ВЛ: 45 мкДж; 20 нс; 75,0 кГц	1×ЛФД	2000 м / 400 м	32,0 мс	5540 об/мин	870,2 км/ч 158,8 км/ч
4. ОМС традиционного типа: $\Omega_{\text{обз}} = 5^\circ \times 30^\circ$; $d_{\text{лр}} = 10 \text{ см}$	ВЛ: 200 мкДж; 20 нс; 216,2 кГц	1×pin-ФД	1200 м / 200 м	11,1 мс	9000 об/мин	842,6 км/ч 175,5 км/ч
5. ОМС гибридного типа: $\Omega_{\text{обз}} = 32^\circ \times 32^\circ$; $d_{\text{лр}} = 2 \text{ см}$	ВЛ: 200 мкДж; 20 нс; 72,0 кГц	Линейка 128 ЛФД	1000 м / 200 м	1,8 мс	3000 об/мин	1227,2 км/ч 245,4 км/ч
* Значения допустимой скорости для максимальной и минимальной высоты полета						

2. ОМС традиционного типа для работы в диапазоне высот 0,4...2,0 км (0,2...1,2 км с ФПУ на базе pin-ФД) и скоростей полета до 850 км/ч может быть реализован на основе ВЛ.

3. ОМС гибридного типа для работы в диапазоне высот 0,2...1,0 км и скоростей полета до 1200 км/ч может быть реализован на основе ВЛ и ЛФД.

Использование ТТЛ в ОМС обоих типов затруднено низкими частотами повторения импульсов излучения. Из выражений (1) и (2) следует что при $f = 30 \text{ Гц}$

на обзор поля $\Omega_{обз} = 5^\circ \times 30^\circ$ потребуется $t_{обз} = 80$ с. Для работы ОМС гибридного типа ($\Omega_{обз} = 32^\circ \times 32^\circ$) на высоте 2 км при скорости полета 600 км/ч частота повторения импульсов должна быть около 5 кГц. Поэтому ТТЛ применимы только в 3D Flash Ladar-системах.

Полупроводниковые ЛД с $f = 5$ кГц могут использоваться в ОМС гибридного типа. Однако низкая энергетика ЛД будет ограничивать характеристики ЛЛС (высота 600 м при скорости полета БПЛА-носителя до 184,1 км/ч). Рабочую высоту можно поднять до 2 км за счет увеличения приемной апертуры, но в результате возрастут масса и габариты оптической системы, что нивелирует основные преимущества использования лазерного источника на базе полупроводникового ЛД.

В ОМС традиционного типа использование полупроводниковых ЛД нецелесообразно (при $f = 5$ кГц и $\Omega_{обз} = 5^\circ \times 30^\circ$ потребуется $t_{обз} = 0,48$ мс).

Таким образом, ОМС обоих типов реализуются на основе ВЛ и ЛФД.

Оценка эффективности разных конструкций лазерных локационных систем

Оценка эффективности ЛЛС на основе ОМС и 3D Flash Ladar технологии может быть осуществлена с помощью обобщенной функции [10], в которой используется отношение характеристик сравниваемых конструкций.

Предлагается использовать следующую обобщенную функцию

$$\varphi_i = \left(\frac{D_{\max}}{D_{\max 0}} \right) \cdot \left(\frac{\Omega_{обз}}{\Omega_{обз 0}} \right) \cdot \left(\frac{t_{обз 0}}{t_{обз}} \right) \cdot \left(\frac{P_0}{P} \right) \cdot \left(\frac{m_{ЛЛС 0}}{m_{ЛЛС}} \right), \quad (25)$$

где P – потребляемая ЛЛС мощность; $m_{ЛЛС}$ – масса ЛЛС; с индексом «0» указаны желаемые значения характеристик.

Если желаемое значение параметра максимальное, то оно находится в знаменателе, если же минимальное – то в числителе. Увеличение функции φ_i соответствует увеличению эффективности ЛЛС.

Потребляемая лазером мощность составляет

$$P_l = \frac{E_u \cdot f}{\eta_l}, \quad (26)$$

где E_u – энергия лазерного импульса; η_l – КПД лазера.

Для эрбиевого ТТЛ $\eta_l = 0,01$, а для ВЛ $\eta_l = 0,2$.

В общем случае суммарная потребляемая ЛЛС мощность равна

$$P = \frac{P_l + P_\varepsilon + P_\delta}{\eta_n}, \quad (27)$$

где P_ε – мощность, потребляемая блоком электроники; P_δ – мощность, потребляемая электродвигателями ОМС (два в ОМС традиционного типа и один в ОМС гибридного типа); $\eta_n = 0,7$ – КПД источника питания.

Масса приемного линзового объектива оценивается в приближении, что она пропорциональна третьей степени его диаметра

$$m = K_n \cdot d_{np}^3, \quad (28)$$

где $K_n = 3000 \text{ кг/м}^3$ – коэффициент плотности заполнения конструкции объектива.

Значения массы и потребляемой мощности составных частей ЛЛС приведены в таблице 4.

Масса и потребляемая мощность составных частей ЛЛС

Наименование составных частей ЛЛС	Значение показателя
Мощность, потребляемая составными частями ЛЛС	
Блок электроники: ЛЛС на базе ОМС обоих типов	40,0 Вт
ЛЛС на базе 3D Flash Ladar	20,0 Вт
Электродвигатели: ОМС традиционного типа	2,0 Вт
ОМС гибридного типа	1,0 Вт
Масса составных частей ЛЛС	
Объектив передающей оптической системы	0,5 кг
ОМС традиционного типа	3,5 кг
ОМС гибридного типа	2,0 кг
ТТЛ	0,4 кг
ВЛ	2,3 кг
Блок электроники	3,0 кг
Корпус	2,0 кг

Желаемые значения характеристик (соответствующие наилучшим значениям у сравниваемых ЛЛС из таблиц 3 и 4): $D_{\max 0} = 2000$ м; $\Omega_{\text{обз0}} = 32^\circ \times 32^\circ$; $t_{\text{обз}} = 1,8$ мс; $P_0 = 40$ Вт; $m_{\text{ЛЛС0}} = 5,9$ кг.

Значения обобщенной функции для сравниваемых конструкций ЛЛС (из таблицы 3) представлены в таблице 5.

Значения обобщенной функции для разных конструкций ЛЛС

ЛЛС	Значение обобщенной функции
1. 3D Flash Ladar, ФПУ на базе ЛФД	0,0609
2. 3D Flash Ladar, ФПУ на базе pin-ФД	0,0045
3. ОМС традиционного типа, ФПУ на базе ЛФД	0,0016
4. ОМС традиционного типа, ФПУ на базе pin-ФД	0,0006
5. ОМС гибридного типа, ФПУ на базе ЛФД	0,0744

Как следует из таблицы 5, наибольшее значение обобщенной функции (т.е. максимальную эффективность) имеет ЛЛС на основе ОМС гибридного типа. Наименьшее значение обобщенной функции имеет ЛЛС на основе ОМС традиционного типа с ФПУ на базе pin-ФД.

Заключение

В работе определены основные характеристики ЛЛС, предназначенных для коррекции БИНС в бортовых навигационных комплексах перспективных БПЛА. Рассмотрены конструкции ЛЛС на основе 3D Flash Ladar-технологии, ОМС традиционного и гибридного типа.

Анализ характеристик ЛЛС всех трех типов показывает, что наиболее перспективными являются конструкции на основе ОМС гибридного типа, имеющие наибольшую эффективность. В этих ЛЛС используются лазерные источники на основе ВЛ и ФПУ на базе ЛФД.

ЛЛС с ОМС гибридного типа могут применяться для работы в диапазоне высот 0,2...1,0 км и скоростей полета БПЛА-носителя до 1300 км/ч.

Результаты, полученные в данной работе, могут использоваться при разработке бортовых навигационных комплексов для перспективных БПЛА.

Библиографический список

1. Падерин Ф.Г. Комплексная обработка информации в бортовом навигационном комплексе БПЛА с использованием метода навигации и составления карты (SLAM)

// Труды МИЭА. Навигация и управление летательными аппаратами. 2017. № 19. С. 79 - 87.

2. Anand V., Karthik R.J., Dathan V., Tripathy R.P. UAV Photogrammetry and Lidar Mapping // International Journal of Advanced Scientific Technologies, Engineering and Management Sciences, 2017, vol. 3, Special Issue.1, April, available at: http://www.ijastems.org/wp-content/uploads/2017/04/v3.sia1_58.UAV-Photogrammetry-and-Lidar-Mapping.pdf

3. Антонов Д.А., Жарков М.В., Кузнецов И.М., Лунев Е.М., Пронькин А.Н. Определение навигационных параметров беспилотного летательного аппарата на базе фотоизображения и инерциальных измерений // Труды МАИ. 2016. № 91. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=75632>

4. Глаголев В.М., Ладонкин А.В. Оптическая система навигации летательных аппаратов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 10. С. 186 - 195.

5. Li J., Bi Y., Lan M., Qin H., Shan M., Lin F., Chen B.M. Real-time simultaneous localization and mapping for uav: a survey // Proc. of International micro air vehicle competition and conference, 2016, Beijing, China, 2016, pp. 237 - 242.

6. Zhang, J. and Singh, S. Visual-lidar odometry and mapping: Low-drift, roust, and fast // Proc. of the 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Washington State Convention Center Seattle, Washington, May 26-30, 2015, pp. 2174 - 2181, doi: 10.1109/ICRA.2015.7139486

7. Bry A., Bachrach A., Roy N. State Estimation for Aggressive Flight in GPS-Denied Environments Using Onboard Sensing // Proc. of the 2012 IEEE International Conference

on Robotics and Automation (ICRA), RiverCentre, Saint Paul, Minnesota, USA, May 14-18, 2012, available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?> DOI: 10.1109/ICRA.2012.6225295

8. Conte G., Rudol P., Doherty P. Evaluation of a Light-weight Lidar and a Photogrammetric System for Unmanned Airborne Mapping Applications // Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, 2014, vol. 4, pp. 287 – 298, doi: 10.1127/1432-8364/2014/0223.

9. Старовойтов Е.И. Бортовые лазерные локационные системы космических аппаратов: Учебное пособие. – Королев: РКК «Энергия», 2015. - 160 с.

10. Старовойтов Е.И. Лазерная локационная аппаратура в системах управления, межбортовой передачи энергии и информации космических аппаратов: Учебное пособие. – Королев: РКК «Энергия», 2016. - 148 с.

11. Грязнов Н.А., Купренюк В.И., Соснов Е.Н. Лазерная информационная система обеспечения сближения и стыковки космических аппаратов // Оптический журнал. 2015. Т. 82. № 5. С. 27 - 33.

12. Медведев Е.М., Данилин И.М., Мельников С.Р. Лазерная локация земли и леса. - М.: Геолидар, Геокосмос. - Красноярск. Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2007. - 230 с.

13. Ульрих А. Информационное наполнение облака точек при воздушном лазерном сканировании // Геоматика. 2016. № 1. С. 38 - 53.

14. Малашин М.С., Каминский Р.П., Борисов Ю.Б. Основы проектирования лазерных локационных систем. - М.: Высшая школа, 1983. - 207 с.

15. Грязнов Н.А., Панталеев С.М., Иванов А.Е. и др. Высокопроизводительный метод измерений координат объектов в условиях космического пространства // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2013. № 2 (171). С. 197 - 202.
16. Мельников К.В. Оптимизация фотоприемного устройства лазерной телеметрической системы // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. 2012. № 7 (69). С. 34 - 39.
17. Park H.J., Turner R., Yun B.Y., Lee J.O. Change detection analysis using airborne LiDAR: open-cut mine environment // Proceedings of the XVI International Mine Surveying Congress (ISM2016), 2016, available at:
https://www.ism2016.com/files/ISM2016/Proceedings/Section3/2_HJ_Park.pdf
18. Jozkow, G., Toth, C., Grejner-Brzezinska, D. UAS topographic mapping with Velodyne LiDAR sensor // ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2016, vol. III-1, pp. 201 - 208, available at:
<https://doi.org/10.5194/isprs-annals-III-1-201-2016>
19. Липанов С.И. Применение адаптивной развертки в лазерно-локационно-тепловизионной системе при маловысотном полете // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 5. С. 139 - 151.
20. Trickey E., Church P., Cao X. Characterization of the OPAL obscurant penetrating LiDAR in various degraded visual environments // Proc. Of SPIE, 16 May 2013, vol. 8737, doi: [10.1117/12.2015259](https://doi.org/10.1117/12.2015259)

21. Бельский А., Жосан Н., Гребенщиков В., Каргаев А., Брондз Д., Горбачев К., Воробьев Д. Лазерные локационные системы для повышения безопасности полетов вертолетов // Фотоника. 2013. № 5(41). С. 66 - 75.

22. Козинцев В.И., Белов М.Л., Орлов В.М. и др.; Основы импульсной лазерной локации / Под ред. В.Н. Рождествина. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. - 571 с.