

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 629.052.5: 528.851

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ВЫСОТОМЕРЫ-СКОРОСТЕМЕРЫ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ ДЛЯ БПЛА

В.Г. ВИЛЬНЕР, А.И. ЛАРЮШИН, А.С. РЯБОКУЛЬ

ОАО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха», г. Москва

В статье рассмотрены возможности создания новых лазерных высотомеров-скоростемеров (ВСЛ) за счет применения новых способов измерения высоты и вертикальной составляющей скорости БПЛА. Показана возможность реализации ВСЛ без дополнительного скоростемера, на основе базового высотомера ДЛ-5М. Это необходимо и актуально для мягкого взлета и мягкой посадки БПЛА по самолетному типу. Отпадает необходимость использования катапульты и парашюта, автоматизация раскрытия которого привязана к GPS или ГЛОНАСС. Предложены устройства для реализации предлагаемых модифицированных способов измерения высоты и вертикальной скорости. Исследованы основные характеристики ВСЛ.

Описана предлагаемая функциональная структура ВСЛ и особенности целей и помех при вертикальном зондировании. Даны основные энергетические и точностные расчетные соотношения, предложены процедуры оптимизации режима некогерентного накопления путем предварительной статистической обработки шумового процесса. Предложены полетные режимы работы аппаратуры и соответствующие функциональные структуры. Представлены расчетные результаты реализации ВСЛ.

Особенности лазерных высотомеров

В навигационных системах БПЛА необходимы приборы для определения текущего положения ЛА относительно местности и заданного профиля полетной траектории; автоматического контроля режима взлета и посадки; инспекции коммуникаций и сооружений и др. Этим требованиям отвечают высотомеры на полупроводниковых лазерах, работающие в моноимпульсном режиме или в режиме некогерентного накопления (рис.1) [1,2].

Новизной бортового высотомера, по сравнению с известными лазерными высотомерами, например ДЛ-5М [1], является измерение его вертикальной составляющей скорости для обеспечения мягкого взлета и мягкой посадки БПЛА по самолетному типу.

Вертикальное зондирование более благоприятно по сравнению с горизонтальным как энергетически, так и в плане помех. Однако при вертикальном зондировании более заметны неоднородности атмосферы, расположенные поперек трассы, – облачные и подоблачные аэрозольные структуры, приземная дымка. Характер их стратификации изучен теоретически и экспериментально. Структура атмосферных неоднородностей

также известна [6]. Эти данные позволяют моделировать сигналы рассеяния от таких образований для выбора оптимальных методов их обработки.

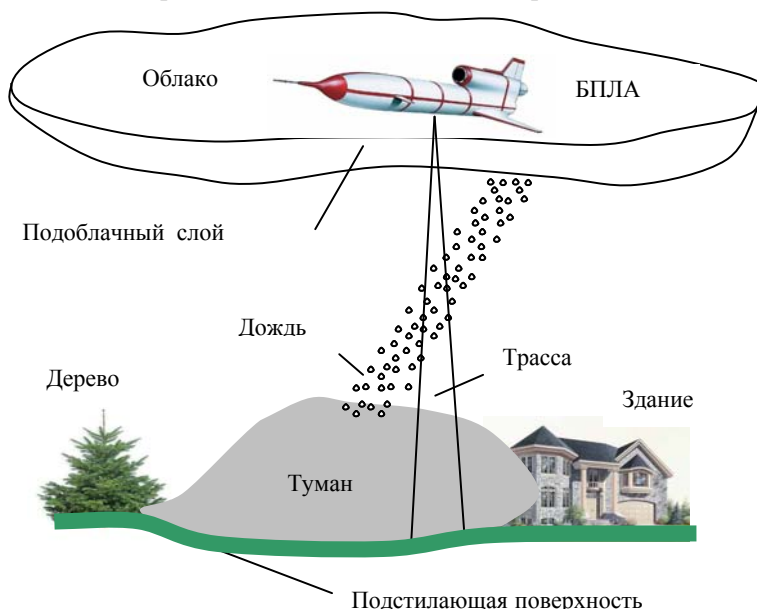


Рис. 1. Локационная обстановка – трасса, цели и помехи

Энергетический анализ

Диапазон измеряемых дальностей определяется энергетическим потенциалом дальномера с учетом аппаратных ограничений, например, влиянием теневой зоны. Дальность действия R определяется уравнением лазерной локации [1]:

$$E_{\min} < E_{\text{пр}} = E_0 \cdot K \cdot D_{\text{пр}}^2 \cdot \tau_a \tau_0 / 4R^2, \quad (1)$$

где $E_{\min}$ – реальная чувствительность фотоприемного устройства; $E_{\text{пр}}$ – энергия отраженного сигнала на чувствительном элементе приемника; E_0 – энергия зондирующего сигнала; K – коэффициент использования излучения целью; $D_{\text{пр}}$ – диаметр приемного объектива; τ_a – коэффициент пропускания атмосферы; τ_0 – коэффициент пропускания приемной оптики.

Расчетные характеристики ВСЛ (лазерного высотомера-скоростемера) представлены в таблице. Дальность действия $R = 1000$ м обеспечивается режимом некогерентного накопления [2].

Таблица

Расчетные характеристики ВСЛ

Характеристики дальномера-высотомера	Требование
Диапазон измеряемых дальностей, м	от 1 до 1000
Габариты цели, м ²	5x5
Коэффициент яркости цели	0,2
Рабочая длина волны, нм	900
Реальная чувствительность приемного канала, нВт	3
Мощность лазерного излучения на выходе дальномера, Вт	30
Длительность импульса лазерного излучения, нс	100
Частота лазерных излучений, 1/с	8000
Расходимость зондирующего пучка излучения, мрад	< 5

Коэффициент пропускания объектива приемного канала	0,9
Диаметр объектива приемного канала, мм	18
Частота обновления информации при высоте > 200 м, 1/с	10

Высотомер-скоростемер

Для обеспечения посадки по самолетному типу требуется постоянный и точный контроль высоты вплоть до приземления. На рис. 2 отмечены основные фазы полета ЛА, в каждой из которых предъявляются разные требования к высотомеру-скоростемеру.

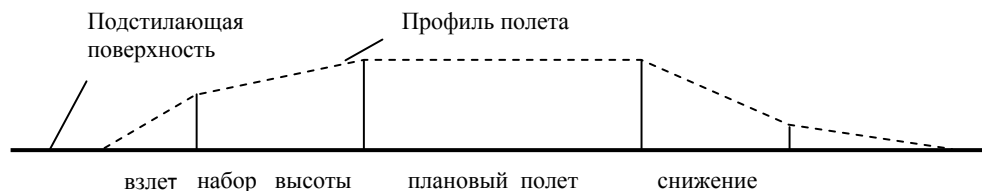


Рис. 2. Стадии полета БПЛА

На этапе взлета и набора высоты данные о высоте ЛА необходимы для обеспечения оптимального режима подъема за минимальное время и при минимальных энергетических затратах. В плановом полете данные о высоте и скорости нужны для точного эшелонирования ЛА по условиям управления полетом и для выполнения съемок местности, которые следует проводить с требуемой для построения сетки измерений достоверностью. При посадке нужны точные данные о высоте и скорости с высокой частотой обновления [4]. Параметры глиссады при посадке на аэрофинишер и соответствующие обозначения показаны на рис. 3 [3].

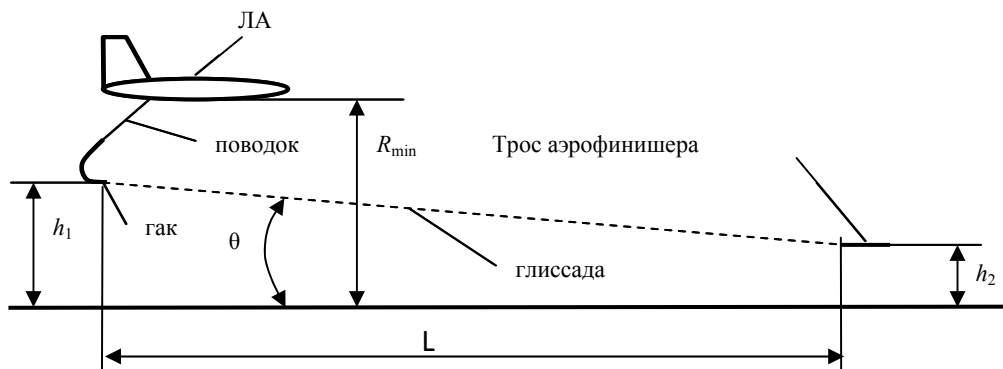


Рис. 3. Посадка БПЛА по самолетному типу на аэрофинишер

При высоте летательного аппарата $R > 200$ м моноимпульсный режим измерений не гарантируется имеющимся энергетическим потенциалом высотомера, и для измерений в этом диапазоне высот необходимо использовать метод некогерентного накопления [5]. При измерениях высоты алгоритм обработки информации остается неизменным, меняется только объем накопления N . Для измерения скорости приходится изменять метод обработки. В моноимпульсном режиме скорость V может быть определена по двум замерам высоты R_1 и R_2 , выполненным с интервалом времени (базой) T :

$$V = (R_2 - R_1) / T. \quad (2)$$

Погрешность такого измерения $\delta V = 2\delta R/T$. Обычно $\delta R = 2\text{--}10$ м. При базе $T = 0,1\text{--}0,4$ с δV может достигать $10\text{--}200$ м/с, что недопустимо. Рассматриваемая погрешность не содержит систематической составляющей, которая компенсируется при вычитании двух замеров дальности. Случайная составляющая погрешности может быть уменьшена путем усреднения результатов многократных измерений в режиме накопления:

$$\sigma_n = \sigma_1 \sqrt{n}, \quad (3)$$

При измерении скорости по результатам n измерений высоты R_i в моменты времени T_i оптимальная оценка скорости $V = V^*$ представляет собой наклон линии регрессии $R(T)$ с минимальным СКО от массива измерений дальности [4].

$$R(T) = V^* T + R_0^*, \quad (4)$$

где V^* и R_0^* – статистические оценки V и R_0 . При вычислении по методу наименьших квадратов эти оценки составляют:

$$V^* = \{n \sum_{i=1}^n R_i T_i - \sum_{i=1}^n R_i \sum_{i=1}^n T_i\} / \{n \sum_{i=1}^n T_i^2 - (\sum_{i=1}^n T_i)^2\}. \quad (5)$$

$$R_0^* (T_0) = \{ \sum_{i=1}^n T_i^2 \sum_{i=1}^n R_i - \sum_{i=1}^n T_i \sum_{i=1}^n R_i T_i \} / \{n \sum_{i=1}^n T_i^2 - (\sum_{i=1}^n T_i)^2\}. \quad (6)$$

Для равноотстоящих отсчетов с интервалом ΔT СКО оценки скорости

$$\sigma_{V^*} = \sigma_I \sqrt{\frac{12}{n(n-1)(n+1)}} / \Delta T. \quad (7)$$

Анализ показывает, что σ_{V^*} минимальна при максимальной концентрации моментов измерения в начале и конце интервала измерения. При этом СКО может быть уменьшена до 20% по сравнению с (7).

Предложения по оптимизации режима накопления

Для повышения оперативности измерений в режиме некогерентного накопления предлагается ограничивать объем накопления N необходимым и достаточным значением $N_{\min}$, определяемым в процессе измерений путем статистической обработки

накапливаемых сумм: $S = \sum_{i=1}^n R_i$ [2].

С этой целью выделяют M статистически независимых накопленных сумм S_{jm} в ячейках дальности, заведомо не содержащих цели, и по этой выборке определяют их среднеквадратическое отклонение (СКО) σ_S и среднее значение M_S . Здесь j – порядковый номер ячейки дальности, m – порядковый номер зондирования. Далее определяют порог накопления:

$$C_N = Q\sigma_S + M_S, \quad (8)$$

где Q – коэффициент превышения порога над шумом, определяемый из условия обеспечения заданных обнаружительных характеристик. Процесс накопления прекращают при количестве зондирований N , когда хотя бы в одной из ячеек дальности накопленная сумма S превысит пороговую величину C_N .

Количество M выборочных значений в этой группе предварительно устанавливают из условия обеспечения заданной точности оценок с помощью уравнения [2].

$$\int_{\sqrt{M-1}/(1+q)}^{\sqrt{M-1}/(1-q)} R(\chi, M) d\chi = \gamma, \quad (9)$$

где q – допустимая погрешность оценки; γ – надежность оценки;

$$R(\chi, M) = \frac{\chi^{M-2} e^{-\chi^2/2}}{2^{(M-3)/2} \Gamma(\frac{M-1}{2})}; \chi = (\sigma_S / \sigma) \sqrt{M-1}; \Gamma(x) = \int_0^x t^{x-1} e^{-t} dt;$$

$\sigma > 0$ – нормирующий параметр, имеющий размерность σ_S .

Вероятность правильного обнаружения сигнала во всем диапазоне измеряемых дальностей может быть увеличена [2], если в начале измеряемого интервала дальностей коэффициент Q устанавливают с превышением относительно среднего значения, а по мере увеличения порядкового номера j уменьшают Q таким образом, чтобы вероятность ложной тревоги во всем измеряемом диапазоне дальностей не превышала заданного предела. Начальное превышение коэффициента Q и его значения, соответствующие каждой дальности, задают из условия требуемой вероятности обнаружения сигнала в каждой из ячеек дальности.

Организация работы высотомера-скоростемера

Для измерений высоты и скорости в различных стадиях полета предложено переключать методы некогерентного накопления [4, 5] и интерполяции измерений. Дальномер должен иметь аппаратные средства и датчики для каждого режима и коммутирующие устройства для их переключения (рис. 4).

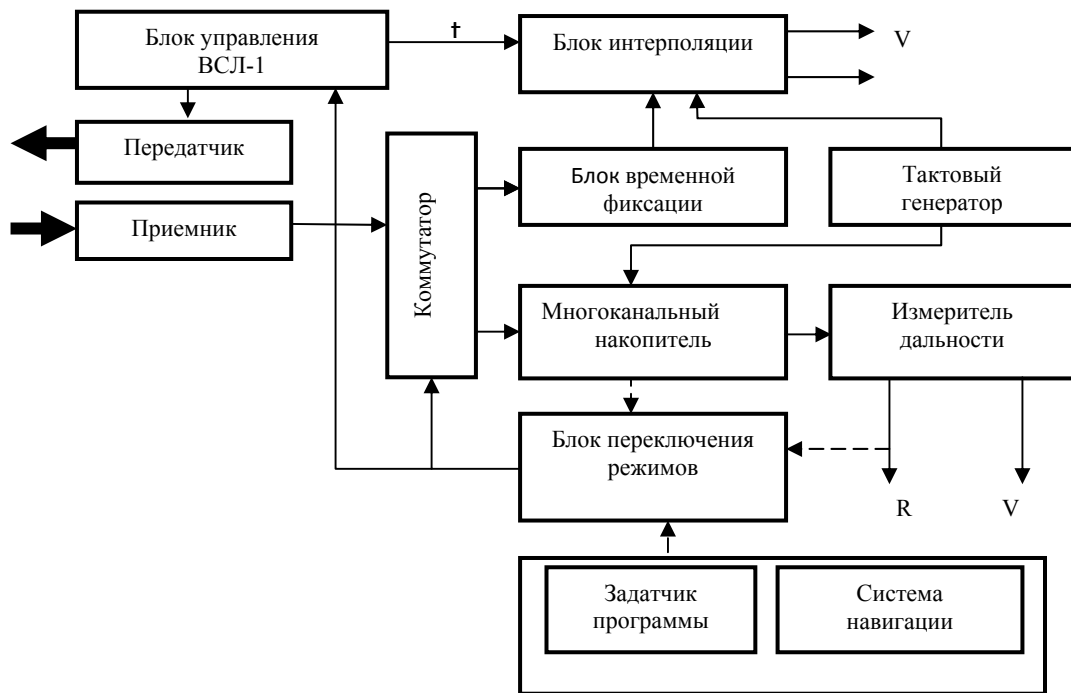


Рис. 4. Структура ВСЛ

На выходе приемника включен коммутатор с блоком переключения режимов. В режиме некогерентного накопления коммутатор подключает выход приемника к многоканальному накопителю, синхронизируемому стабильным тактовым генератором. В режиме интерполяции выход приемника переключается на блок временной фиксации, где фиксируются значения R_i и T_i , по которым блок интерполяции вычисляет оценки скорости и высоты ЛА. Переключение режимов может

осуществляться в зависимости от типа ЛА и ВСЛ, выполняемой полетной задачи, стадии полета, а также от состояния трассы.

В связи с тем, что уровень принимаемого сигнала зависит от высоты, по результату ее измерения можно включать нужный режим.

Если запас энергетического потенциала ВСЛ не гарантирует нормальную работу при заданном пороговом значении $R = R_{\text{пор}}$ во всех условиях, то целесообразно переключать режимы измерений по уровню принимаемого сигнала. Датчиком такого сигнала является аналогово-цифровой преобразователь многоканального накопителя.

В некоторых случаях переключение режимов измерения целесообразно осуществлять в зависимости от полетной стадии ЛА: например, при посадке включать режим интерполяции. Это можно делать по команде от задатчика программы полета, входящего в состав бортовой системы навигации и управления полетом, или по команде с наземного пункта управления.

Выводы

1. Лазерный высотомер-скоростемер (ВСЛ) для беспилотных летательных аппаратов представляет собой новый прибор лазерной локационной техники.

2. Предлагаемые средства измерения высоты и скорости для мягкого взлета и посадки БПЛА по самолетному типу согласно расчетам обеспечивают контроль вертикальной составляющей скорости до ~ 2 м/с с погрешностью $\sim 0,2$ м/с.

3. Модифицированные способы измерения высоты и скорости в зависимости от полетной задачи предложено реализовать устройствами: 1) с автономной системой управления (с борта); 2) с системой радиоуправления (с земли); 3) с переключением режимов по измеренной высоте (реализовано в ДЛ-5М).

Summary

Considerations are being proposed to the new class of airborne laser facilities for unmanned aerial vehicle (UAV), specifically concerning to the on-board laser altimeter and vertical speed gauge (LASG) combined in one device. LASG is designed on the base of conventional units of a laser rangefinder. Distinguishing constructional peculiarities of LASG and its application features are shown. LASG implements the two methods of speed measuring. The first method comprises non-coherent accumulation of receiving signals with calculating the speed as a difference of two measured ranges divided by interval of time between them. The second method employs the linear regression method by finding the straight line that provides the least squares fitting to a series of distances measured in the monopulse mode. The last method could be applied at low altitudes of UAV (< 200 m), giving most accurate results, while the first method is more appropriate for high altitudes (up to 1000 m), where monopulse mode is rather energetically deficient. The ways to optimize these methods are discussed for various flight stages with regard to a function to be performed. The prototype of LASG is described.

Keywords: *unmanned aerial vehicle (UAV), on-board laser altimeter, laser, maximum, minimum range, non-coherent accumulation, speed measuring.*

Литература

1. Вильнер В.Г., Волобуев В.Г., Ларюшин А.И., Рябокуль А.С. Достоверность измерений импульсного лазерного дальномера // Фотоника. 2013. № 3. С. 42-60.
2. Вильнер В.Г., Волобуев В.Г., Игнатьев Д.И., Казаков А.А., Рябокуль А.С. Способ некогерентного накопления светолокационных сигналов. // Патент РФ № 2455615 по заявке № 2011101613 от 18.01.2011.
3. Рябуха Н.Н. Способ посадки беспилотного самолета на аэрофинишер. // Патент РФ № 2399560 по заявке № 2009124730 от 30.06.2009.

4. Вильнер В.Г., Волобуев В.Г., Казаков А.А., Рябокуль Б.К. Пути достижения предельной точности лазерного скоростемера // Мир измерений. 2010. № 7. С. 17-21.

5. Вильнер В.Г., Ларюшин А.И., Рудь Е.Л. Оценка возможностей светолокационного импульсного измерителя дальности с накоплением // Фотоника. 2007. № 6. С. 22-26.

6. Дябин Ю.П., Марусяк В.Д., Мирумянц С.О., Танташев М.В. Вертикальные профили атмосферного аэрозоля в нижней тропосфере по результатам оптического зондирования // IV всесоюзный симпозиум по лазерному зондированию атмосферы. Тезисы докладов. Томск, 1976. С. 7-9.

Поступила в редакцию

23 апреля 2015 г.

Вильнер Валерий Григорьевич – главный специалист ОАО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха», г. Москва. Тел: 8(495)3330188, 8(916)0163310. E-mail: vvilner@mail.ru.

Ларюшин Александр Иванович – д-р техн. наук, профессор, начальник отделения ОАО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха», г. Москва. Тел: 8(495)7208558.

Рябокуль Артем Сергеевич – аспирант ОАО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха», г. Москва. Тел: 8(495)3330188.