

**А. Н. Виноградов, В. В. Егоров, А. П. Калинин,
А. И. Родионов, И. Д. Родионов, И. П. Родионова**

БОРТОВОЙ ЛАЗЕРНЫЙ ЛОКАТОР БЛИЖНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА

Представлено к печати
заведующим отделом ИКИ РАН
Р. Р. Назировым

Onboard near infrared band locator

*A. N. Vinogradov¹, V. V. Egorov², A. P. Kalinin³,
A. I. Podionov¹, I. D. Rodionov¹, I. P. Rodionova¹*

¹ Joint Stock Company "Scientific and Technical Center "Reagent", Moscow

² Space Research Institute of Russian Academy of Sciences (IKI RAN), Moscow

³ Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of Russian Academy of Sciences (IPMech RAS), Moscow

The problems of developing onboard multichannel near infrared locators for getting earth surface images and small object on it are considered. Different schemes of scanning locator beam (linear, circle and hyperbolic) are proposed. Two version of locator realization (direct detection and heterodyning of the input signal) are analyzing. Formulas for calculation of the ultimate sensing altitude, potential accuracy for velocity estimation, as well as results of these parameters calculations are given.

Keywords: laser, locator, direct detection, heterodyning, ultimate altitude, velocity

Бортовой локатор ближнего инфракрасного диапазона

*А. Н. Виноградов¹, В. В. Егоров², А. П. Калинин³,
А. И. Родионов¹, И. Д. Родионов¹, И. П. Родионова¹*

¹ Акционерное общество «Научно-технический центр «Реагент» (ЗАО «НТЦ «Реагент»), Москва

² Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва

³ Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского Российской академии наук (ИПМех РАН), Москва

Рассмотрены вопросы построения многоканальных бортовых локаторов ближнего ИК-диапазона, предназначенных для получения изображений земной поверхности и расположенных на ней объектов. Предложены различные схемы сканирования луча устройства: линейная, по отрезку окружности и по гиперболе. Анализируются два варианта реализации локатора: с прямым детектированием и с гетеродинированием входного эхо-сигнала. Приведены формулы расчёта предельной высоты зондирования при заданной величине отношения мощности сигнала к мощности шума, потенциальной точности оценки скорости полёта носителя, а также результаты расчётов указанных параметров.

Ключевые слова: лазер, локатор, прямое детектирование, гетеродинирование, предельная высота, скорость

ВВЕДЕНИЕ

Разработки, связанные с созданием активных оптических систем, относятся к началу 60-х годов 20-го века и обусловлены появлением источников когерентного излучения — лазеров. Одним из важных достоинств использования лазеров стала возможность осуществления когерентного приёма оптических сигналов посредством их гетеродинирования. В настоящее время актуальным направлением практического использования лазеров является лазерная локация, которой присущ ряд важных особенностей.

Во-первых, когерентность и малая длина волны излучения лазеров позволяют получать узкие диаграммы направленности (от единиц до десятков угловых секунд) даже при небольших размерах излучателей.

Во-вторых, временная и пространственная когерентность излучения лазеров обеспечивает стабильность частоты эхо-сигнала при высокой спектральной плотности мощности. Последнее, а также остронаправленность лазерного излучения обуславливают высокую помехоустойчивость лазерных локационных средств от воздействия естественных источников излучения и искусственных помех.

В-третьих, высокая частота колебаний приводит к большим доплеровским сдвигам частоты при взаимных перемещениях цели и локатора. Это обеспечивает высокую точность измерения скорости носителя, но требует расширения полосы пропускания приёмных устройств.

Лазерный локатор на практике исполняется в двух вариантах.

1. Приёмное устройство локатора использует принцип прямого детектирования эхо-сигнала (http://femto.com.ua/articles/part_1/0974.html). Такой подход к реализации локатора является достаточно традиционным. Он позволяет получать изображения зондируемой поверхности, однако при этом не сохраняется информация о частоте и фазе эхо-сигнала.
2. Приёмник построен по принципу гетеродинного, т.е. синхронного или когерентного детектирования (http://femto.com.ua/articles/part_1/0974.html), частным случаем которого является гомодинный приём эхо-сигнала, когда в качестве гетеродина используется

зондирующий сигнал передающего устройства локатора. Локатор позволяет получать изображения земной поверхности и расположенных на ней малоразмерных объектов. Кроме того, когерентный приём даёт возможность осуществлять выделение информации о частоте и фазе эхо-сигнала, проводить измерения скорости полёта носителя, реализацию интерферометрической обработки эхо-сигнала, а также обеспечивать более высокую помехоустойчивость работы локатора.

Важными достоинствами лазерных локаторов стала возможность функционирования вне зависимости от времени суток и условий освещённости, а также скрытность работы (особенно в ИК-диапазоне), что указывает на актуальность их разработки и совершенствования. Преимуществом локаторов ближнего ИК-диапазона и их аналогами, работающими в видимом диапазоне, является наличие более узкого спектра доплеровских флуктуаций эхо-сигнала и большие значения коэффициента спектральной яркости и спектрального альбеда, что делает их более чувствительными к обнаружению слабоконтрастных объектов.

Несмотря на то, что бортовые лазерные локаторы, как правило, одноканальные, начали активно внедряться в практику и даже поступают в открытую продажу, остаётся много нерешённых проблем, касающихся оптимальных способов сканирования, повышения помехоустойчивости локаторов, их пространственной разрешающей способности, определения максимальной высоты зондирования земной поверхности и др. Отдельно следует сказать об актуальности разработки многоканальных бортовых локаторов, способных обеспечивать потребителя многоспектральными изображениями земной поверхности и расположенных на ней малоразмерных объектов. Перспективность таких разработок связана с тем, что именно в спектре эхо-сигнала содержится вся информация о зондируемых объектах.

В связи с этим целью настоящей работы является описание принципов функционирования многоканальных (многоспектральных) бортовых локаторов ближнего ИК-диапазона, использующих как прямое, так и гетеродинное детектирование (гомодинный приём) входного эхо-сигнала, разработка структуры таких локаторов, расчёт предельной высоты зондирования и потенциальной точности оценки скорости полёта носителя.

МЕТОДЫ СКАНИРОВАНИЯ И ИХ ОСОБЕННОСТИ

Рассмотрим случай, когда локатор предназначен для дистанционного зондирования Земли и объектов, расположенных на земной поверхности, и устанавливается на авиационный носитель (вертолёт, БПЛА,

дельтаплан, низколетающий самолёт). В качестве передающего устройства локатора используется либо так называемый «цветной» лазер ближнего ИК-диапазона, либо несколько лазеров с различными длинами волн. Указанный диапазон обеспечивает скрытность работы локатора и увеличивает дальность (высоту) работы по сравнению с видимым диапазоном благодаря более высоким значениям спектрального альбеда. Мощность излучения локатора может при этом составлять десятые доли или единицы ватт.

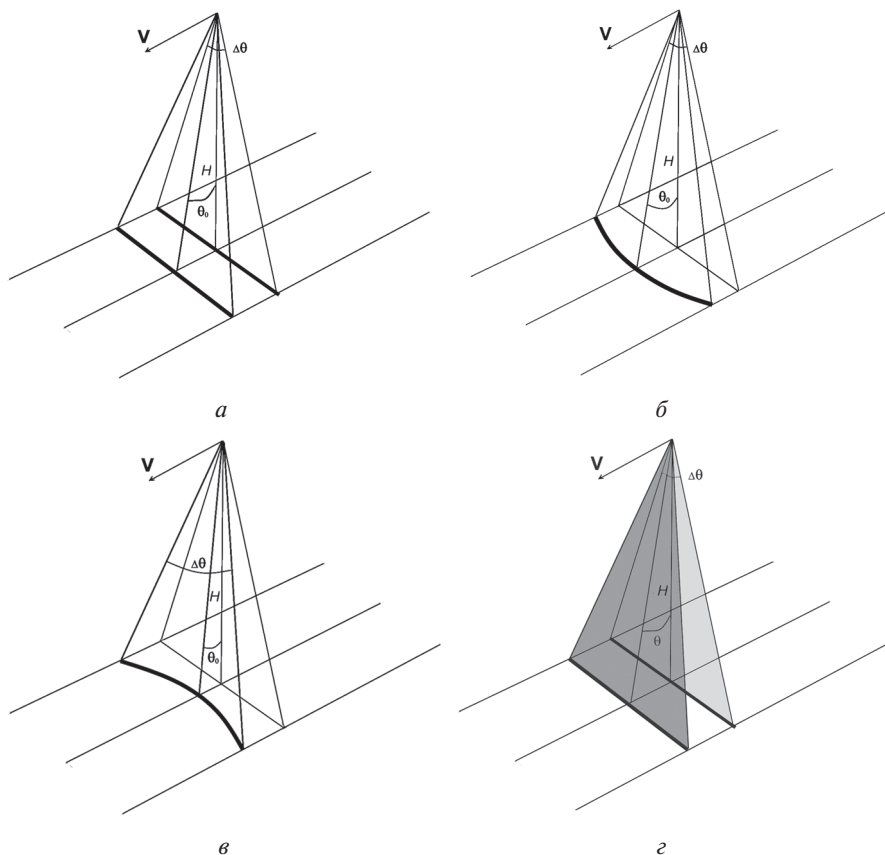


Рис. 1. Геометрия сканирования при прямом и гомодинном приёме: *a* — линейное сканирование в плоскости надира и линейное сканирование в плоскости, отклонённой на угол θ_0 от надира (whisk-broom); *б* — по окружности; *в* — по гиперболе; *г* — линейное веерное по типу push-broom (надирное и с отклонением). $\Delta\theta$ — угловая ширина полосы захвата, H — высота полёта, V — скорость полёта носителя

Для получения многоспектральных изображений земной поверхности узкий луч локатора подвергается сканированию поперёк трассы полёта носителя (whisk-broom), либо используется режим веерного излучения, аналогичный способу push-broom, при котором излучение и приём эхо-сигнала проводятся одновременно во всей угловой полосе захвата (рис. 1). Двумерное изображение зондируемой поверхности формируется за счёт поступательного движения носителя.

В случае реализации гомодинного приёма сканирование луча локатора осуществляется по образующей на земной поверхности, представляющей собой прямую линию, часть окружности, либо гиперболу (см. рис. 1) (Жуковский и др., 1979). Поверхности сканирования (фрагменты плоскости, конуса или гиперboloида) располагаются в этом случае перед нормалью с отклонением на небольшой угол θ_0 , что приводит к появлению доплеровского смещения эхо-сигнала. В варианте прямого детектирования и линейной образующей плоскости сканирования последняя ориентируется по надиру к поверхности, поскольку в этом случае не требуется обеспечения дополнительного доплеровского смещения эхо-сигнала.

Сканирование луча лазера по гиперболе (гомодинный приём), несмотря на дополнительную сложность его реализации, заслуживает внимания, поскольку позволяет получать наиболее узкие спектры доплеровских флуктуаций эхо-сигнала при постоянстве средней частоты доплеровского спектра. На рис. 1 z показан случай веерообразного зондирования в надир и при отклонении от нормали к поверхности по типу push-broom. С энергетической точки зрения такой метод зондирования эквивалентен случаю, показанному на рис. 1 a при одинаковой мощности излучения лазеров.

ЛАЗЕРНЫЙ ЛОКАТОР ПРЯМОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ

Локатор прямого детектирования выполнен по достаточно традиционной схеме. Блок-схема одного из его каналов приведена на рис. 2.

Эхо-сигнал через входной объектив поступает на узкополосный (шириной порядка 1 нм) режекторный фильтр (УРФ), предназначенный для выделения полезного сигнала данной длины волны λ_i и подавления паразитного сигнала фона, связанного с рассеянием солнечного света. Затем полезный сигнал подвергается усилению в квантовом усилителе (КВУ). Изменения интенсивности принимаемого излучения, усреднённые в интеграторе со сбросом (ИсСб) за время $T_y \gg T$, где T — период колебаний входного излучения, а также по площади фотокатода приёмника, преобразуются в изменения мощности выходного электрического сигнала, регистрируемого бортовым накопителем информации в виде

соответствующего одноканального изображения. Величина T_y равна времени, в течение которого элемент разрешения локатора на земле (пиксель) подвергается облучению при сканировании.

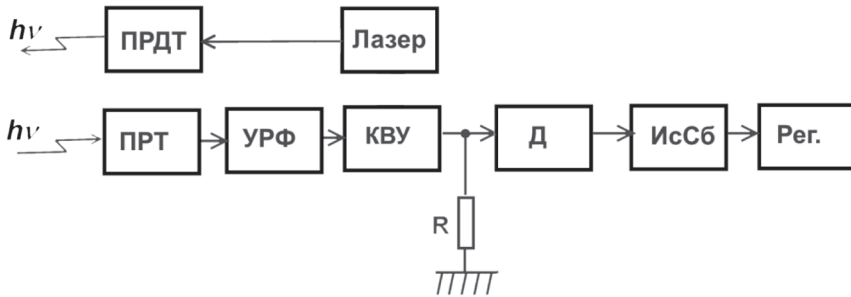


Рис. 2. Блок-схема одного из идентичных каналов локатора прямого детектирования. ПРДТ — передающий телескоп, ПРТ — приёмный телескоп, УРФ — узкополосный режекторный фильтр, КВУ — квантовый усилитель, Д — детектор, ИсСб — интегратор со сбросом, Рег. — регистрирующее устройство, R — активное сопротивление нагрузки

ЛАЗЕРНЫЙ ЛОКАТОР С ГЕТЕРОДИНИРОВАНИЕМ

Блок-схема одного из идентичных каналов локатора с гетеродинированием приведена на рис. 3.

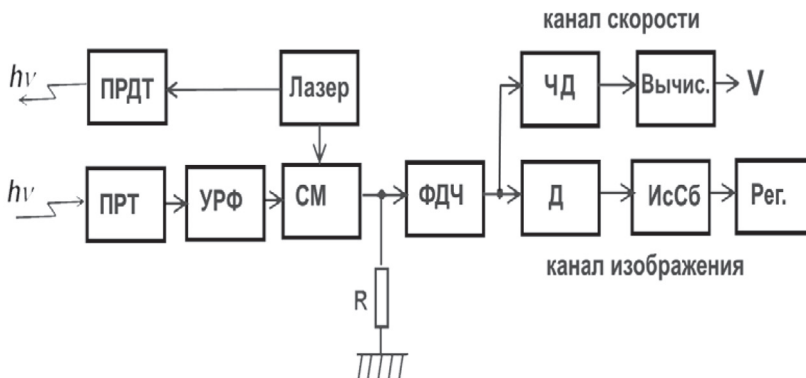


Рис. 3. Блок-схема одного из каналов бортового локатора с гетеродинированием. СМ — смеситель, ФДЧ — фильтр доплеровских частот, ЧД — частотный дискриминатор, Вычис. — вычислитель. Остальные обозначения аналогичны приведённым на рис. 2

При гетеродинном (гомодинном) приёме сигнал с выхода УРФ подаётся на смеситель — устройство в виде полупрозрачного зеркала или светоделительной призмы, обеспечивающее смешение световых потоков сигнала и гетеродина с последующей их подачей на смеситель. В случае взаимной когерентности излучений входного сигнала и сигнала лазерного гетеродина передающего устройства возможна реализация когерентной обработки для извлечения информации из фазовой структуры принимаемого оптического сигнала. С выхода смесителя сигнал подаётся на следящий фильтр доплеровских частот, полоса которого согласована с полосой сигнала. Далее, как и в случае с локатором прямого детектирования (см. рис. 2), следуют процедуры детектирования, интегрирования и регистрации и, в последующем, передачи на индикатор изображения.

ПРЕДЕЛЬНАЯ ВЫСОТА ЗОНДИРОВАНИЯ И ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ПОЛЁТА НОСИТЕЛЯ

Предельная высота зондирования

Случайный характер принимаемого локатором эхо-сигнала и присутствие аддитивных и мультипликативных шумов различной природы уменьшают потенциальную дальность (высоту) работы локатора. В приёмниках излучения различают радиационный (фотонный) шум, возникающий из-за флуктуаций потока квантов, падающих на фотоприёмную площадку, и флуктуаций потока квантов, излучаемых самим фотоприёмником в пространство, так как его температура отлична от абсолютного нуля. Эти шумы складываются с дробовым и тепловым шумом, а также с шумом темнового тока приёмника. Однако наибольший вклад в суммарную шумовую составляющую вносит именно радиационный (фоновый) шум. Поэтому в дальнейшем рассмотрении учитывается только этот вид шума.

Для расчёта предельной высоты $H_{\text{пр}}$ работы локатора, построенного по схеме прямого детектирования, используют формулу, аналогичную основной формуле радиолокации (Старовойтов, Савчук, 2014).

$$H_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{P_i d_{\text{вх}}^2 r_{\lambda_i} T_a^2}{4qP_{\text{пор}}}}, \quad (1)$$

где P_i — мощность i -го лазера многоканального локатора; $d_{\text{вх}}$ — диаметр входного объектива; r_{λ_i} — спектральное альbedo эхо-сигнала i -го канала; T_a — пропускание атмосферы; q — отношение мощности сигнала к мощности шума на выходе приёмного устройства; $P_{\text{пор}}$ — пороговая чувстви-

тельность приёмника, определяемая в первую очередь радиационным шумом (Старовойтов, Савчук, 2014).

Пороговая чувствительность определяется величиной удельной обнаружительной способности оптического приёмника D^* , эффективной полосой сглаживающего последетекторного фильтра $\Delta f_{\text{эфф}}$ и площадью чувствительного элемента A (в см^2) как

$$P_{\text{пор}} = \frac{\sqrt{\Delta f_{\text{эфф}} \cdot A}}{D^*}. \quad (2)$$

Эффективная полоса сглаживающего фильтра равняется обратной удвоенной величине времени зондирования элемента разрешения на земной поверхности $T_{\text{эфф}} = \frac{\delta^2}{2HV \cdot \text{tg}(\Delta\theta/2)}$, обеспечивающей отсутствие смаза изображения.

$$\Delta f_{\text{эфф}} = \frac{1}{2T_{\text{эфф}}} = \frac{HV \cdot \text{tg}(\Delta\theta/2)}{\delta^2}, \quad (3)$$

где $\delta = (\Delta\delta \cdot H)/f$ — величина линейной разрешающей способности локатора на земной поверхности (пикселя); $\Delta\delta$ — величина проекции элемента разрешения на фокальную плоскость; f — фокусное расстояние объектива.

Подставив выражение для δ в равенство (3), получим

$$\Delta f_{\text{эфф}} = \frac{Vf^2 \cdot \text{tg}(\Delta\theta/2)}{(\Delta\delta)^2 H}. \quad (3')$$

Тогда формула (2) преобразуется к виду

$$P_{\text{пор}} = \frac{1}{D^*} \sqrt{\frac{Vf^2 \cdot \text{tg}(\Delta\theta/2) \cdot A}{(\Delta\delta)^2 H}}. \quad (4)$$

Положим, что $\Delta\delta$ равна линейному размеру чувствительного элемента (детектора), т.е. $A^{1/2}$. Поскольку A входит в формулу (4) в сантиметрах, а остальные пространственные величины имеют размерность метр, то $(\Delta\delta)^2 = A/10^4$. В этом случае формула (4) приобретает вид

$$P_{\text{пор}} = \frac{100}{D^*} \sqrt{\frac{Vf^2 \cdot \text{tg}(\Delta\theta/2)}{H}}. \quad (4')$$

Подставляя (4') в выражение (1) и выполняя необходимые преобразования окончательно получим

$$H_{\text{пр}} = \sqrt[3]{\frac{P_{\text{л}}^2 d_{\text{вх}}^4 r_{\lambda_i}^2 T_{\text{а}}^4 (D^*)^2}{16 \cdot 10^4 q^2 f^2 V \cdot \text{tg}(\Delta\theta/2)}}. \quad (5)$$

Формула (5) справедлива для локатора с прямым детектированием. Для сенсора с гетеродинированием входного сигнала используется формула, аналогичная выражению (1), однако в ней величина пороговой мощности шума $P_{\text{пор}}$ вследствие достаточно высоких значений средней частоты доплеровского смещения сигнала будет определяться, в основном, тепловым шумом

$$P_{\text{пор}} = kT_0 \Delta f_{\text{д}} F, \quad (6)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана; T_0 — температура окружающей среды приёмника, полоса доплеровских частот преобразованного сигнала, K ; F — шум-фактор приёмника; $f_{\text{д}} \approx (2V/\lambda) \Delta\theta_{\text{л}}$ — полоса доплеровских частот преобразованного сигнала; $\Delta\theta_{\text{л}}$ — угловая ширина луча локатора; λ_i — длина волны лазера.

Следует отметить, что формулы (1) и (5) носят довольно общий характер и справедливы для любых длин волн оптического диапазона и, следовательно, могут с успехом использоваться при проектировании многоканальных локаторных систем. В этом случае блок — схемы одноканальных локаторов (см. рис. 2 и 3) в отношении их передающей части должны быть модифицированы за счёт применения нескольких передающих лазеров, работающих на нескольких длинах волн. Выбор длин волн таких лазеров будет определяться перечнем задач, решаемых многоканальным локатором, а также условиями пропускания излучения ближнего ИК-диапазона через атмосферу. На рис. 4 приведены графики пропускания волн оптического диапазона стандартной атмосферы для двух высот при наблюдении с Земли (<http://www.astronet.ru/db/msg/1188575>).

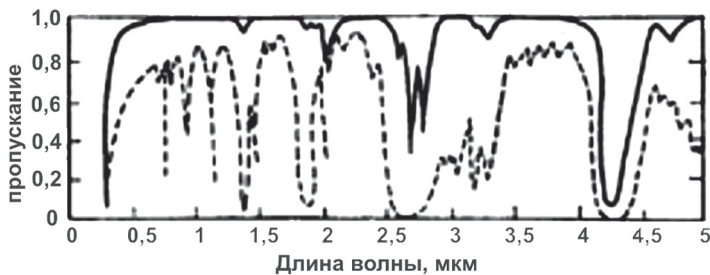


Рис. 4. Пропускание волн видимого, ближнего и среднего инфракрасного диапазона атмосферой. Сплошной линией показано пропускание на уровне моря, пунктирной — для слоя атмосферы от уровня моря до высоты 4,2 км

Как следует из анализа графика на рис. 4, для случая слоя атмосферы в 4,2 км наибольшим пропусканием в ближнем ИК-диапазоне (до 2,5 мкм) обладают следующие длины волн: 1,04; 1,15; 1,55 и 2,15 мкм. Именно эти длины волн могут быть рекомендованы для использования в многоканальных локаторах.

Потенциальная точность измерения скорости полёта носителя

Приведённые ниже соотношения относятся к локатору с гетеродинным приёмом входного сигнала. Действительно, когерентный приём позволяет извлекать из полезного сигнала информацию о частотном сдвиге, вызванном движением носителя относительно земной поверхности. Данные о скорости полёта носителя могут использоваться для автономного числения пути носителя.

Потенциальная точность измерения скорости носителя, т.е. среднеквадратическая погрешность σ_V рассчитывается по формуле (7). Она практически равна точности измерения скорости при использовании частотного дискриминатора с расстроенными каналами (Бакут и др., 1964):

$$\sigma_V = \frac{\lambda}{2} \sqrt{\frac{2\Delta f_d}{T_\phi \sqrt{q}}}, \quad (7)$$

где T_ϕ — постоянная времени сглаживающего фильтра.

ПРИМЕРЫ РАСЧЁТОВ

Ниже приводятся примеры расчёта максимальной высоты зондирования для обоих типов локаторов и потенциальной точности измерения скорости полёта носителя с учётом следующих начальных параметров: полёт горизонтальный со скоростью 200 км/ч; фокусное расстояние объектива $f = 0,0154$ м; угловая полоса захвата $\Delta\theta = 9^\circ$; длина волны локатора $\lambda = 1,55$ мкм; мощность излучения 0,6 Вт; $d_{\text{вх}} = 0,02$ м; величина r_λ принята равной 0,3; $T_\phi = 1$ с, $\Delta\theta_d = 2 \cdot 10^{-3}$ рад; величина угла отклонения плоскости сканирования от нормали $\theta_0 = 10^\circ$; $D^* = 6 \cdot 10^{12}$ (для детектора InGaAs) (Piotrovski, Rogalski, 2007); отношение мощности сигнала к мощности шума $q = 10$; $F = 5$; $T_0 = 300$ К; пропускание атмосферы средней мутности принято равным $T_a = 0,165$ (Kneizys et al., 1996).

Подставляя соответствующие значения параметров в выражение (6) для локатора с прямым детектированием получим, что $H_{\text{пр}} = 3025$ м. Для локатора с гетеродинированием величина предельной высоты зондирования с учётом формул (1) и (7) при $T_a = 0,165$ будет равна 2440 м.

Для величины потенциальной точности оценки скорости имеем $\sigma_V = 1,65 \cdot 10^{-4}$ м/с.

Высокая потенциальная точность измерения скорости обусловлена малой длиной волны эхо-сигнала и, как следствие, повышенной чувствительностью доплеровского смещения к изменению скорости полёта носителя относительно зондируемой поверхности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Бортовой локатор ближнего ИК-диапазона, работающий независимо от времени суток, представляет собой перспективный сенсор, предназначенный для дистанционного зондирования Земли с авиационных носителей. Локатор обладает скрытностью работы и достаточно высоким энергетическим потенциалом, обеспечивающим приемлемый уровень отношения сигнал/шум. В частности, как показывают расчёты, это отношение для локатора с длиной волны 1,55 мкм равняется 10 при полёте на высотах до 3 км. Потенциальная точность измерения скорости полёта носителя составляет единицы и даже доли сантиметров в секунду. Локатор может быть выполнен как по схеме прямого детектирования, так и в виде сенсора с гетеродинированием. Сенсор, выполненный по схеме прямого детектирования, достаточно прост в реализации. Выполнение же процедуры смещения эхо-сигнала с опорным излучением в гетеродинном варианте представляется достаточно сложным с практической точки зрения. Поэтому, несмотря на высокую точность измерения скорости локатором с гетеродинированием, предпочтительнее выглядит вариант с прямым детектированием.

Активный лазерный локатор может успешно применяться с воздушных платформ для решения задач дистанционного зондирования Земли, экологии, навигации летательных аппаратов, а также оборонных задач.

В части разработки конструкции локатора работа выполнена в рамках государственного заказа № гос. рег. АААА-А17-117112240026-5, в части расчетов предельной высоты зондирования и потенциальной точности измерения скорости полёта носителя — в рамках государственных заказов № гос. рег. АААА-А17-117021310376-4 и АААА-А18-118022790133-1.

ЛИТЕРАТУРА

Бакут П. А., Большаков И. А., Герасимов Б. М. и др. Вопросы статистической теории радиолокации / под общей ред. Г. П. Тартаковского. М.: Сов. радио, 1964. Т. 2. 1047 с.

- Жуковский А. П., Оноприенко Е. И., Чижов В. И.* Теоретические основы радиовысотометрии / под ред. А. П. Жуковского. М.: Сов. радио, 1979. 320 с.
- Старовойтов Е. И., Савчук Д. В.* Программа «МИТРА» для моделирования характеристик бортовых лазерных локационных систем космических аппаратов // Электрон. журн. «Труды МАИ». 2014. № 75. С. 1-17.
- Kneizys F. X., Robertson D. C., Abreu D. C. et al.* The MODTRAN 2/3 Report and LOWTRAN 7 Model / Phillips Laboratory, Geophysics Directorate. 1996.
- Piotrowski J., Rogalski A.* High-operating temperature infrared photodetectors. SPIE Press, 2007. 240 p.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Методы сканирования и их особенности	4
Лазерный локатор прямого детектирования.....	6
Лазерный локатор с гетеродинированием.....	7
Предельная высота зондирования и потенциальная точность измерения скорости полёта носителя	8
Предельная высота зондирования	8
Потенциальная точность измерения скорости полёта носителя	11
Примеры расчётов.....	11
Заключение.....	12
Литература.....	12