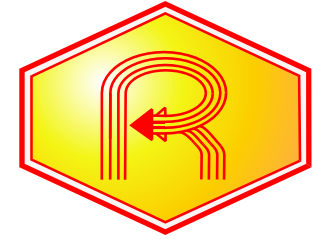


# БОРТОВОЙ ЛАЗЕРНЫЙ ЛОКАТОР БЛИЖНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА



ИИ

А.Н. Виноградов<sup>1</sup>, В.В. Егоров<sup>2</sup>, А.П. Калинин<sup>3</sup>, А.И. Родионов<sup>1</sup>, И.Д. Родионов<sup>1</sup>, И.П.Родионова<sup>1</sup>



<sup>1</sup>Закрытое акционерное общество «НТЦ «Реагент», 119991 Москва, Косыгина 4, irodionov@reagent-rdc.ru

<sup>2</sup>Институт космических исследований РАН, 117993 Москва, Профсоюзная 84/32, victor\_egorov@mail.ru

<sup>3</sup>Институт проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН, 119526 Москва, Вернадского 101, к 1, kalinin@ipmnet.ru

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 явилась возможность осуществления когерентного приема оптических сигналов, посредством их гетеродинирования. В настоящее время актуальным направлением практического использования лазеров является лазерная локация, которой присущ ряд важных особенностей.

Лазерный локатор на практике исполняется в двух вариантах.

1. Приемное устройство локатора использует принцип прямого детектирования эхо-сигнала.

2. Приемник построен по принципу гетеродинного, т.е. синхронного или когерентного детектирования, частным случаем которого является гомодинный прием эхо-сигнала, когда в качестве сигнала гетеродина используется зондирующий сигнал передающего устройства локатора.

Важными достоинствами лазерных локаторов являются: возможность функционирования вне зависимости от времени суток и условий освещенности, а также скрытность работы (особенно в ИК-диапазоне), что указывает на актуальность их разработки и совершенствования. Преимуществом локаторов ближнего ИК-диапазона перед их аналогами, работающими в видимом диапазоне, является наличие более узкого спектра доплеровских флуктуаций эхо-сигнала и большие значения коэффициента спектральной яркости (КСЯ) и спектрального альbedo, 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, остается много нерешенных проблем, касающихся оптимальных способов сканирования, повышения помехоустойчивости лидаров 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 и разработка структуры многоканальных (многоспектральных) бортовых локаторов ближнего ИК-диапазона, использующих как прямое, так и гетеродинное детектирование (гомодинный прием) входного эхо-сигнала, расчет их предельной высоты зондирования и потенциальной точности оценки скорости полета носителя.

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

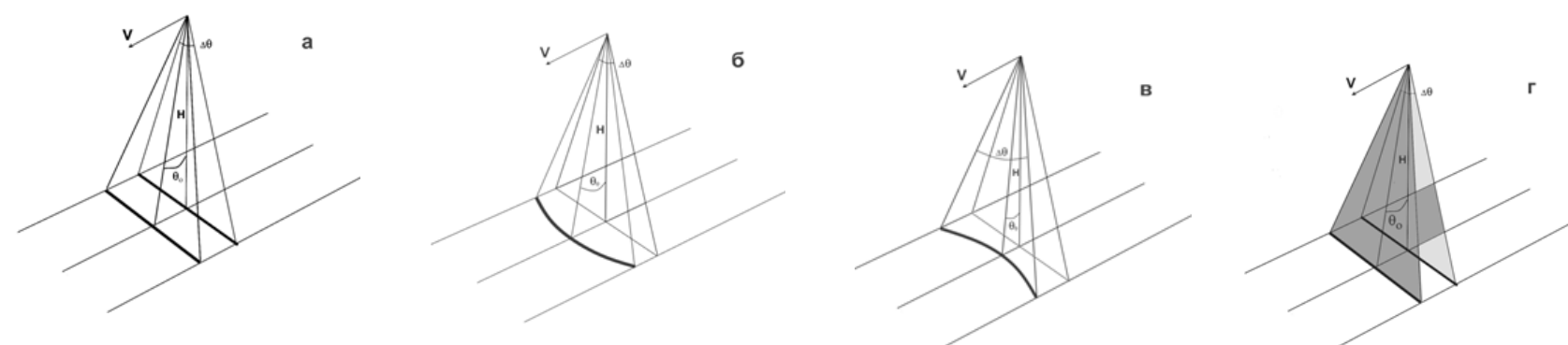


Рис. 1. Геометрия сканирования при прямом и гомодинном приеме: а – линейное сканирование в плоскости надира и линейное сканирование в плоскости, отклоненной на угол  $\theta_0$  от надира (whisk-broom); б – по окружности; в – по гиперболе, г – линейное веерное по типу push-broom (надирное и с отклонением);  $\Delta\theta$  - угловая ширина полосы захвата,  $H$  – высота полета;  $V$  – скорость полета носителя.

## ЛАЗЕРНЫЙ ЛОКАТОР ПРЯМОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ

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

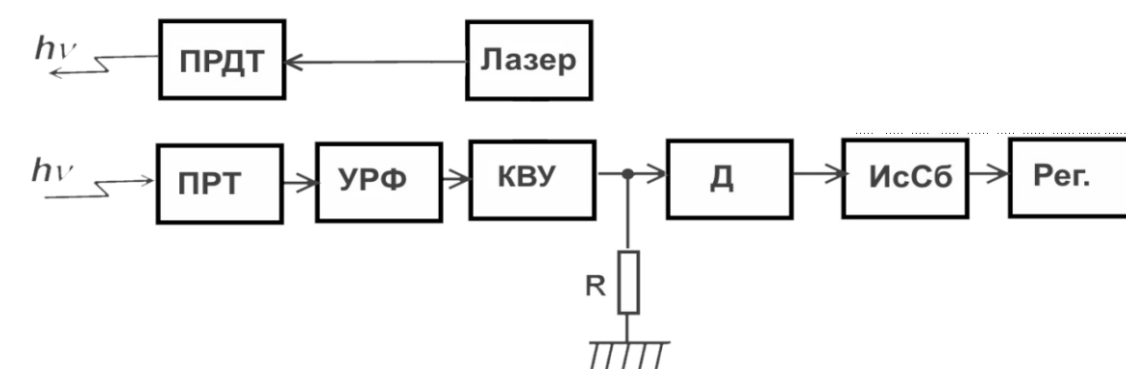


Рис. 2. Блок-схема одного из идентичных каналов локатора прямого детектирования. ПРДТ – передающий телескоп, ПРТ – приемный телескоп, УРФ – узкополосный режекторный фильтр, КВУ – квантовый усилитель, Д – детектор, ИсСб – интегратор со сбросом, Рег. – регистрирующее устройство, R – активное сопротивление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

Эхо-сигнал через входной объектив поступает на узкополосный (шириной порядка 1 нм) режекторный фильтр (УРФ), предназначенный для выделения полезного сигнала данной длины волны  $\lambda$  и подавления паразитного сигнала фона, связанного с рассеянием солнечного света. Затем полезный сигнал подвергается усилению в квантовом усилителе (КВУ). Изменения интенсивности принимаемого излучения, усредненные 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 лидара на земле (пиксел) подвергается облучению при сканировании.

## ЛАЗЕРНЫЙ ЛОКАТОР С ГЕТЕРОДИНИРОВАНИЕМ

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

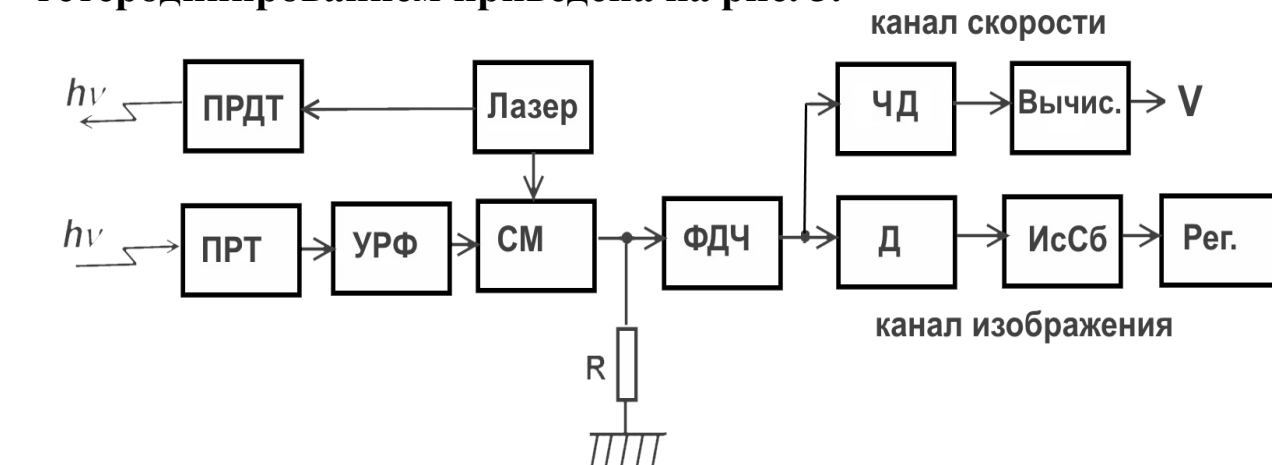


Рис. 3. Блок-схема одного из каналов бортового локатора с гетеродинированием. СМ – смеситель, ФДЧ – фильтр доплеровских частот, Рег. – регистрирующее устройство, ФД – частотный дискриминатор, Вычис. – вычислитель. Остальные обозначения аналогичны приведенным на рис. 2

При гетеродинном (гомодинном) приеме сигнал с выхода УРФ подается на смеситель - устройство в виде полупрозрачного зеркала или светоделительной призмы, обеспечивающее смещение 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 подается на следующий фильтр доплеровских частот, полоса 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 ИЗ МЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ПОЛЕТА 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 приемниках излучения различают радиационный (фотонный) шум, возникающий из-за флуктуаций потока квантов, падающих на фотоприемную площадку, и флуктуаций потока квантов, излучаемых самим фотоприемником 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 расчета предельной высоты  $H_{np}$  работы лидара, построенного по схеме прямого детектирования, используют формулу, аналогичную основной формуле радиолокации.

$$H_{np} = \sqrt{\frac{P_i \cdot d_{bx}^2 \cdot r_{\lambda}^2 \cdot T_a^2}{4 \cdot q \cdot P_{пор}}}$$

где  $P_i$  – мощность  $i$ -го лазера многоканального локатора,  $d_{bx}$  – диаметр входного объектива,  $r_{\lambda}$  – спектральное альbedo эхо-сигнала  $i$ -го канала,  $T_a$  – пропускание атмосферы,  $q$  – отношение мощности сигнала к мощности шума на выходе приемного устройства,  $P_{пор}$  – пороговая чувствительность приемника, определяемая в первую очередь радиационным шумом.

Пороговая чувствительность определяется величиной удельной обнаружительной способности оптического приемника  $D^*$ , эффективной полосой сглаживающего последетекторного фильтра и площадью чувствительного элемента  $A$  в  $cm^2$  как

$$P_{пор} = \sqrt{\frac{\Delta f_{эфф} \cdot A}{D^*}}$$

Эффективная полоса сглаживающего фильтра равняется обратной удвоенной величине времени зондирования элемента разрешения на земной поверхности, отсюда  $\Delta f_{эфф} = \frac{\delta^2}{2 \cdot H \cdot V \cdot tg \frac{\Delta\theta}{2}}$

$$\Delta f_{эфф} = \frac{1}{2T_{эфф}} = \frac{H \cdot V \cdot tg \frac{\Delta\theta}{2}}{\delta^2}$$

где  $\delta$  - величина линейной разрешающей способности лидара на земной поверхности (пиксела),  $\Delta\delta$  – величина проекции элемента разрешения на фокальную плоскость;  $f$  – фокусное расстояние объектива.

Подставив выражение для  $\delta$  в равенство для  $\Delta f_{эфф}$  получим

$$\Delta f_{эфф} = \frac{V \cdot f^2 \cdot tg \frac{\Delta\theta}{2}}{(\Delta\delta)^2 \cdot H}$$

Тогда формула для  $P_{пор}$  преобразуется к виду

$$P_{пор} = \frac{1}{D^*} \sqrt{\frac{V \cdot f^2 \cdot tg \frac{\Delta\theta}{2} \cdot A}{(\Delta\delta)^2 \cdot H}}$$

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

$$P_{пор} = \frac{100}{D^*} \sqrt{\frac{V \cdot f^2 \cdot tg \frac{\Delta\theta}{2}}{H}}$$

Выполняя необходимые преобразования окончательно получим

$$H_{np} = \sqrt[3]{\frac{P_i^2 \cdot d_{bx}^4 \cdot r_{\lambda}^2 \cdot T_a^4 \cdot (D^*)^2}{16 \cdot 10^4 \cdot q^2 \cdot f^2 \cdot V \cdot tg \frac{\Delta\theta}{2}}}$$

Эта формула справедлива для лидара с прямым детектированием. Для сенсора с гетеродинированием входного сигнала используется аналогичная формула, однако в ней величина пороговой мощности шума  $P_{пор}$ , вследствие достаточно высоких значений средней частоты доплеровского смещения сигнала, будет определяться, в основном, тепловым шумом

$$P_{пор} = kT_0 \Delta f_{д} F$$

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

### Потенциальная точность измерения скорости полета носителя

Потенциальная точность измерения скорости носителя, т.е. среднеквадратическая погрешность  $\sigma_V$  рассчитывается по формуле, приведенной ниже. Она практически равна точности измерения скорости при использовании частотного дискриминатора с разностными каналами.

$$\sigma_V = \frac{\lambda}{2} \sqrt{\frac{2\Delta f_{д}}{f \cdot \sqrt{q}}}$$

где  $T_{ф}$  – постоянная времени сглаживающего фильтра.