

БОРТОВОЙ ЛАЗЕРНЫЙ ЛОКАТОР БЛИЖНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА



ИКИ

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



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

²Институт космических исследований РАН, 117993 Москва, Профсоюзная 84/32, victor_egorov@mail.ru

³Институт 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.

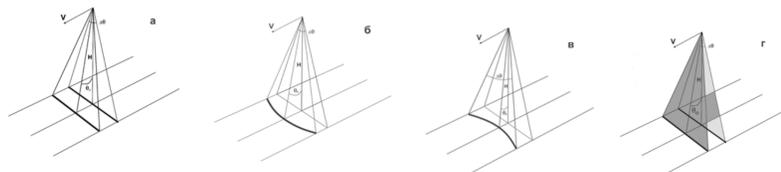


Рис. 1. Геометрия сканирования при прямом и гомодинном приеме: а – линейное сканирование в плоскости надира и линейное сканирование в плоскости, отклоненной на угол θ_0 от надира (whisk-broom); б – по окружности; в – по гиперболе, г – линейное веерное по типу push-broom (надирное и с отклонением); $\Delta\theta$ - угловая ширина полосы захвата, H – высота 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.

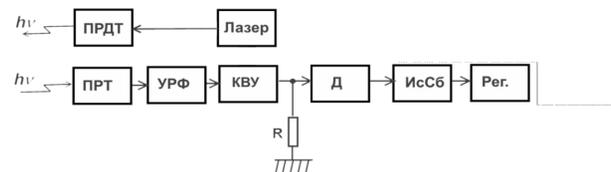


Рис. 2. Блок-схема одного из идентичных каналов локатора прямого детектирования. ПРДТ – передающий телескоп, ПРТ – приемный телескоп, УРФ – узкополосный режекторный фильтр, КВУ – квантовый усилитель, Д – детектор, ИсСб – интегратор со сбросом, Рег. – регистрирующее устройство, R – активное сопротивление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

Эхо-сигнал через входной объектив поступает на узкополосный (шириной порядка 1 нм) режекторный фильтр (УРФ), предназначенный для выделения полезного сигнала данной длины волны λ 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.

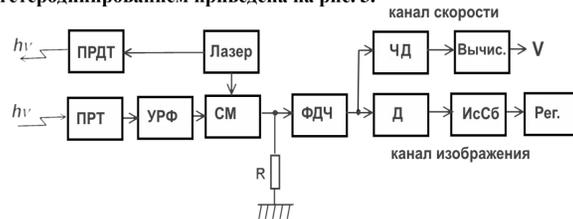


Рис. 3. Блок-схема одного из каналов бортового локатора с гетеродинированием. СМ – смеситель, ФДЧ – фильтр доплеровских частот, Рег. – регистрирующее устройство, ФД – частотный дискриминатор, Вычис. – вычислитель. Остальные обозначения аналогичны приведенным на рис. 2

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 темного 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_{λ} – 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 δ - 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 δ 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, λ – 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, λ – длина волны лазера.

Потенциальная точность измерения скорости полета носителя

Потенциальная точность измерения скорости носителя, т.е. среднеквадратическая погрешность σ_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.