

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫХ МИНИАТЮРНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ДАЛЬНОМЕРОВ, ВЫСОТОМЕРОВ И ДАТЧИКОВ ДЛЯ БОРТОВЫХ И ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

© 2011 г. В. Н. Легкий*, доктор техн. наук; Б. В. Галун*, канд. техн. наук; С. А. Литвиненко**;
О. В. Санков**; В. А. Шумейко**; И. Ю. Баласов***; А. О. Башмаков***

* Филиал производственного объединения “Уральский оптико-механический завод им. Э.С. Яламова” Урал-СибНИИОС”, г. Новосибирск

** Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск

*** Научно-исследовательский институт электронных приборов, г. Новосибирск

E-mail: sniios@mail.ru

В высокоточных комплексах, на летательных аппаратах, на транспорте необходимо измерять текущее расстояние до поверхности земли, воды или иного объекта, фиксировать заданные значения расстояния от 1 до 200 м, либо обнаруживать объекты в радиусе 1–50 м в условиях наличия аэрозольных помех, атмосферных образований, частичной задымленности. Для создания малогабаритных помехоустойчивых быстродействующих оптико-электронных систем ближней локации оптимальным является импульсный метод измерения малых расстояний по задержке принятого импульса относительно излученного. Приведены результаты, свидетельствующие о возможности создания унифицированных бортовых оптико-электронных импульсных систем.

Ключевые слова: полупроводниковые лазеры, светодиоды, импульсные высотомеры, дальномеры, датчики, помехоустойчивость.

Коды OCIS: 250.0250

Поступила в редакцию 23.08.2010

Введение

Основным требованием к оптико-электронным системам ближней локации (СБЛ) является обеспечение минимальной вероятности ложных измерений по пассивным аэрозольным помехам, таким как дым, пыль, туман, облачность, осадки. По отношению к помехозащитности другие важнейшие характеристики (дальность действия, точность, быстродействие, габариты) являются противоречивыми. Часто бортовая СБЛ взаимодействует со скоростным объектом лишь доли микросекунды.

Выполнение требований к перспективным унифицированным приемно-передающим модулям оптических СБЛ возможно на основе использования импульсного метода дальнометрии в интервале расстояний $R = 1\text{--}200$ м при использовании сигналов малой длительности ($\tau_{\text{и}} = 1\text{--}30$ нс). Реализация импульсного метода предполагает создание наносекундных полу-

проводниковых излучателей, широкополосных фотоприемных модулей и миниатюрных процессорных устройств обработки.

Для минимизации вероятности выполнения ложных измерений по пассивным помехам и для увеличения дальности действия в замутненной среде предлагается введение адаптации к случайным условиям (дальность, отражательные свойства поверхности, скорость, прозрачность атмосферы). По мере прохождения интервалов расстояния (в процессе полета или сопровождения по дальности) производится согласованное управление основными параметрами модуля генератора накачки лазера, фотоприемного устройства (ФПУ) и модуля цифрового стробирования-селекции.

Регулируются следующие параметры:

- мощность и длительность излучаемых импульсов, при необходимости и частота их повторения,
- ширина полосы пропускания и коэффициент передачи ФПУ,

• пороговый уровень регистрации принимаемых сигналов и алгоритм их цифровой обработки.

При малом расстоянии до поверхности для повышения точности измерений излучаются короткие импульсы (единицы наносекунд), амплитуда принимаемого сигнала значительно превышает уровень шума и можно применять широкополосные ФПУ. При большом расстоянии до поверхности излучаются импульсы длительностью в десятки наносекунд. При этом может быть сужена полоса пропускания ФПУ, снижен уровень шума, увеличено усиление, в результате чего обеспечивается дальность действия СБЛ с приемлемой точностью.

Постановка задачи

При создании СБЛ с широким интервалом $R_{\min} - R_{\max}$ надо задать вектор-варианты для нескольких (например, шести) уровней адаптации по расстоянию. Так же вектор-варианты параметров могут быть приняты для разработанных унифицированных приемно-передающих модулей, предназначенных для измерений в относительно узких интервалах расстояний, например: $R = 3-6$ м, $R = 6-12$ м, $R = 12-20$ м и т. д. Параметры унифицированных модулей для специальных датчиков к конкретным системам определяются требованиями по дальности действия, точности, защищенности от пассивных помех и вероятности пропуска цели из-за помех.

Выбранные с учетом опыта разработки импульсных оптико-электронных устройств [2-5] вектор-варианты параметров модулей приведены в табл. 1.

В СБЛ, как правило, достаточно обеспечить погрешность измерения $\Delta R < 0,2R$, т. е. выбирается длительность фронта излучаемого импульса $\tau_{\text{фр}} = 2\Delta R/c$, где c – скорость света. Для гаус-

сова импульса можно принять $\tau_{\text{фр}} = \tau_{\text{и}}$. Импульсная мощность излучения $P_{\text{изл}}$ определяется расстоянием до объекта, для реального генератора накачки лазера: при большей длительности импульса может быть больше ток накачки и мощность. Полоса пропускания ФПУ Δf задается для каждого значения длительности импульса из компромиссных соображений – обеспечение приемлемого уровня шума при допустимых потерях амплитуды и искажениях принимаемого сигнала (затягивание фронта импульса). На выходе ФПУ длительность фронта импульса равна

$$\tau_{\text{фр вых ФПУ}} = (\tau_{\text{фр изл}}^2 + t_{\text{нар ПХ}}^2)^{1/2},$$

где $t_{\text{нар ПХ}} = 0,35/\Delta f$ – время нарастания переходной характеристики ФПУ.

Дисперсия дробового шума фотодиода рассчитывается по формуле:

$$D_{\text{ф}} = (P_{\text{пор}} S_{\text{фд}} R_{\text{э}})^2.$$

Для фотодиода ФД-256 порог чувствительности в единичной полосе составляет около $P_{\text{пор}} = 10^{-12}$ Вт/Гц^{1/2}, а крутизна характеристики $S_{\text{фд}} = 0,6$ А/Вт. Если известны темновой $I_{\text{т}}$ и фоновый $I_{\text{ф}}$ токи фотодиода, можно также воспользоваться выражением: $D_{\text{ф}} = q(I_{\text{т}} + I_{\text{ф}})R_{\text{э}}^2 \Delta f$. Дисперсия шума усилителя, приведенного ко входу, равна $D_{\text{у}} = N_{\text{ш}}^2 \Delta f$, где $N_{\text{ш}}$ – ЭДС шума транзистора первого каскада в единичной полосе. Для полевого транзистора 3П345А-2 $N_{\text{ш}} \leq 1,4$ нВ/Гц^{1/2}. Дисперсия шума эквивалентного сопротивления нагрузки фотодиода $R_{\text{э}}$ находится по формуле Найквиста $D_{\text{н}} = 4kT\Delta f R_{\text{э}}$, где $k = 1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К, T – абсолютная температура. Суммарное напряжение шума, приведенное ко входу усилителя, составляет $U_{\text{ш}\Sigma} = (D_{\text{ф}} + D_{\text{н}} + D_{\text{у}})^{1/2}$.

Эквивалентное сопротивление нагрузки фотоприемника (ФП) $R_{\text{э}}$ включает в себя соединенные параллельно цепи – резистор в цепи

Таблица 1. Заданные вектор-варианты параметров импульсных модулей СБЛ

№ п/п	$R (R_i)$, м	$\Delta R/R$, %	$P_{\text{изл}}$, Вт	$\tau_{\text{и}}$, нс	Δf ФПУ, МГц	$U_{\text{ш}\Sigma}$, мкВ	$R_{\text{э}}$, кОм	$K_{\text{преобр}}$, В/Вт
В1	3-6(4)	15-20	25	3	100	12	2	1200
В2	6-12 (8)	15-20	40	5	80	16	3	1800
В3	12-20(16)	10-15	60	10	60	38	10	6000
В4	20-26(25)	10-15	80	20	20	80	30	18 000
В5	26-32(32)	8-10	100	40	10	114	60	36 000
В6	32-40(36)	8-10	150	50	8	130	60	36 000

фотодиода и входное сопротивление усилителя. Для увеличения амплитуды импульса на входе усилителя $R_э$ должно быть максимально возможным, но есть и ограничение, связанное с ростом инерционности фотоприемника $T_{фп} = R_э C$, где C – суммарная емкость фотодиода, входа усилителя и монтажа. Амплитуда сигнала на выходе фотоприемника определяется как

$$U_c = P_{вх} S_{фд} R_э = P_{вх} K_{преобр},$$

где $P_{вх}$ – мощность оптического импульса на входе приемника.

Значения коэффициента преобразования фотоприемника $K_{преобр}$ приведены в табл. 1.

Энергетические параметры СБЛ

Для расчета энергетических параметров модулей высотомера используется формула светолокации [1]. Высотомер, содержащий излучатель и фотоприемник, расположен на расстоянии R от диффузно-отражающей поверхности с коэффициентом отражения ρ . При узкой диаграмме направленности передатчика весь световой поток попадает на отражающую поверхность. В первом приближении можно принять, что вся энергия равномерно отражается в полусферу. Тогда оптическая мощность, которая принимается фотоприемником, пропорциональна отношению площади входного окна оптической системы ФПУ к площади полусферы S_R радиуса R . В итоге мощность импульса на входе фотоприемника $P_{вх}$ равна

$$P_{вх} = P_{изл} k_0 \frac{S_{пр}}{S_R} \rho f(\beta), \quad (1)$$

где $P_{изл}$ – импульсная мощность излучателя, k_0 – коэффициент пропускания оптических систем высотомера, ρ – коэффициент отра-

жения, $f(\beta)$ – индикатриса рассеяния поверхности, β – угол между нормалью к плоскости отражающей поверхности и оптической осью приемника.

Площадь выходного окна оптической системы ФПУ $S_{пр}$ выражается через диаметр объектива d , а площадь полусферы – через расстояние R . Тогда

$$P_{вх} = P_{изл} \frac{k_0 d^2}{8R^2} f(\beta) \rho. \quad (2)$$

Если рассеяние излучения на малой частице среды происходит равновероятно во всех направлениях, то величина индикатрисы рассеяния есть постоянная величина, которая равна единице. Индикатриса рассеяния реальной диффузной поверхности в направлении “назад”, т. е. в сторону фотоприемника, должна учитывать отличие реального косинусного закона для диффузно-отражающей поверхности от принятого условно равномерного отражения в полусферу в формуле (1). Соответственно значение индикатрисы рассеяния для направлений измерения, близких к нормали относительно поверхности, принимается в ближней локации равное двум: $f(\beta \cong 180^\circ) = 2$.

При работе высотомера в замутненной среде с коэффициентом рассеяния σ необходимо учитывать коэффициент ослабления сигнала по закону Бугера $K_{осл} = \exp(-2\sigma R)$.

В результате окончательное выражение для мощности излучения на входе фотоприемника принимает вид

$$P_{вх} = P_{изл} \frac{k_0 d^2 \rho}{4R^2} \exp(-2\sigma R). \quad (3)$$

Характеристики импульсных лазерных высотомеров для принятых вектор-вариантов параметров приведены в табл. 2. Вариант 1

Таблица 2. Рассчитанные характеристики импульсных оптико-электронных СБЛ

№ п/п	$P_{вх}$, мкВт	U_c , мВ	$U_{ш\sigma}$, мкВ	Сигнал/шум	Сигнал/порог	$\sigma_{предОСЛ}$, 1/м	$\sigma_{предЛТ}$, 1/м
В1	9,3–2,3	11,2–2,8	27,7	400–100	40,0–10,0	0,617–0,192	0,45
В2	2,1	3,75	25,6	146,5	14,65	0,168	0,3
В3	0,78	4,68	39,3	119,1	11,91	0,0774	~0,2
В4	0,43	7,71	80,0	96,4	9,64	0,045	~0,1
В5	0,33	11,76	114,0	103,2	10,32	0,0365	~0,05
В6	0,39	13,93	100,0	139,3	13,93	0,0366	≤0,05

рассчитан по формулам (1–3) для интервала изменения расстояния $R = 3–6$ м, варианты 2–6 рассчитаны для средних значений расстояния R_i : 8, 16, 25, 32 и 36 м соответственно. При расчете приняты значения: диаметр входного окна оптической системы ФПУ $d = 0,02$ м, отношение порог/шум равно 10.

Предельный коэффициент рассеяния $\sigma_{\text{предОСЛ}}$ при ослаблении излучения в атмосфере, когда невозможно принять отраженный от объекта сигнал (пропуск объекта), рассчитывается из условия $P_{\text{вх}} = P_{\text{пор}}$:

$$\sigma_{\text{предОСЛ}} = \ln(P_{\text{вх}}/P_{\text{пор}})/2R.$$

Точность измерения расстояния

Случайные факторы (отражательные свойства объекта, ослабление в среде на дистанции) приводят к погрешности измерения задержки импульса в пределах длительности фронта. Эта погрешность может быть переведена в систематическую ошибку по информации об амплитуде принимаемого импульса. Адаптивный уровень пороговой обработки устанавливается с учетом амплитуды принятого сигнала. В результате случайные свойства среды и объекта не будут приводить к погрешности измерения расстояния $\Delta R = c\tau_{\text{фр}}/2$ при умеренно широкой полосе ФПУ. Например, при длительности фронта импульса на выходе ФПУ $\tau_{\text{и}} = 5$ нс предлагаемый алгоритм обработки сигнала снизит погрешность фиксации дальности с $\Delta R = 0,76$ м ($\Delta R/R = 12\%$ для $R = 6$ м) до $\Delta R = 0,09$ м, что будет соответствовать величине отношения $\Delta R/R = 1,5\%$.

Наносекундная длительность импульсов позволяет увеличить частоту их повторения до значений 20–50 кГц без превышения предельной средней мощности лазерного излучателя, что важно для СБЛ, устанавливаемых на скоростные носители.

Для высотометров с осевым направлением диаграмм направленности при большом диапазоне изменения угла подхода носителя относительно нормали к поверхности φ (например, авиационные средства пожаротушения), добавляется погрешность, пропорциональная значению $\cos\varphi$. Без введения поправки на угол φ возможна погрешность $\Delta R/R = 6,4\%$ при угле подхода $\varphi = \pm 20^\circ$ и $\Delta R/R = 10,4\%$ при угле $\varphi = \pm 25^\circ$. При $\varphi = \pm 30^\circ$ погрешность составляет $\Delta R/R = 15,5\%$.

Помехоустойчивость импульсной СБЛ

Из табл. 2 следует, что отношение сигнал-порог составляет 10–40. Этот энергетический запас обеспечивает работоспособность высотометра в замутненной атмосфере при коэффициенте рассеяния $\sigma_{\text{предОСЛ}}$, который для первых трех вектор-вариантов составляет $0,077–0,192 \text{ м}^{-1}$.

Уровень оптического сигнала помехи на входе ФПУ, приводящий к ложным измерениям расстояния (к ложным тревогам срабатываниям датчиков СБЛ), рассчитывается из условия $P_{\text{пом}} = P_{\text{пор}}$ по экспериментальным графикам на рис. 1, измеренным в условиях полунатурных испытаний в камере искусственных туманов (коэффициент пересчета $K_{\text{пер}} = 0,125 \text{ мкВт/мВ/Вт}$ получен в расчете на единицу излучаемой импульсной мощности через амплитуду сигнала тестового фотоприемника) [1–6]. До значения коэффициента рассеяния помехи $\sigma < \sigma_{\text{предЛТ}}$ (свойственных вероятным по плотности облачности, осадкам, туманам, пылевым и дымовым облакам) ложные измерения и срабатывания предотвращаются путем типовой пороговой обработки сигналов без анализа их формы.

Экспериментальная зависимость амплитуды помехового сигнала от коэффициента σ для четырех длительностей импульсов $\tau_{\text{и}} = 60$ нс, $\tau_{\text{и}} = 15$ нс, $\tau_{\text{и}} = 9,5$ нс, $\tau_{\text{и}} = 1,5$ нс показана на рис. 1. Принимаемый сигнал (рис. 2) содержит импульс, отраженный от тумана, а также импульс от поверхности объекта ($\rho = 0,1$).

Эксперимент показывает, что высокая разрешающая способность коротких импульсов

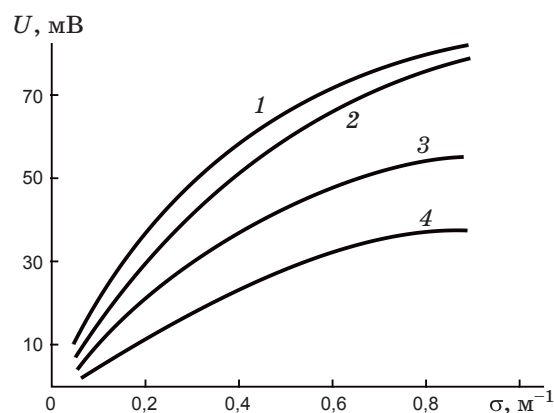


Рис. 1. Зависимость амплитуды сигнала помехи от коэффициента рассеяния σ : 1 – $\tau_{\text{и}} = 60$ нс, 2 – $\tau_{\text{и}} = 15$ нс, 3 – $\tau_{\text{и}} = 9,5$ нс, 4 – $\tau_{\text{и}} = 1,5$ нс.

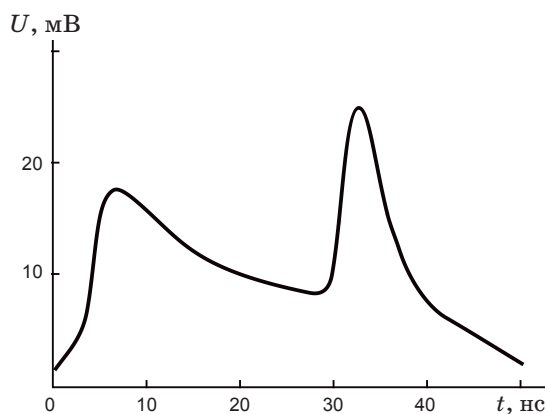


Рис. 2. Форма принимаемого сигнала от объекта в аэрозольном облаке: интервал 0–30 нс – сигнал рассеяния тумана с коэффициентом рассеяния $\sigma = 0,4 \text{ м}^{-1}$; интервал 30–50 нс – суммарный сигнал от тумана и поверхности щита ($\rho = 0,1$) на расстоянии 4 м от СБЛ.

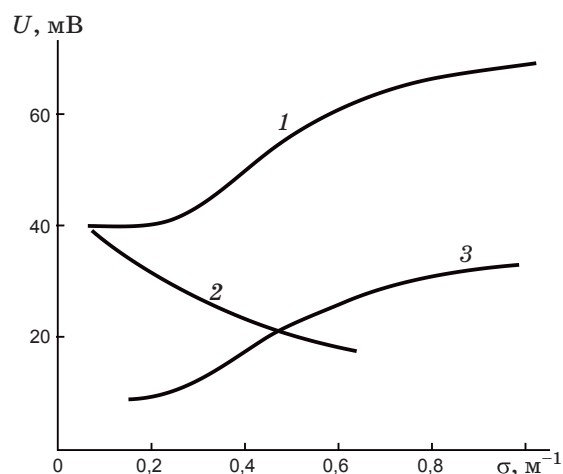


Рис. 4. Зависимости амплитуды сигналов от σ для поверхности с $\rho = 0,1$ на расстоянии $L = 4 \text{ м}$: 1 – амплитуда импульса от тумана и поверхности при $\tau_{\text{и}} = 60 \text{ нс}$, 2 – амплитуда импульса от поверхности при $\tau_{\text{и}} = 5 \text{ нс}$, 3 – амплитуда импульса от тумана при $\tau_{\text{и}} = 5 \text{ нс}$.

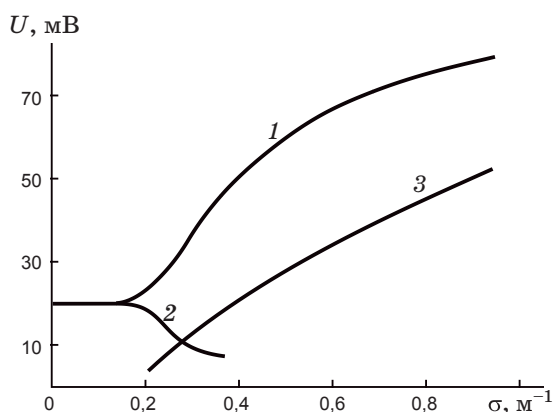


Рис. 3. Зависимости амплитуды сигналов от σ для поверхности с $\rho = 0,1$ на расстоянии $L = 6 \text{ м}$: 1 – амплитуда импульса от тумана и поверхности при $\tau_{\text{и}} = 60 \text{ нс}$, 2 – амплитуда импульса от поверхности при $\tau_{\text{и}} = 5 \text{ нс}$, 3 – амплитуда импульса от тумана при $\tau_{\text{и}} = 5 \text{ нс}$.



Рис. 5. Образец СБЛ (размеры $25 \times 50 \times 50 \text{ мм}$).

позволяет разделить во времени помеховый и полезный сигналы (рис. 3, 4: нарастающая и спадающая кривые соответственно). То есть за счет стробирования или путем фиксации последнего принимаемого в пределах дистанции импульса можно селективировать сигнал объекта. При длительности импульсов $\tau_{\text{и}} > 20 \text{ нс}$ мощность помехового и полезного сигналов суммируется и их временное разделение невозможно.

В древесных дымах (имеющих менее вытянутую вперед индикатрису рассеяния) экспериментально показано, что основная доля отраженной мощности формируется в слое меньшей

глубины. В результате зависимость амплитуды помехового сигнала $P_m(\sigma)$ имеет экстремум при $\sigma = 0,1 \div 0,3 \text{ м}^{-1}$.

Переход к наносекундным зондирующим импульсам приводит к снижению мощности помехи обратного рассеяния в 1,2 раза в маловероятных очень плотных аэрозольных средах, а при среднем коэффициенте рассеяния $\sigma = 0,1 \text{ м}^{-1}$ выигрыш достигает 5,5 раз для $\tau_{\text{и}} = 1,5 \text{ нс}$ по сравнению с $\tau_{\text{и}} = 50 \text{ нс}$. Анализ структуры помеховых сигналов, проведенный с учетом влияния кромки аэрозольных образований и функции перекрытия диаграмм оптических систем, позволяет определить длительность излучаемых

импульсов, обеспечивающую помехоустойчивую работу оптоэлектронных дальномерных систем. На рис. 5 представлен малогабаритный лазерный измеритель расстояния до поверхности в пределах 1–40 м. Прибор может применяться как бортовой высотомер на различных летательных аппаратах.

Выводы

Наносекундные оптические системы ближней локации обеспечивают решение широкого ряда практических задач и найдут применение в изделиях двойного назначения с крупносерийным и массовым производством.

ЛИТЕРАТУРА

1. Легкий В.Н., Топорков В.Д. Лазерные системы ближней локации. Оптоэлектронные датчики. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. 152 с.
 2. Легкий В.Н., Миценко И.Д. А. с. № 194086. Импульсный лазерный передатчик. 1983.
 3. Легкий В.Н., Миценко И.Д., Галун Б.В. Малогабаритные генераторы накачки полупроводниковых лазеров. Томск: Радио и связь, 1990. 216 с.
 4. Легкий В.Н. Генераторы наносекундного и субнаносекундного диапазона длительностей для накачки инжекционных лазеров // Автометрия. 2002. Т. 38. № 6. С. 121–124.
 5. Легкий В.Н. Анализ энергетических параметров систем ближней локации // Автометрия. 2002. Т. 38. № 6. С. 115–120.
 6. Легкий В.Н., Галун Б.В., Санков О.В. Оптоэлектронные элементы и устройства систем специального назначения. Новосибирск: Издательство НГТУ, 2011. 450 с.
-