

ЛАЗЕР С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ В ЛОКАТОРАХ С «ПАЧЕЧНЫМ» СИГНАЛОМ

Васильев В.П., Глущенко Н.Ф., Знаменский И.В., Сумерин В.В.
(ФГУП "Научно-исследовательский институт прецизионного
приборостроения", niipp20@niipp-moskva.ru)

В системах оптической локации, устанавливаемых на ИСЗ, требуются высокие энергии излучения (>0.1 Дж) и малые длительности излучения (<20 нс) для обеспечения высокого разрешения по дальности, а также большой ресурс работы ($>10^5$ излучений). Этим требованиям удовлетворяют твердотельные лазеры с диодной накачкой. Большое количество лазерных диодов при их высокой цене ограничивает их применение. Уменьшение количества лазерных диодов возможно при распределении необходимой энергии излучения на несколько импульсов («пачку»). Преимуществом «пачечного» сигнала является возможность увеличения энергии излучения лазера в «пачке» без увеличения мощности источника накачки.

Рассмотрены особенности построения космического лазерного дальномера с использованием «пачечного» сигнала на основе лазера с диодной накачкой.

Для обработки принимаемого сигнала использован метод когерентного после-детекторного сложения всех импульсов «пачки». Определено граничное значение длительности «пачки».

Проведено сравнение энергетических характеристик моноимпульсного дальномера и дальномера с пачечным сигналом. Получена зависимость коэффициента снижения энергии отдельного импульса от числа импульсов в «пачке», позволяющая определить требования и оптимизировать параметры лазера.

1. Введение

Работа оптических систем локации обычно основывается на так называемом моноимпульсном режиме, когда параметры объекта измеряются по одному лазерному импульсу.

Использование лазерных дальномеров для определения высоты орбиты космического аппарата (КА) накладывает ряд существенных

требований на используемую аппаратуру. К ним относится малая длительность ($\sim 7 \dots 15$ нс) излучения лазера при расходимости излучения < 1 мрад, высокий КПД при энергии лазера $(0,1 \dots 0,3)$ Дж и ресурсе работы 10^5 излучений. Всем этим требованиям отвечает лазер АИГ с полупроводниковой накачкой.

В последнее время в качестве источников накачки применяются лазерные диоды, которые обладают рядом достоинств: компактностью, высокой эффективностью, узкой спектральной полосой излучения, высокой яркостью. Создание мощных лазерных диодных линеек (ЛДЛ) и решеток (ЛДР) с удельной мощностью $(20-30)$ Вт/мм при постоянном снижении стоимости привело к их широкому применению в качестве непрерывных источников накачки твердотельных лазеров. Эффективность таких лазеров достигает 15% и более [1-3].

Известны также разработки лазеров с импульсной диодной накачкой, но обеспечение высоких уровней энергии излучения требует большого числа лазерных диодов, что усложняет конструкцию и увеличивает габариты. Основное достоинство диодной накачки - эффективность - перечеркивается высокой ценой лазерных диодов и линеек (стоимость одной линейки типа АТС-Q100-11 мощностью 100 Вт составляет $\sim \$1300$). При большом числе используемых диодных источников стоимость таких лазеров резко возрастает, что ограничивает их применение. Например, для лазера на гранате с энергией излучения 100 мДж требуемая мощность линеек составляет ~ 3 кВт. Стоимость линеек с такой мощностью ($\sim \$40000$) может составить основную часть стоимости лазера.

Решение этого вопроса возможно при использовании активных сред с большим временем жизни метастабильного уровня τ . Например, кристалл ИЛФ, активированный ионами Nd, (Nd:YLF) имеет время жизни $\tau = 0,54$ мс - в два раза большее, чем гранат (Nd:YAG) (0,24 мс). Использование кристалла ИЛФ позволяет снизить необходимую мощность накачки и соответственно число диодных линеек более чем в 1,5 раза.

Другим решением является использование «пачечного» режима лазерного локатора, когда для измерения характеристик объекта используется не один импульс с энергией E_0 , а пачка N_n импульсов с меньшей энергией E_n , следующих с периодом T_n . Период следования импульсов в «пачке» приближенно равен интервалу накачки и ограничен временем жизни активной среды τ лазера. Процесс

зондирования в таком случае распределяется на время, равное длительности пачки импульсов t_n , необходимая энергия излучения лазера также распределяется на N_n импульсов. При этом энергия излучения в пачке несколько больше энергии одиночного импульсного излучения, обеспечивающего тактико-технические характеристики дальномера.

Данная работа посвящена количественной оценке характеристик обнаружения «пачечного» сигнала по сравнению с моноимпульсным зондированием.

2. Особенности дальномеров с «пачечным» сигналом

Длительность «пачки» много больше длительности моноимпульса. Поэтому существуют ограничения на диапазон измеряемых дальностей для выбранной частоты повторения излучения «пачки» и длительности «пачки».

Будем считать, что фотодетектор (ФЭУ или лавинный фотодиод) имеет усиление $M_{фд}$ и коэффициент шума F . Проведем упрощенный анализ, т.е. не будем учитывать темновой ток, т.к. в нашем случае им можно пренебречь.

Пусть коэффициент передачи последетекторного фильтра равен 1. Импульсная характеристика фильтра имеет вид прямоугольника, т.е. амплитудно-частотная характеристика фильтра представляется в виде $SIN(\omega t_p/2) / (\omega t_p/2)$.

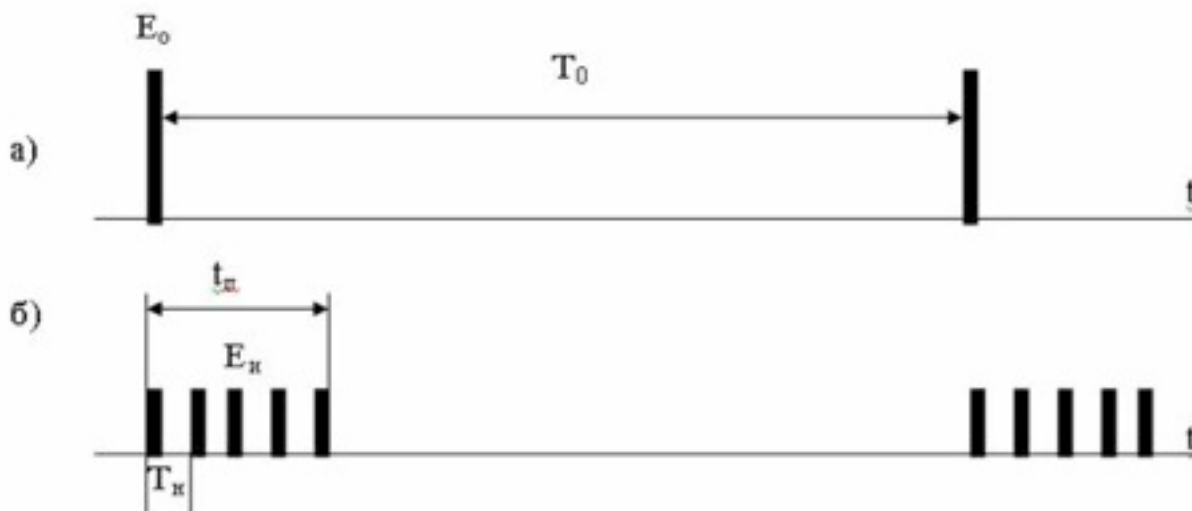


Рис.1. Временная диаграмма зондирующего сигнала: а) моноимпульсный сигнал, б) пачечный сигнал.

При отсутствии априорной информации о дальности, длительность «пачки» импульсов зависит от расстояния H до зондируемого объекта согласно неравенству

$$t_{\text{п}} < \frac{2H}{c} < T_{\text{о}} - t_{\text{п}} \quad -1$$

где c – скорость света, $t_{\text{п}}$ – длительность пачки, $T_{\text{о}}$ – период зондирования или период излучения импульсов моноимпульсного локатора.

Число импульсов в пачке определяется формулой

$$N_{\text{и}} = 1 + t_{\text{п}}/T_{\text{и}} \quad -2$$

Полная энергия импульсов излучения в пачке $E_{\text{п}} = N_{\text{и}} E_{\text{и}}$ определяется из условия сохранения характеристик обнаружения, обеспечиваемых в моноимпульсном режиме. Здесь $E_{\text{и}}$ – энергия одного импульса излучения при «пачечном» зондировании.

На рис.1 представлена временная диаграмма зондирующего сигнала для двух случаев: моноимпульсного и «пачечного» зондирования.

3. Вопросы согласования оптических полей приемника и передатчика

При установке дальномера на борту космического аппарата (КА) возникает эффект скоростной абберации. Для ее компенсации оптическую ось фотоприемника смещают относительно оси передатчика в сторону, противоположную направлению движения КА.

Угол скоростной абберации находится из выражения

$$j_{\text{аб}} = 2 * V / C,$$

где: V – скорость космического аппарата, C – скорость света.

При $V = 7,8 \text{ км/с}$, $j_{\text{аб}} = 10,7$ угл. сек.

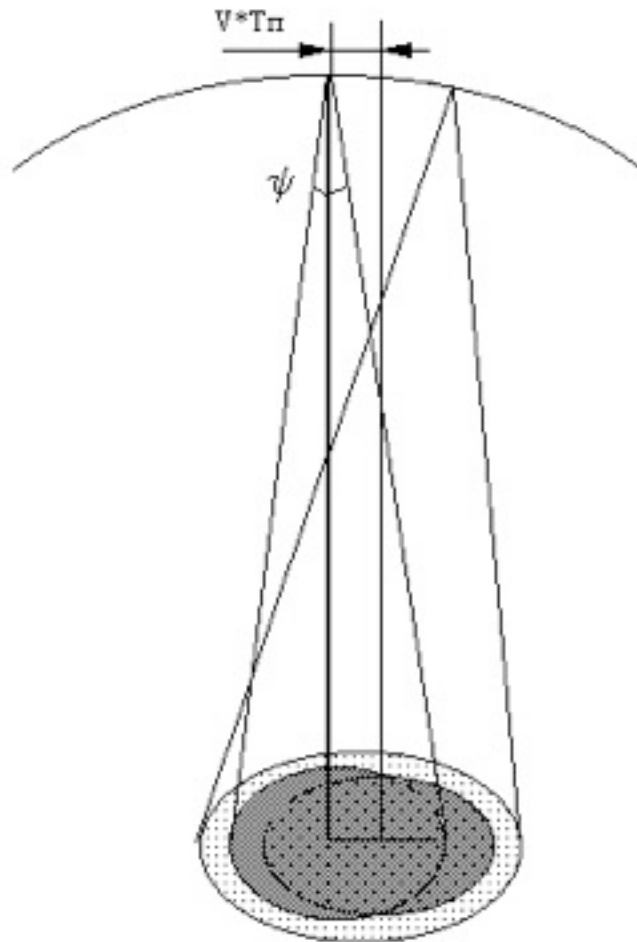


Рис. 2. Диаграмма, поясняющая компенсацию скоростной aberrации пучка излучения

Для **моноимпульсного дальномера** поле зрения на прием связано с расходимостью пучка излучения передатчика при условии компенсации скоростной aberrации пучка излучения

$$j_{\text{пр}} = g_t + Dj,$$

где $j_{\text{пр}}$ - плоский угол поля зрения на прием, g_t - плоский угол расходимости излучения передатчика, Dj - технологический запас, связанный с ошибками юстировок.

Для **«пачечного» зондирования** из-за временной расстановки между 1-ым и последним импульсом зондирования в «пачке» возникает перемещение пятна лазерной засветки на подстилающей поверхности. Так же, как и для случая моноимпульсного зондирования при компенсации скоростной aberrации приемная

антенна принимает сигнал, сформированный всей подстилающей поверхностью засвеченной лазерным излучением.

Для оценки перекрытия пятен введем коэффициент перекрытия равный DS/S , где DS - площадь перекрытия; S – площадь пятна

$$0 \leq DS/S \leq 1,$$

а также относительное смещение пятна $x = z/r$, где z – смещение пятна, r - радиус пятна.

Коэффициент перекрытия пятна в зависимости от относительного смещения пятна представлен на рис. 3.

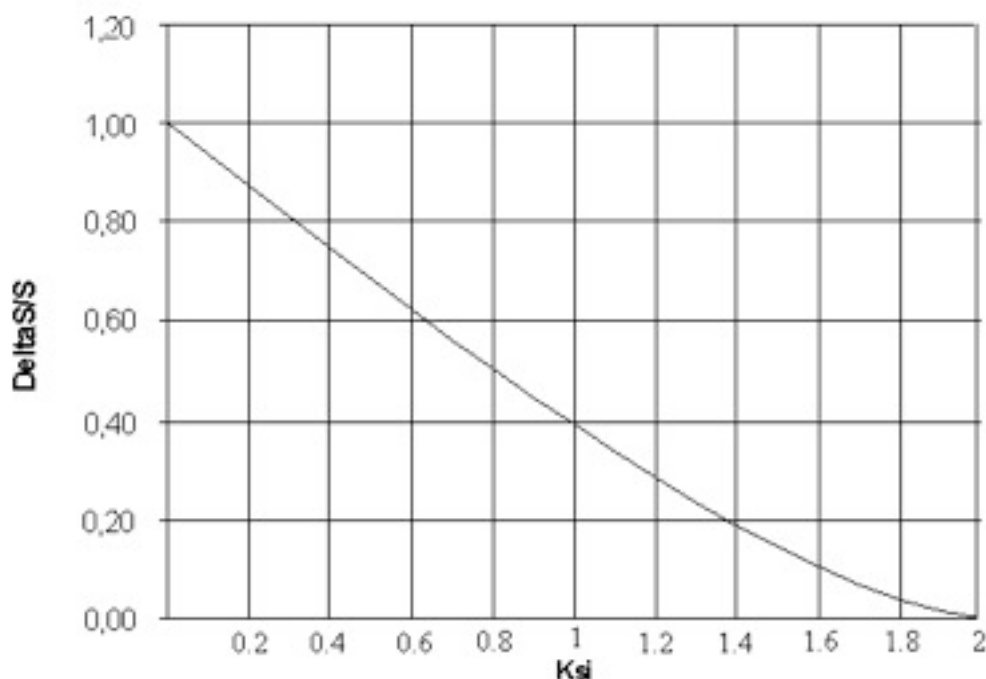


Рис.3. Зависимость коэффициента перекрытия пятна (DS/S) от относительного смещения пятна (x).

При $x = 0$ происходит полное перекрытие пятен, $DS/S = 1$.

При $x = 2$ перекрытие пятен отсутствует, $DS/S = 0$.

Для слабого влияния смещения пятен на изменение величины коэффициента отражения подстилающей поверхности и изменения дальности необходимо, чтобы относительное смещение пятна (x) было меньше 1.

Задаваясь допустимым коэффициентом перекрытия пятна $(DS/S)_{\text{доп}}$ находим из рис.3 величину $\chi_{\text{доп}}$. Теперь можно найти максимальную длительность пачки

$$T_{\text{п max}} = \frac{H \xi_{\text{доп}} \gamma_t}{2V} \quad -3$$

где H – высота орбиты КА.

Для $g_t = 40$ угл.сек $= 2 \cdot 10^{-4}$ рад.; $H = 200$ км; $\chi = 0.5$ получим $T_{\text{п max}} = 1.28$ мс.

Следовательно, величина $T_{\text{п max}}$ примерно одинаково ограничивается значением как смещением пятна, так и дальностью до цели (Сравните фор-лы (1) и (3)).

Угол между направлением на центры пятен из точки первоначального положения КА:

$$j_{\text{пач}} = V \cdot T_{\text{п}} / H, \quad -4$$

где $T_{\text{п}}$ – длительность пачки,

При $V = 7,8$ км/с, $T_{\text{п}} = 1,3$ мс, $H = 200$ км $j_{\text{пач}} = 4.7$ угл. сек.

Если выбрать угол между осями передатчика и приемника равный $j_{\text{аб}} - j_{\text{пач}}/2$, то угловое поле зрения на прием равно

$$j_{\text{пр}} = g_{\text{пер}} + Dj + j_{\text{пач}}/2.$$

4. Оценка характеристик обнаружения при моноимпульсном зондировании

Будем считать, что число фотоэлектронов на интервале разрешения τ_p распределено по закону Пуассона. Для числа ф.э. > 13 распределение Пуассона можно аппроксимировать гауссовским распределением. В этом случае проще получить аналитические выражения.

Вероятность ложной тревоги на интервале разрешения для моноимпульсного зондирования имеет вид[4]

$$P_{\text{лж0}} = 1 - \Phi(a_0) \quad -5$$

где:

$$a_0 = \frac{N_{\text{пор}0} - N_{\text{ш}}}{(F N_{\text{ш}})^{1/2}} \quad -6$$

здесь $N_{\text{ш}}$ - среднее число ф.э. на интервале разрешения создаваемое фоном солнечной радиации, $N_{\text{пор}0}$ - пороговое число ф.э. на интервале разрешения.

$\Phi(a_0)$ – интеграл вероятности.

$$\Phi(x) = 0,5 + (2\pi)^{-1/2} \int_0^x \exp(-x^2/2) dx \quad -7$$

Вероятность правильного обнаружения на интервале разрешения для моноимпульсного зондирования имеет вид [4]

$$P_{\text{по}0} = \Phi(b_0), \quad -8$$

где

$$-9$$

$N_{\text{с}0}$ - среднее число сигнальных ф.э. на интервале разрешения при моноимпульсном зондировании.

5. Оценка характеристик обнаружения при «пачечном» зондировании

Аналогично запишем вероятность ложной тревоги на интервале разрешения для пачечного зондирования

$$P_{\text{лжн}} = 1 - \Phi(a_n), \quad -10$$

где

$$a_n = \frac{N_{\text{порн}} - N_{\text{шн}}}{(F N_{\text{шн}})^{1/2}} \quad -11$$

Здесь $N_{\text{порн}}$ - пороговое число ф.э. на интервале разрешения при пачечном зондировании, $N_{\text{шн}}$ – среднее число ф.э. на интервале

разрешения, создаваемое фоном солнечной радиации при пачечном зондировании, $N_{\text{шн}} = N_{\text{ш}} * N_{\text{и}}$, $N_{\text{и}}$ – число импульсов в пачке.

Вероятность правильного обнаружения на интервале разрешения для пачечного зондирования имеет вид

$$P_{\text{поп}} = \Phi(b_{\text{п}}), \quad -12$$

где

$$b_{\text{п}} = \frac{N_{\text{с1}} N_{\text{и}} - (N_{\text{порог}} - N_{\text{шк}})}{(F N_{\text{и}} (N_{\text{шк}} + N_{\text{с1}}))^{1/2}}, \quad -13$$

$N_{\text{с1}}$ - среднее число сигнальных ф.э. на интервале разрешения, принятых от одного импульса, при пачечном зондировании.

Задаваясь одинаковой вероятностью ложной тревоги $P_{\text{лт0}} = P_{\text{лтп}}$ находим соотношение между порогами для случая моноимпульсного и пачечного зондирования

$$N_{\text{порог}} - N_{\text{ш}} = (N_{\text{порог}} - N_{\text{шк}}) / \sqrt{N_{\text{и}}} \quad -14$$

Для определения соотношений между энергиями лазера при моноимпульсном и «пачечном» сигнале введем параметр $d_{\text{Е}}$:

$$d_{\text{Е}} = N_{\text{и}} E_{\text{с1}} / E_{\text{с0}}, \quad -15$$

где $E_{\text{с1}}$ – энергия одного излученного импульса пачки,

$E_{\text{с0}}$ – энергия излученного импульса при моноимпульсном зондировании.

Физический смысл этого параметра состоит в следующем: во сколько раз необходимо увеличить энергию сигнала в случае пачечной посылки (по сравнению с одиночной), чтобы при равных вероятностях ложной тревоги получить одинаковую вероятность правильного обнаружения. Из физического смысла $d_{\text{Е}} \geq 1$.

Выражение (13) можно преобразовать, выразив $d_{\text{Е}}$ через число принимаемых ф.э., считая остальные параметры локационного уравнения одинаковыми; тогда

$$d_{\text{Е}} = N_{\text{и}} N_{\text{с1}} / N_{\text{с0}} \quad -16$$

Входное отношение с/ш при моноимпульсном зондировании может быть выражено через число ф.э.

$$q_{0\text{вх}} = \frac{P_{\text{co}}/P_{\text{ш}}}{N_{\text{ш}}} = N_{\text{co}} / \quad -17$$

$P_{\text{ш}}$ – средняя оптическая мощность фона на фотодетекторе при моноимпульсном зондировании, Вт, P_{co} – оптическая мощность сигнала на фотодетекторе при моноимпульсном зондировании, Вт.

Приравняв выражения (9) и (13), с учетом выражения (17), получим исходное уравнение, из которого необходимо найти d_E

$$\frac{\sqrt{N_{\text{co}} - a_0 \sqrt{F/q_{0\text{вх}}}}}{\sqrt{(1+1/q_{0\text{вх}})}} = \frac{\delta_E \sqrt{N_{\text{co}} - a_0 \sqrt{N_{\text{ш}} F/q_{0\text{вх}}}}}{\sqrt{(\delta_E + N_{\text{ш}}/q_{0\text{вх}})}} \quad -18$$

Преобразовав выражение (18), получим квадратное уравнение относительно d_E

$$\delta_E^2 + A \delta_E + B = 0 \quad -19$$

где

$$A = - \left[\frac{(\sqrt{N_{\text{co}} - a_0 \sqrt{F/q_{0\text{вх}}}})^2}{N_{\text{ш}}(1+1/q_{0\text{вх}})} + 2a_0 \sqrt{\frac{F N_{\text{ш}}}{N_{\text{co}} q_{0\text{вх}}}} \right] \quad -20$$

$$B = \frac{N_{\text{ш}}}{N_{\text{co}}} \left[\frac{a_0^2 F}{q_{0\text{вх}}} - \frac{(\sqrt{N_{\text{co}} - a_0 \sqrt{F/q_{0\text{вх}}}})^2}{(1+q_{0\text{вх}})} \right] \quad -21$$

Аналитическое решение уравнения (19) зависит от значения параметра Z

$$Z = \sqrt{N_{\text{co}} - a_0 \sqrt{F/q_{0\text{вх}}}} \quad -22$$

Для $Z > 0$

$$\delta_E = -\frac{A}{2} + \sqrt{\frac{A^2}{4} - B} \quad (23a)$$

Для $Z < 0$

$$\delta_E = -\frac{A}{2} - \sqrt{\frac{A^2}{4} - B} \quad (23b)$$

Для $Z = 0$

$$\delta_E = a_0 * \sqrt{\frac{F N_{\text{ш}}}{q_{0\text{вх}} N_{\text{co}}}} \quad (23c)$$

Из выражений (23a) и (23b) следует, что для обеспечения положительности дискриминанта:

$$A^2 \geq 4B.$$

Из уравнения (20) следует $A < 0$.

Если $d_E = 1$ выполняется условие $B+1 = -A$.

Запишем коэффициент d_E , характеризующий увеличение энергии «пачки» импульсов по сравнению с энергией импульса моноимпульсного локатора E_0 в виде,

$$d_E = \frac{E_{\text{п}}}{E_0} \quad -24$$

На рисунке 4 представлены зависимости этого коэффициента от числа импульсов в пачке N_i , рассчитанные из условия сохранения характеристик обнаружения.

Необходимая энергия «пачки» импульсов растет с увеличением числа импульсов, но скорость роста снижается при увеличении отношения сигнал/шум $q_{0\text{вх}}$, а также числа сигнальных фотоэлектронов $N_{\text{с0}}$ для исходного моноимпульсного режима.

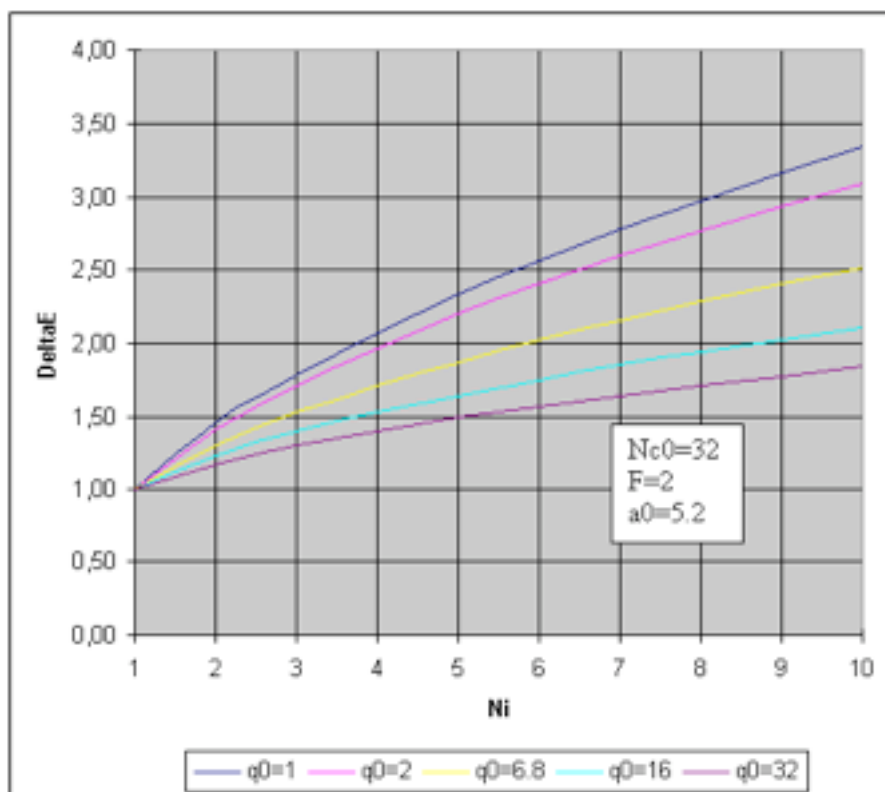


Рис. 4. Зависимость коэффициента δ_E от числа импульсов в пачке N_i при различных значениях входного отношения сигнал/шум исходного моноимпульсного режима: 1) $q_{0вх}=1$; 2) $q_{0вх}=2$, 3) $q_{0вх}=6.8$, 4) $q_{0вх}=16$, 5) $q_{0вх}=32$; при $N_{с0}=32$, $F=2$, $a_0=5.2$ ($P_{лт}=10^{-7}$)

Несмотря на некоторое увеличение общей энергии излучения пачки импульсов, значительное снижение энергии отдельного импульса существенно упрощает проблему использования диодной накачки, а также решение ряда других вопросов. Введем коэффициент снижения энергии отдельного импульса в пачке

$$K_E = \frac{E_K}{E_0} \text{ или } \left(K_E = \frac{\delta_E}{N_i} \right) \quad -25$$

На рисунке 5 представлены зависимости K_E от числа импульсов в пачке, позволяющие определить требования к лазеру и оптимизировать его параметры.

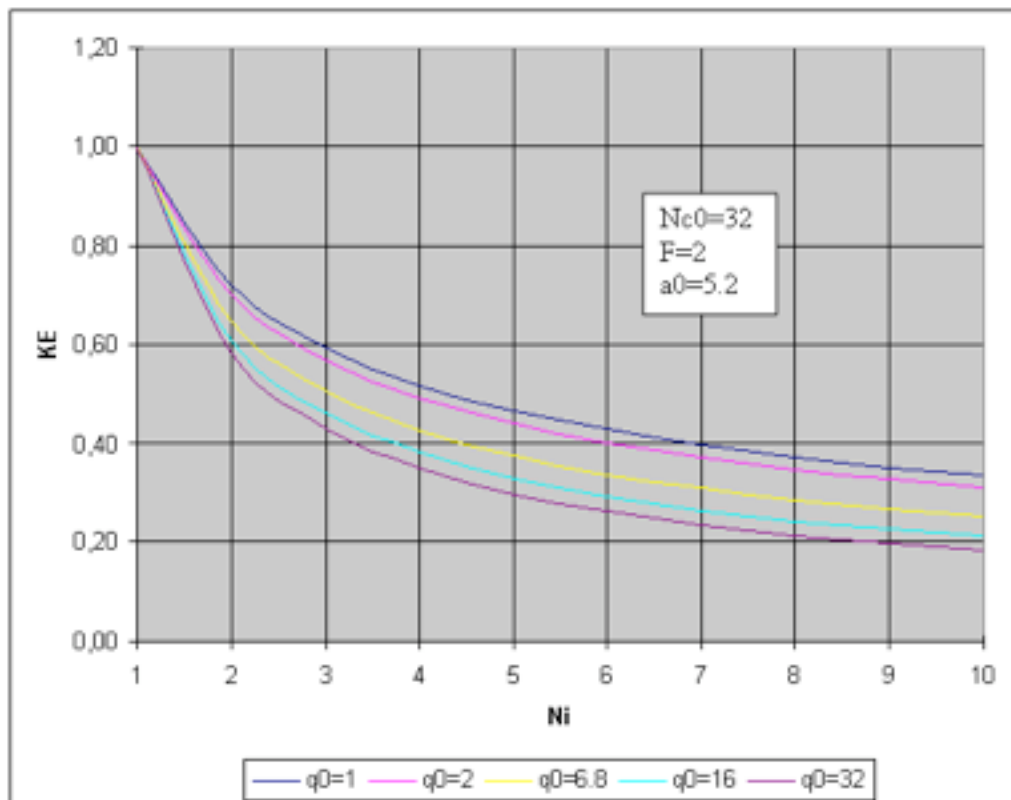


Рис. 5. Зависимость коэффициента снижения энергии отдельного импульса K_E от числа импульсов в пачке N_i при различных значениях входного отношения сигнал/шум для исходного моноимпульсного

режима: 1) $q_{0\text{вх}}=1$; 2) $q_{0\text{вх}}=2$, 3) $q_{0\text{вх}}=6.8$, 4) $q_{0\text{вх}}=16$, 5) $q_{0\text{вх}}=32$; при $N_{c0}=32$, $F=2$, $a_0=5.2$ ($P_{\text{лт}}=10^{-7}$)

Во всех случаях значение коэффициента K_E монотонно убывает с ростом числа импульсов.

6. Последетекторная обработка сигнала

Известно, что существуют 2 режима некогерентного фотоприема [5]:

- режим интеграции зарядов,
- режим счета фотонов.

Режим интеграции зарядов

В моноимпульсных дальномерах обнаружение сигнала основано на последетекторной фильтрации сигнала из шумов и регистрации сигнала по превышению им уровня порога порогового устройства. В этом случае уровень сигнала превышает уровень шума на входе порогового устройства.

В многоимпульсных дальномерах обнаружение сигнала может быть реализовано на основе последетекторного когерентного сложения всех импульсов пачки в момент появления последнего импульса пачки. Затем сигнал сравнивается с порогом. В этом случае амплитуда одного импульса пачки в общем случае может быть меньше амплитуды шумовых импульсов. Поэтому выделение одного сигнального импульса пачки из смеси сигнала и шума крайне затруднительно. Решение задачи обнаружения сигнала и измерение дальности в многоимпульсных дальномерах может быть основано на записи в цифровом виде поступающего сигнала во временном стробе. Передний фронт строба соответствует минимальной ожидаемой дальности, а задний фронт – максимальной дальности, увеличенной на длительность пачки. Предлагаемая цифровая обработка сигнала использует априорную информацию о временном интервале между зондирующими импульсами в пачке и среднем значении мощности фона. Знание временных интервалов между зондирующими импульсами позволит когерентно сложить принимаемые импульсы в пачке на выходе фотодетектора, а знание среднего значения мощности фона позволит оптимально выбрать величину цифрового порога.

Механизм цифровой обработки сигнала заключается в следующем: сигнал на временном интервале $T_{стр}$ оцифрован с шагом АЦП (DT), равным длительности зондирующего сигнала. Следовательно, имеется L временных интервалов обработки. Номер временного интервала соответствует номеру ячейки ОЗУ, в которой хранится информация. Расстояние между зондирующими импульсами в интервалах обработки определяется согласно выражению (1)

$$K_1 = T_1 / DT, \dots, \quad -26$$

$$K_j = T_j / DT$$

Расстояние между первым и последним зондирующими импульсами в интервалах обработки равно

$$K_0 = \sum_{i=1}^j K_i \quad -27$$

Ячейка M (рис.6) соответствует заднему фронту строба дальности.

Цифровая обработка начинается с первой ячейки ОЗУ. Ее значение складывается с ячейкой K_0 . В ячейку K_0 добавляются значения из ячеек K_1 , K_2 , ..., K_{j-1} . Полученное значение в ячейке K_0 сравнивается с порогом. Если оно больше порога, то считается, что принят сигнал.

Если величина числа, записанного в ячейку K_0 , меньше порога, то переходим к следующей ячейке, т.е. число из ячейки 2 ОЗУ складываем с числом из ячейки $K_0 + 1$. В ячейку $K_0 + 1$ добавляем значения из ячеек $K_1 + 1$, $K_2 + 1$, ..., $K_{j-1} + 1$ и сравниваем с порогом. Таким образом, если порог не превышен, то переходим к следующей ячейке, и так до ячейки M .

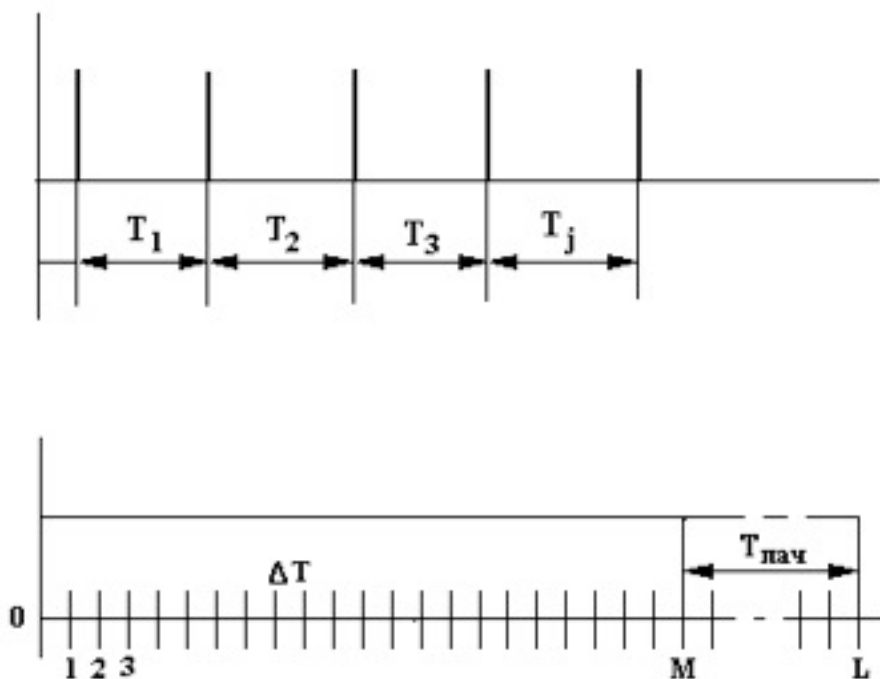


Рис.6. Временная диаграмма оцифровки принимаемого сигнала.

Дальность (D) определяется по формуле

$$D = \frac{C}{2} [\tau_3 + \Delta T * (i - 1)] \quad -28$$

где: τ_3 – временная задержка между передним фронтом 1-ого зондирующего импульса и передним фронтом строба дальности, ΔT – шаг АЦП, i – номер ячейки ОЗУ, в которой записан сигнал от 1-ого зондирующего импульса, $1 \leq i \leq M$.

Режим счета фотонов

Режим счета фотонов используется при небольшом (<15) числе фотоэлектронов (ф.э.) на интервале наблюдения, когда отсутствуют слипания между соседними импульсами, т.е. фотоприемник разрешает каждый одноэлектронный импульс.

Как и в случае интеграции зарядов, имеется L временных интервалов обработки, только каждый интервал обработки используется как интервал счета. В простейшем случае может использоваться два счетчика, работающих попеременно, т.е. остановка 1-ого счетчика

запускает 2-ой счетчик, и так далее по очереди. Число импульсов, сосчитанных каждым счетчиком, записывается в соответствующую ячейку ОЗУ. Затем определяется среднее число одноэлектронных импульсов, связанных с фоном, на интервале счета.

$$\bar{N} = \frac{\sum_{i=1}^L N_i}{L},$$

где N_i – число одноэлектронных импульсов на i -ом интервале.

Учитывая, что число одноэлектронных импульсов на интервале счета распределено по закону Пуассона, находим порог.

Дальнейшая обработка может быть выполнена так же, как для режима интеграции зарядов, но можно использовать и более простой алгоритм, заключающийся в следующем. Для заданной вероятности ложной тревоги на интервале наблюдения и среднего числа шумовых импульсов выбирается порог ($N_{\text{пор}}$). При этом вероятность ложной тревоги, заданная при выборе порога, превышает вероятность ложной тревоги, заданной для лазерного дальномера. Это связано с тем, что использование априорной информации о расстоянии между зондирующими импульсами позволяет снизить вероятность ложной тревоги.

Далее фиксируются интервалы, в которых число принятых импульсов превышает пороговое. Затем эта реализация анализируется на соответствие временной расстановке зондирующих импульсов в пачке. В результате снижается вероятность ложной тревоги, а также сокращается число операций, производимых ЭВМ, и уменьшается время измерения дальности.

Выводы

1. Как следует из результатов исследования, использование «пачечного» сигнала вместо моноимпульсного, приводит к определенному увеличению энергии в «пачке». Однако при этом энергия отдельного импульса в «пачке» существенно снижается.
2. Уменьшение энергии импульса в пачке позволяет существенно снизить суммарную мощность систем лазерных диодов накачки, а следовательно стоимость лазерного передатчика.

Список литературы

1. IEEE J. of Quantum Electronics, v.28, N4, pp992-996, 1992
2. Appl. Opt. V.39, N6, p.986-992, 2000
3. Optics Letters, v.21, N3, pp210-212, 1996
4. Знаменский И.В., Тихомиров А.А. Оптимизация и расчет параметров лазерного высотомера при некогерентном приеме.// Оптика атмосферы. 1990. Т.3. №5. С. 552-558.
5. Глазов Г.Н. Статистические вопросы лидарного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1987. 311с.