

Моделирование обработки пачечных сигналов в лазерных дальномерах

В.П. Васильев¹, И.В. Знаменский¹, А.А. Тихомиров^{2*}

¹НПК «Системы прецизионного приборостроения»
111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, 53

²Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3

Поступила в редакцию 5.04.2021 г.

Проведено моделирование процесса обработки пачечного сигнала в лазерном дальномере, измеряющем высоту орбиты космических аппаратов импульсным методом на дальностях 180 ÷ 370 км при работе фотодетектора в режиме интеграции заряда с учетом мощности фона солнечной радиации. При этом дальномер излучает пачку (пять) импульсов длительностью 10 нс с интервалом между ними 250 мкс. Цифровая обработка принимаемых эхосигналов основана на методе синхронного последетекторного сложения амплитуд всех импульсов пачки. При моделировании обработки такого сигнала использовался строб дальности 180 ÷ 367,5 км. Представлено описание программы и ее интерфейса для моделирования, которые формируют нормальный гауссовский шум со средним значением и дисперсией, зависящими от среднего значения мощности фона. Определены вероятности ложной тревоги и правильного обнаружения сигнала с учетом порогового числа фотоэлектронов для различного числа сигнальных фотоэлектронов в одном импульсе пачки. Исследованы ошибки измерения дальности во всем диапазоне строба.

Ключевые слова: лазерный дальномер, пачечный сигнал, моделирование, вероятности ложной тревоги и правильного обнаружения; laser rangefinder, batch signal, simulation, probabilities of false alarm and correct signal detection.

Введение

Методы и технические средства лазерной локации обладают существенными преимуществами по сравнению с радиолокационными, поскольку позволяют с большей точностью измерять координаты и скорость перемещения зондируемого объекта, получать информацию о его форме и даже определять характеристики его поверхности [1]. Малая длительность лазерного импульса обеспечивает высокую точность определения дальности до объекта. В связи с этим лазерные дальномеры (ЛД) широко применяются в мониторинге околоземного космического пространства [2] и в спутниковой лазерной дальнометрии (SLR – satellite laser ranging) [3, 4]. В [4] отмечено, что в оптическом диапазоне волн на точность определения расстояний влияют два фактора. Первый обусловлен трудностью точного учета показателя преломления воздуха на пути распространения лазерного луча, второй – так называемой ошибкой цели, которая связана с тем, что на спутнике-цели, имеющем шаровую форму, установлено множество ретрорефлекторов, каждый из которых формирует свой эхосигнал. Для создания новых

навигационных систем, обеспечивающих погрешности измерения дальности, составляющие единицы миллиметров, создана Международная служба лазерной дальнометрии (ILRS – International Laser Ranging Service) [5, 6], которая по результатам измерений обеспечивает вычисление параметров вращения Земли [7]. Следует также отметить, что ЛД служат эталоном для калибровки и сверки радиотехнических систем.

В последнее время в импульсных радиодальномерах для повышения надежности обнаружения объекта (цели), находящегося на большой дальности или имеющего малую величину эффективной поверхности рассеяния, применяется накопление эхосигналов от пачки зондирующих импульсов [8]. В этом случае решение о наличии отраженного сигнала принимается не по одному отдельному импульсу, а по всей принятой пачке отраженных от объекта импульсов (пачечный сигнал). При этом накопители таких эхосигналов разделяют на когерентные и некогерентные [8–10]. Реализация технических решений для последних более проста.

В [11] рассмотрена задача создания ЛД, измеряющего высоту орбиты космического объекта (КО) импульсным методом, при использовании пачечного сигнала при некогерентном накоплении видеоимпульсов эхосигналов, что обеспечивает наибольшую амплитуду принимаемого сигнала. Цифровая обработка

* Владимир Павлович Васильев (lavaser@kmail.ru);
Игорь Всеволодович Знаменский (06-21@nps-spp.ru);
Александр Алексеевич Тихомиров (tikhomirov@imces.ru).

такого сигнала основана на методе последетекторного сложения амплитуд всех импульсов пачки, так как априорно известна временная расстановка импульсов в пачке. Поэтому в ЛД, работающих на больших дальностях (более 180 км), предпочтительно использовать пачечные сигналы.

В принципе, оптические схемы ЛД для зондирования КО [4, 6] и лидарных комплексов для измерения высотных профилей различных метеорологических величин в атмосфере [12, 13] мало отличаются. Существенные различия состоят в схемах последетекторной обработки принимаемых эхосигналов. В настоящей работе представлены результаты проверки основных принципов обработки пачечного сигнала и определения ошибок измерения дальности, возникающих при таком методе обработки в ЛД наземного базирования, при лоцировании КО на дальностях $180 \div 370$ км и работе фотодетектора в режиме интеграции заряда (токовый режим) в коротких временных стробах с учетом действия фона солнечной радиации. Определены вероятности ложной тревоги $P_{f.a}$ и правильного обнаружения $P_{c.d}$ эхосигнала с учетом порогового числа фотоэлектронов (ф.э.).

Принцип обработки пачечного сигнала в лазерном дальномере

На рис. 1 представлена схема моделируемого ЛД с пачечным сигналом. В лазерном передатчике используется твердотельный лазер с накачкой на лазерных диодах, что обеспечивает высокую частоту повторения зондирующих импульсов (единицы килогерц) для создания пачки из N_i импульсов, следующих с интервалом T_0 , с энергией излучения E_i в каждом импульсе. Это позволяет уменьшить почти в N_i раз энергию E_i по сравнению с требуемой энергией E_0 для моноимпульсного зондирования при том же энергетическом потенциале дальномера [11]. Длительность пачки $T_b = T_0(N_i - 1)$. В этом состоит одно из существенных отличий рассматриваемого дальномера от лидаров [12, 13]. Длительность лазерного импульса в пачке составляет 10 нс. В фотоприемном устройстве используется ФЭУ или лавинный фотодиод, подобный [14]. Следует отметить, что при $T_0 = 0,25$ мс и $N_i = 5$ КО остается в поле зрения дальномера за время облучения его пачкой импульсов, поскольку за счет движения по орбите со скоростью 7,8 км/с КО сместится на расстояние менее 10 м.

Для оцифровки протектированного видеосигнала используется аналого-цифровой преобразователь (АЦП) с временным дискретом $\Delta T = 10$ нс.



Рис. 1. Структурная схема ЛД с цифровой обработкой пачечного сигнала: черные стрелки — аналоговые сигналы; белые — цифровые

Емкость оперативного запоминающего устройства (ОЗУ), в котором обрабатывается пачечный сигнал, должна быть не менее 8 ГБ, а тактовая частота микроЭВМ — не менее 3 ГГц.

В моделируемом ЛД обнаружение эхосигнала реализуется на основе последетекторного некогерентного приема пачки видеоимпульсов. Затем принятый сигнал сравнивается с порогом. Амплитуда одного импульса пачки в общем случае может не превышать амплитуду шумовых импульсов, поэтому выделение одного сигнального импульса пачки из смеси сигнала и шума крайне затруднительно. Решение задачи обнаружения сигнала и измерение дальности в дальномерах с пачечным сигналом могут быть основаны на записи в ОЗУ в цифровом виде поступающей пачки во временном стробе. Передний фронт строба соответствует минимальной ожидаемой дальности, а задний — максимальной дальности, увеличенной на длительность пачки. Образованная в АЦП последовательность m -разрядных двоичных чисел с интервалом ΔT поступает в ОЗУ. Предлагаемая цифровая обработка сигнала использует априорную информацию о временном межимпульсном интервале T_0 в пачке и средней мощности фона. Знание T_0 позволяет некогерентно сложить принимаемые импульсы в пачке на выходе фотодетектора, а знание средней мощности фона — оптимально выбрать величину цифрового порога.

Механизм цифровой обработки сигнала заключается в следующем: сигнал на временном интервале строба T_{st} оцифровывается с шагом ΔT АЦП, равным длительности зондирующего сигнала. Следовательно, имеется $L = T_{st}/\Delta T$ временных интервалов обработки. Номер временного интервала соответствует номеру ячейки ОЗУ, в которой хранится информация.

Расстояние между зондирующими импульсами в интервалах обработки K_j определяется как $K_1 = T_1/\Delta T, \dots, K_j = T_j/\Delta T$, где T_j — временной интервал между i -м и $(i + 1)$ -м зондирующим импульсом.

Расстояние между первым и последним зондирующими импульсами в интервалах обработки равно $K_n = \sum_{i=1}^j K_i$. Для моделирования рассматривается

простейший случай, когда временной интервал T_0 между импульсами пачки постоянен.

Длительность строба дальности для пачечного сигнала разбивается на $(2N_i - 1)$ интервалов, называемых «карманами». Число «карманов» равно $(2N_i - 1) = 9$, где $N_i = 5$.

В общем случае использование «карманов» не связано с общим принципом обработки пачечно-го сигнала, а используется для упрощения моделирования. При изменяющемся временном интервале между импульсами пачки можно использовать сквозную нумерацию в стробе дальности, без применения «карманов».

На рис. 2 представлена временная диаграмма принятых сигналов для двух случаев: а) для дальности H несколько больше 180 км; б) для H несколько больше 330 км. Интервал T_{st} (или соответствующая дальность) разделен на 9 «карманов», при этом каждый сигнал из пачки попадает в свой «карман». Это связано с тем, что временной интервал «кармана» равен T_0 .

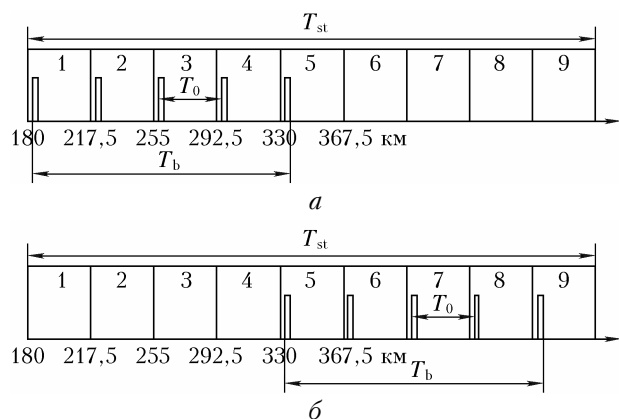


Рис. 2. Временная диаграмма приема пачечного сигнала для дальности до цели ~ 180 (а), ~ 330 км (б)

Длительность строба T_{st} для пачечного сигнала больше, чем для моноимпульсного, и определяется выражением $T_{st} = T_0(2N_i - 1) = \Delta T N_{ce}(2N_i - 1)$. Здесь $T_0 = 250$ мкс – временная задержка между импульсами пачки, равная длительности «кармана»; $N_{ce} = T_0/\Delta T = 25000$ – число подинтервалов в одном «кармане», равное числу ячеек ОЗУ для записи значений H .

Цифровая обработка начинается с первой ячейки (K_1) 0-го «кармана» ОЗУ. Ее значение складывается с ячейкой (K_1) 1-го «кармана», и так до 4-го «кармана». Полученная сумма сравнивается с порогом: если она больше порога, то сигнал принят и он записывается. Затем осуществляется сдвиг, т.е. суммирование начинается с ячейки (K_1) 1-го «кармана», и так до 5-го «кармана». Последний сдвиг будет обеспечивать суммирование первых ячеек (K_1) с 4-го по 8-й «карманы».

Затем происходит переход к следующей ячейке: число из второй ячейки (K_2) 0-го «кармана» ОЗУ складывается с ячейкой (K_2) 1-го «кармана», и так до 4-го «кармана». Далее путем сдвига суммируется вторая ячейка (K_2) с 4-го по 8-й «карманы». Таким образом суммируются все 25000 ячеек.

Каждый раз, когда текущая сумма превышает порог, она записывается в ОЗУ с указанием номера «кармана» 1-го слагаемого и номера ячейки. Среди записанных в ОЗУ сумм находится сумма с наиболь-

шим значением. Она соответствует ячейке с записью искомой дальности H_j до КО, которая определяется как

$$H_j = H_{\min} + [N_i(i_{\max}) + N_{ce}N_p(i_{\max})]c\Delta T/2, \quad (1)$$

где $H_{\min} = 180000$ м – минимальная дальность; c – скорость света; $N_p(i_{\max})$ – номер «кармана» для максимальной суммы; $N_i(i_{\max})$ – номер ячейки для максимальной суммы.

Используя (1), можно определить абсолютную погрешность измерения дальности

$$\Delta_{er} = H_j - H, \quad (2)$$

где H_j – измеренная дальность, H – заданная дальность.

Оценка характеристик обнаружения при пачечном зондировании

В радиолокации [8] обнаружение сигнала характеризуется вероятностями $P_{f.a}$ и $P_{c.d}$. Проведем оценку этих характеристик для обнаружения КО при пачечном лазерном зондировании. Далее добавление индекса b в этих величинах относится к характеристикам пачечного зондирования. Будем полагать, что число ф.э., поступающих с фотодетектора ЛД, на интервале разрешения (наблюдения) τ_r длительностью порядка 10 нс распределено по закону Пуассона. В таком методе обработки пачечного сигнала используется суммирование ф.э. от каждого импульса пачки. Сумма ф.э. будет также распределена по закону Пуассона с математическим ожиданием, увеличенным в N_i раз.

Дисперсия числа ф.э. на интервале τ_r равна среднему значению числа ф.э., умноженному на коэффициент шума F фотодетектора [15]. Обычно $F = 1 \div 2$, далее в расчетах принято $F = 2$. Для среднего числа ф.э. больше 13 распределение Пуассона можно аппроксимировать гауссовым распределением [16, 17]. В этом случае характеристики обнаружения записываются через интеграл вероятности $\Phi(X)$ с порогом U_{th} :

$$\Phi(X) = (2\pi)^{-1/2} \int_{-\infty}^X \exp(-x^2/2) dx.$$

Следуя [11], вероятность ложной тревоги на интервале разрешения для пачечного зондирования можно записать как

$$P_{f.a.b} = 1 - \Phi(a_b), \quad (3)$$

где аргумент интеграла вероятности определяется как $a_b = (N_{th.b} - N_{nb})/(FN_{nb})^{0.5}$. Здесь $N_{th.b}$ – пороговое число ф.э. на интервале τ_r при пачечном зондировании; N_{nb} – среднее число ф.э. на этом же интервале, создаваемое фоном солнечной радиации (после накопления); $N_{nb} = N_n N_i$, где N_n – число шумовых ф.э.

Задавая значение вероятности ложной тревоги $P_{f.a}$ на интервале разрешения τ_r , число импульсов

в пакке N_i и число шумовых ф.э. N_n на интервале τ_r , можно найти пороговое число ф.э. в пакке $N_{th.b}$.

Вероятность ложной тревоги в стробе дальности $T_{st} \gg \tau_r = 10$ нс определится в виде

$$P_{f.a.st} = P_{f.a.b} T_{st} / \tau_r.$$

Вероятность правильного обнаружения на интервале τ_r для пачечного зондирования имеет вид [11]:

$$P_{c.d.b} = \Phi(b_n), \quad (4)$$

где $b_n = [N_{s1}N_i - (N_{th.b} - N_{nb})] / [FN_i(N_n + N_{s1})]^{0.5}$; N_{s1} – среднее число сигнальных ф.э. на интервале разрешения, принятых от одного импульса, при пачечном зондировании.

Следовательно, при известных значениях N_i и N_n на интервале τ_r и рассчитанном пороговом числе ф.э. $N_{th.b}$, задавая число сигнальных ф.э. N_{s1} на интервале τ_r , принятых от одного импульса, можно найти вероятность правильного обнаружения $P_{c.d.b}$.

Описание программы для моделирования

Программирование формирования и обработки пачечного сигнала на фоне шума происходило в среде C++Builder 6. Внешний вид панели управления и ввода исходных данных (ИД) показан на рис. 3. ИД можно вводить путем выбора готовых значений из меню или набора их на клавиатуре. Посредством кнопки «Вычислить» осуществляется однократное вычисление дальности. ИД можно

распечатать, используя кнопку «Исх. данные», а затем «Печать». Аналогично результаты однократного измерения можно посмотреть и распечатать, используя кнопку «Результат». С помощью кнопки «Строб» осуществляется переход в режим «узкого» следающего строба с длительностью 37,5 км. В исходном состоянии длительность строба равна 180–367,5 км (см. рис. 2). Для циклического измерения дальности в диапазоне 37,5 км с шагом 1,5 м используется кнопка «Цикл». Это соответствует 25000 измерениям. Диапазон выбирается с помощью меню «Минимальная дальность» и «Максимальная дальность». Ошибки измерения дальности или пропуска сигнала записываются в файл; имя файла задается с помощью меню «Имя файла для записи».

В начале программы осуществляется ввод ИД. На их основе проводится вычисление порогового числа ф.э. и порогового напряжения на входе АЦП, а также теоретическая вероятность $P_{c.d.b}$ и выходное отношение с/ш по напряжению.

Для формирования гауссова шума используется готовая функция RandG с параметрами: Mean – математическое ожидание, StdDev – среднеквадратическое отклонение. Для заданного среднего значения шумовых ф.э. находится среднее напряжение шума и его среднеквадратическое отклонение на входе АЦП. Эти значения используются для функции RandG. Формирование гауссовского шума выполняется по команде «Вычислить».

Поскольку генерируемые числа являются псевдослучайными, при каждом новом запуске приложения будет вырабатываться одна и та же последовательность чисел. Имеется возможность рандоми-

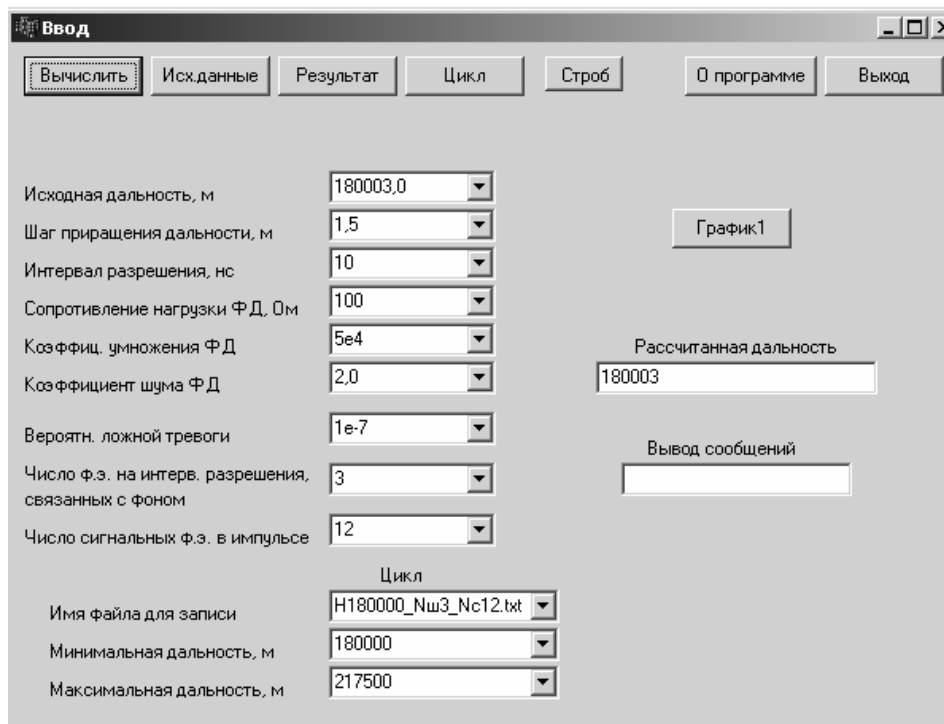


Рис. 3. Панель управления и ввода исходных данных в программу моделирования

зировать генератор чисел, т.е. задавать ему каждый раз новое случайное исходное число с помощью функции Randomize.

Для ускорения работы программы случайные числа формируются один раз, в начале, с записью их в двумерный массив размером 25000×9 . Следовательно, для каждого из 9 «карманов» подготовлен свой массив случайных чисел.

Каждый раз в цикле исходная дальность H фиксируется в массиве случайных чисел с помощью записи туда сигнала, так как номер элемента массива соответствует определенной дальности. Чтобы в новом цикле стереть предыдущий сигнал и восстановить шум, используется вспомогательный массив.

Обнаружение сигнала происходит путем сканирования двумерного массива начиная с 1-го элемента 0-го «кармана» и сложения его с 1-м элементом 1-го, 2-го, 3-го и 4-го «карманов». Полученная сумма сравнивается с порогом. Складываются всегда 5 элементов, выбираемых по одному с каждого «кармана». В результате имеется вероятность превышения порога не только суммой из 5-ти элементов. Поэтому из сумм, превысивших порог, выбирается сумма с наибольшим значением.

По номеру 1-го слагаемого максимальной суммы и номеру «кармана» определяется искомая дальность H_j . Затем значение H_j сравнивается с H и вычисляется Δ_{er} . Ошибки записываются по следующему алгоритму:

- если $|\Delta_{er}| \leq 1,5$ м (соответствует интервалу τ_r), то она не учитывается;
- если $|\Delta_{er}| > 1,5$ м, то она записывается в массив ошибок.

Структурная схема описанной программы приведена на рис. 4.

Режим узкого следящего строба выполняется вначале с «широким» стробом, пока не будет получено три достоверных измерения. После этого строб сужается.

Результаты моделирования

Моделирование проводилось в диапазоне дальностей H от 180 до 367,5 км с шагом установки дальности 1,5 м. Число шумовых ф.э. N_n на интервале τ_r принято равным 3, тогда сумма ф.э. от 5 интервалов наблюдения равна 15 ф.э. и ее распределение аппроксимируется гауссовым распределением. Исследовались два случая: при числе сигнальных ф.э. в импульсе $N_{s1} = 12$ (табл. 1) и 9 (табл. 2), которые после накопления имеют гауссово распределение. Выбор таких значений N_{s1} позволяет показать работу ЛД при небольшом отношении с/ш по напряжению – 4,9 и 4,11 соответственно. Понятно, что при уменьшении N_{s1} на интервале τ_r необходимо увеличить число импульсов в пачке.

Для уменьшения вероятности $P_{f.a.b}$ был установлен «широкий» строб дальности, соответствующий диапазону измеряемых H и зависящий от длительности пачки импульсов.

В табл. 1 приведены результаты моделирования для следующих ИД: диапазон измеряемых $H = 180 \dots 367,5$ км; шаг приращения дальности 1,5 м; $\tau_r = 10$ нс; на этом интервале: $N_{s1} = 12$, $N_n = 3$, $N_i = 5$, $P_{f.a} = 10^{-7}$; $N_{ce} = 25000$; $F = 2$; коэффициент

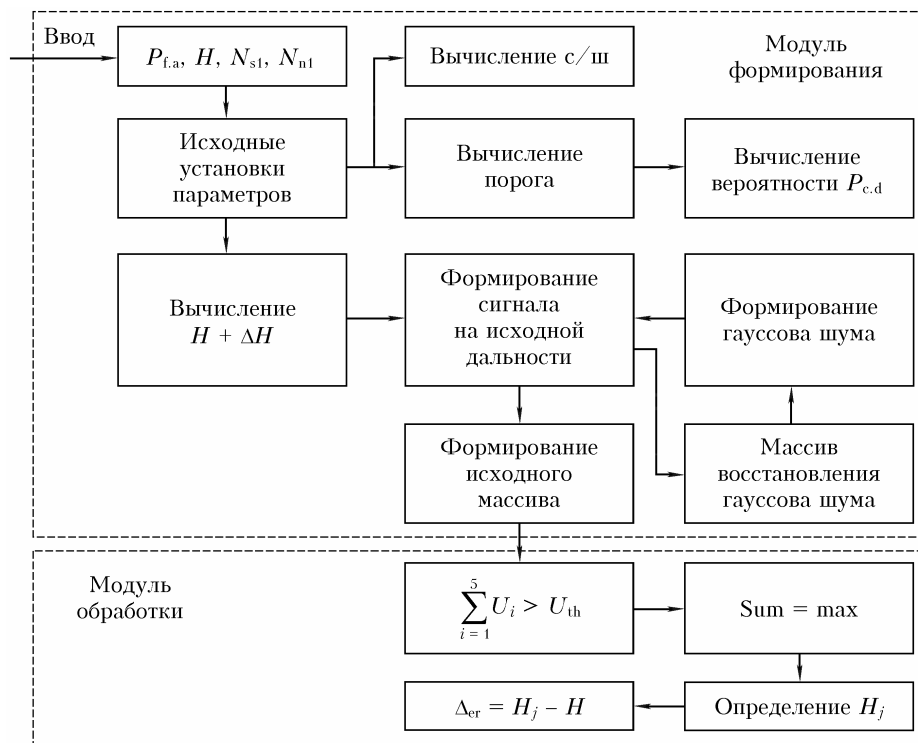


Рис. 4. Структурная схема формирования и обработки пачечного сигнала ЛД

Таблица 1

Результаты моделирования при $N_{s1} = 12$ и $N_n = 3$

№	Диапазон дальности, м	Общее кол-во ошибочных измерений	Число пропусков сигнала	Вероятность ошибки в стробе	Число ошибочных измерений	Величина ошибки, м
1	180000 ÷ 217499	46	0	$1,84 \cdot 10^{-3}$	46	+37500
					0	-37500
2	217500 ÷ 254999	114	4	$4,4 \cdot 10^{-3}$	58	+37500
					52	-37500
					0	+75000
					0	-75000
3	255000 ÷ 292499	110	1	$4,36 \cdot 10^{-3}$	51	+37500
					55	-37500
					2	+75000
					1	-75000
4	292500 ÷ 329999	115	6	$4,36 \cdot 10^{-3}$	52	+37500
					56	-37500
					0	+75000
					1	-75000
5	330000 ÷ 367499	60	1	$2,39 \cdot 10^{-3}$	0	+37500
					59	-37500

умножения ФЭУ и последетекторных усилителей – $5 \cdot 10^4$, сопротивление нагрузки фотодетектора $R_L = 100$ Ом; широкий строб дальности 180 ... 367,5 км.

На основе исходных данных определены параметры обнаружения: пороговое число ф.э. $N_{th,b} = 43$, теоретическая вероятность $P_{c.d.b} = 0,99551$, выходное отношение с/ш по напряжению для пачечного сигнала $Q_u = 4,9$.

Общее количество ошибочных измерений (3-я колонка табл. 1) для диапазона дальности равно сумме числа пропусков сигнала (4-я колонка) и числа ошибочных измерений в том же диапазоне дальности (6-я колонка).

В табл. 2 представлены результаты моделирования для $N_{s1} = 9$, остальные исходные данные те же, что и для табл. 1. На основе ИД определены параметры обнаружения $N_{th,b} = 43$, $P_{c.d.b} = 0,93965$, $Q_u = 4,11$.

Для среднего числа $N_{s1} = 9$ средняя вероятность пропуска сигнала P_{sm} может быть найдена путем осреднения числа пропусков N_{sm} сигнала во всем диапазоне дальностей.

Для $N_{sm} = 619,4$ получено $P_{sm} = 619,4/25000 = 0,02478$.

В табл. 3 представлены результаты расчета относительных частот ошибок измерения дальности с использованием данных из табл. 1 при $N_{s1} = 12$ и из табл. 2 при $N_{s1} = 9$. Из табл. 3 видно, что для ошибки $\Delta_{er} = \pm 37500$ м относительные частоты ошибок измерения дальности $W_1, W_2 \approx 0,5$. Следовательно, для существенного снижения ошибки измерения можно ввести узкий строб дальности.

Существенные особенности полученных результатов моделирования:

– для $H = 180000 \div 217499$ м абсолютные ошибки измерения положительные;

Таблица 2

Результаты моделирования при $N_{s1} = 9$ и $N_n = 3$

№	Диапазон дальности, м	Общее кол-во ошибочных измерений	Число пропусков сигнала	Вероятность ошибки в стробе	Число ошибочных измерений	Величина ошибки, м
1	180000 ÷ 217499	1030	608	$1,699 \cdot 10^{-2}$	403	+37500
					18	+75000
					1	+150000
2	217500 ÷ 254999	1489	623	$3,464 \cdot 10^{-2}$	418	+37500
					423	-37500
					23	+75000
					2	+112500
3	255000 ÷ 292499	1511	615	$3,584 \cdot 10^{-2}$	416	+37500
					441	-37500
					21	+75000
					18	-75000
4	292500 ÷ 329999	1493	607	$3,544 \cdot 10^{-2}$	452	+37500
					405	-37500
					29	+75000
5	330000 ÷ 367499	1126	644	$1,928 \cdot 10^{-2}$	0	-37500
					22	-75000
					3	-112500

Относительные частоты ошибок измерения дальности при $N_{st} = 12$ и $N_{st} = 9$

Частота	$\Delta_{er}, \text{ м}$							
	+37500	-37500	+75000	-75000	+112500	-112500	+150000	-150000
$W_1 (N_{st} = 12)$	0,478	0,513	$4,6 \cdot 10^{-3}$	$4,6 \cdot 10^{-3}$	0	0	0	0
$W_2 (N_{st} = 9)$	0,476	0,486	$1,746 \cdot 10^{-2}$	$1,943 \cdot 10^{-2}$	$5,631 \cdot 10^{-4}$	$8,446 \cdot 10^{-4}$	$2,815 \cdot 10^{-4}$	0

Таблица 4

Результаты расчета и моделирования измерения дальности при $N_s = 45$ и $N_n = 15$

Диапазон дальности, м	$P_{f.a}$ исходная	$P_{c.d}$ теория	N_{sm} моделирование
180000 ÷ 217499	10^{-7}	0,93965	1540
	10^{-6}	0,958584	1061
217500 ÷ 254999	10^{-7}	0,93965	1512
	10^{-6}	0,958584	1041
255000 ÷ 292499	10^{-7}	0,93965	1477
	10^{-6}	0,958584	1005
292500 ÷ 329999	10^{-7}	0,93965	1529
	10^{-6}	0,958584	1051
330000 ÷ 367499	10^{-7}	0,93965	1532
	10^{-6}	0,958584	1062

– для $H = 330000 \div 367499$ м абсолютные ошибки измерения отрицательные;
– для остальных трех диапазонов – могут иметь любой знак.

Это обусловлено принципом обработки пачечного сигнала и наличием строба дальности. То есть из-за принципа накопления сигнала грубая ошибка измерения H (при выходном отношении с/ш в несколько единиц) не может быть меньше, чем установка по дальности между импульсами пачки, равная 37500 м. При этом имеются отдельные выбросы ошибок измерения H , достигающие ± 75000 м (см. табл. 1, 2). Можно ожидать, что при снижении отношения с/ш число таких выбросов ошибок будет расти, так как будет расти общее число ошибок измерения дальности (см. табл. 2).

Важно отметить, что флуктуационная ошибка измерения H определяется длительностью импульса излучения и дискретом АЦП и составляет менее 1,5 м.

Ошибки дальности, соответствующие диапазону 1, не могут быть отрицательными, так как в этом случае рассчитанная дальность будет находиться вне строба дальности. Аналогично ошибки измерения H , соответствующие диапазону 5, не могут быть положительными, так как в этом случае рассчитанная дальность будет находиться вне строба дальности. Влияние границ строба приводит к снижению вероятности ошибки для граничных диапазонов примерно вдвое; распределение вероятности ошибки измерения дальности в стробе дальности имеет дискретный характер.

В результате анализа полученных результатов в программу моделирования был введен «узкий» следящий строб с длительностью T_0 . Использование такого строба позволило полностью устранить грубую ошибку измерения H , сохранив при этом только пропуски сигналов.

В табл. 4 представлены результаты моделирования измерения дальности при моноимпульсном лазерном зондировании КО для двух значений $P_{f.a}$ при $N_s = 45$, $N_n = 15$ и $N_{ce} = 25000$.

Оценка вероятности пропуска сигнала в моноимпульсном режиме определяется как

$$\langle P_{sm_} \rangle = 1 - \langle P_{c.d} \rangle = N_{sm_} / N_{ce},$$

где $\langle P_{sm_} \rangle$ – усредненное значение вероятности пропуска сигнала по всем диапазонам; $\langle P_{c.d} \rangle$ – усредненное значение вероятности правильного обнаружения сигнала по всем диапазонам; $N_{sm_}$ – среднее значение числа пропусков сигнала по всем диапазонам.

Из табл. 4 следует, что $N_{sm_} = 1518$ и $\langle P_{sm_} \rangle = 6,072 \cdot 10^{-2}$ для $P_{f.a} = 10^{-7}$; $\langle P_{c.d} \rangle = 0,93928$ и отличается от теоретической в четвертом знаке после

запятой; $N_{sm_} = 1044$ и $\langle P_{sm_} \rangle = 4,176 \cdot 10^{-2}$ для $P_{f.a} = 10^{-6}$; $\langle P_{c.d} \rangle = 0,95824$ и отличается от теоретической в четвертом знаке после запятой. Следовательно, вычисленная теоретическая $\langle P_{c.d} \rangle$ хорошо согласуется с эмпирической, полученной в результате моделирования.

Заключение

По результатам выполненного моделирования обработки пачечных сигналов в ЛД можно сделать следующие выводы.

1. Грубая ошибка измерения дальности соответствует временному интервалу между импульсами излучения пачки или кратна ему.

2. Плотность вероятности грубых ошибок измерения дальности с использованием пачечных сигналов имеет дискретный характер.

3. Использование следящего строба по дальности с длительностью, равной временному интервалу между импульсами излучения пачки, позволит эффективно уменьшить ошибку измерения дальности.

1. Матвеев И.Н., Протопопов В.В., Троицкий И.Н., Устинов Н.Д. Лазерная локация / под ред. Н.Д. Устинова. М.: Машиностроение, 1984. 272 с.

2. Бельский А.Б., Здор С.Е., Колюшко В.И., Яцкевич Н.Г. Новый подход к разработкам оптико-электронных средств мониторинга околоземного космического пространства // Опт. журн. 2009. Т. 86, № 8. С. 22–28.

3. Degnan J.J. Unified approach to photon-counting microlaser rangefinders, transponders, and altimeters // Surv. Geophys. 2001. V. 22. P. 431–447. DOI: 10.1023/A:1015659931843.

4. Васильев В.П., Шаргородский В.Д. Современное состояние высокоточной спутниковой лазерной дальнометрии в России // Фотоника. 2017. Т. 66, № 6. С. 74–85. DOI: 10.22184/1993-7296.2017.66.6.74.85.

5. URL: <https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov> (last access: 20.03.2021).
6. *Wilkinson M., Schreiber U., Procházka I., Moore C., Degnan J., Kirchner G., Zhongping Z., Dunn P., Shargorodskiy V., Sadovnikov M., Courde C., Kunimori H.* The next generation of satellite laser ranging systems // *J. Geodesy*. 2018. V. 93. P. 2227–2247. DOI: 10.1007/s00190-018-1196-1.
7. *Цыба Е.Н.* Вычисление параметров вращения Земли по результатам спутниковой лазерной дальнометрии международной сети ILRS // *Тр. ИПА РАН*. 2016. Вып. 38. С. 66–70.
8. *Основы построения радиолокационных станций радиотехнических войск: учебник / В.Н. Тяпкин, А.Н. Фомин, Е.Н. Гарин [и др.]; под общей ред. В.Н. Тяпкина.* Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2011. 536 с.
9. *Лось А.П., Розов А.К.* Способ некогерентного обнаружения повторяющихся сигналов // *Изв. вузов России. Радиоэлектроника*. 2016. № 3. С. 7–12.
10. *Чухломин И.Е., Файзулин Н.А., Москович И.Р.* Обнаружение короткой пачки при адаптивной междупериодной обработке // *Радиопромышленность*. 2016. № 4. С. 124–129.
11. *Васильев В.П., Глуценко Н.Ф., Знаменский И.В., Сумерин В.В.* Лазер с диодной накачкой в локаторах с «пачечным» сигналом // *Системотехника*. 2004. № 2. URL: <http://systech.miem.edu.ru/2004/n2/Vasiliev.htm> (last access: 20.03.2021).
12. *Долгий С.И., Невзоров А.А., Невзоров А.В., Макеев А.П., Романовский О.А., Харченко О.В.* Лидарный комплекс для измерения вертикального распределения озона в верхней тропосфере–стратосфере // *Оптика атмосф. и океана*. 2018. Т. 31, № 9. С. 764–770; *Dolgii S.I., Nevzorov A.A., Nevzorov A.V., Makeev A.P., Romanovskii O.A., Kharchenko O.V.* Lidar complex for measurement of vertical ozone distribution in the upper troposphere–stratosphere // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 6. P. 702–708. DOI: 10.15372/AOO20180911.
13. *Маричев В.Н., Бочковский Д.А.* Лидарный комплекс станции высотного зондирования атмосферы ИОА СО РАН // *Оптика атмосф. и океана*. 2020. Т. 33, № 5. С. 399–406.
14. *Надеев А.И., Пеннер И.Э., Шевцов Е.С.* Фотоприемный модуль для регистрации лидарных сигналов в ближней ИК-области // *Оптика атмосф. и океана*. 2020. Т. 33, № 4. С. 309–314; *Nadeev A.I., Penner I.E., Shevtsov E.S.* Photodetector module for recording lidar signals in the near-infrared region // *Atmos. Ocean. Opt.* 2020. V. 33, N 4. P. 400–405. DOI: 10.15372/AOO20200410.
15. *Гальярди Р.М., Карп Ш.* Оптическая связь / под ред. А.Г. Шереметьева. М.: Связь, 1978. 424 с.
16. *Знаменский И.В., Тихомиров А.А.* Оптимизация и расчет параметров лазерного высотомера при некогерентном приеме // *Оптика атмосферы*. 1990. Т. 3, № 5. С. 552–558.
17. *Глазов Г.Н.* Статистические вопросы лидарного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1987. 311 с.

V.P. Vasiliev, I.V. Znamenskii, A.A. Tikhomirov. **Simulation of batch signal processing in laser range-finders.**

Processing of batch signals of a laser rangefinder intended for measuring the spacecraft orbit altitude using the pulsed method in the altitude range 180–370 km is simulated for a photodetector operating in the charge-integration mode with allowance for the background solar radiation power. In this case, the rangefinder emits a batch of five 10-ns pulses with a lag between pulses of 250 μ s. Digital processing of the received echo signals is based on the method of synchronous post-detector summation of the amplitudes of all pulses in the batch. To simulate the procedure of signal processing, a 180–367.5 km pulse strobe was used. The simulation program which generates normal Gaussian noise with the mean value and the variance depending on the mean background radiation power is described together with the program interface. The probabilities of false alarm and correct signal detection are determined with allowance for the threshold number of photoelectrons for different numbers of signal photoelectrons in a single pulse of the batch. The errors of measuring the altitude range are investigated for the entire strobe.