

УДК 623.4.023.43

## ИМПУЛЬСНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ДАЛЬНОМЕРЫ ДЛЯ ОПТИКО-ЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

А.А. СТАВРОВ, М.Г. ПОЗДНЯКОВ

*Открытое акционерное общество "Пеленг"*

*Макаенка, 23, Минск, 220023, Беларусь*

*Поступила в редакцию 12 мая 2003*

Проанализированы особенности энергетических и точностных характеристик импульсных лазерных дальномеров, используемых в составе оптико-локационных систем различного назначения, с учетом параметров аппаратуры, среды распространения информационных световых потоков, характеристик лоцируемых объектов и лазерной безопасности. Отмечается удовлетворительное согласие расчетных данных с результатами натурных экспериментов.

*Ключевые слова:* оптическая локация, дальномер, лазер.

### Введение

Значительное количество практически важных задач связано с дистанционными измерениями дальности. Успешная их реализация возможна с использованием методов лазерной дальнометрии. Дальномерные устройства, помимо самостоятельного применения, могут эффективно сочетаться с информационными каналами других типов. Это обеспечивает создание сложных аппаратно-программных комплексов, способных осуществлять информационное обеспечение широкого круга потребителей.

Существенное внимание в лазерной дальнометрии уделяется, как правило, вопросам оптимизации аппаратурных решений. Однако не менее важную роль в дистанционных измерениях играют также проблемы прохождения информационных световых потоков через атмосферу и отражения их от лоцируемых объектов. Одним из принципиальных элементов практического использования дальномеров является лазерная безопасность.

В настоящей работе рассмотрены вопросы, связанные с реализацией лазерных дальномеров в составе оптико-локационных систем различного назначения. Основное внимание уделено импульсным лазерным дальномерам (ИЛД), главные достоинства которых состоят в возможности реализации высоких значений следующих основных характеристик: дальности действия, определяемой высокой энергетикой генерируемых световых потоков; точности определения дальности, связанной с зондирующими импульсами короткой длительности; пространственной селективности, обусловленной низкой расходимостью лазерного луча.

### Анализ энергетических характеристик

В зависимости от области применения можно выделить следующие категории ИЛД: обеспечивающие измерение дальности до сильно удаленных динамичных объектов, обладающих достаточно стабильными параметрами движения и диффузным характером отражения, либо снабженных ретрорефлекторами;

работающие по среднеудаленным высокодинамичным диффузно отражающим или кооперированным объектам со сложными пространственно-временными эволюциями;

измеряющие расстояние до неподвижных или малоподвижных объектов с диффузным в большинстве случаев характером отражения.

Потенциальная возможность реализации высоких энергетических и точностных параметров ИЛД ставит задачу оптимизации их структуры, обеспечивающей устойчивое функционирование и надежную метрологическую аттестацию аппаратуры. Принимая во внимание, что в характерных для оптико-локационных систем прикладных задачах предпочтительна ситуация, при которой каждому лоцирующему сигналу соответствует достоверное измерение расстояния, оптимальная частота обновления информации о дальности должна быть адекватна частоте следования лазерных импульсов. Влияние других значимых параметров ИЛД на процедуру и результаты измерения дальности исследуется ниже.

Оценка пространственной зоны измерения дальности может быть осуществлена с использованием локационного уравнения [1]:

$$P_{np} = P_{nep} \frac{4S_{omp}}{\pi\theta_{nep}^2 D^2} P_{omp} \frac{4S_{np}}{\pi\theta_{omp}^2 D^2} \tau_{nep} \tau_{np} \tau_{атм}^2. \quad (1)$$

Здесь  $P_{np}$  — мощность принимаемого излучения;  $P_{nep}$ ,  $\theta_{nep}$  — мощность и расходимость излучения передатчика;  $S_{omp}$ ,  $R_{omp}$  — площадь и коэффициент отражения лоцируемого объекта;  $\theta_{omp}$  — расходимость отраженного излучения;  $S_{np}$  — площадь приемной апертуры дальномера;  $\tau_{nep}$ ,  $\tau_{np}$ ,  $\tau_{атм}$  — соответственно пропускание передатчика и приемника ИЛД, а также атмосферы.

Выражение (1) справедливо для кооперированного (снабженного ретрорефлектором) объекта. В случае диффузно отражающей поверхности данная формула несколько трансформируется [1]:

$$P_{np} = P_{nep} \rho_o \frac{4S_{np}}{\pi\theta_{nep}^2 D^4} \tau_{nep} \tau_{np} \tau_{атм}^2, \quad (2)$$

где  $\rho_o$  — эффективная площадь рассеяния (ЭПР) объекта. При прочих равных условиях отраженный от ретрорефлектора сигнал будет намного больше, что существенно повышает энергетический потенциал (радиус действия) дальномера.

Обозначая совокупность фиксированных параметров локационного уравнения коэффициентом  $A$ , зависимость дальности действия от функционально наиболее значимых и доступных для вариации характеристик ИЛД можно записать как [2]

$$D = A P_{\dot{\alpha}\dot{\alpha}\dot{\delta}}^{1/4} \left( \tau_{\dot{\alpha}\dot{\alpha}\dot{\delta}} / \theta_{\dot{\alpha}\dot{\alpha}\dot{\delta}} \right)^{1/2}. \quad (3)$$

Из (3) следует, что зависимость дальности  $D$  от расходимости излучения передатчика  $\theta_{nep}$  более сильна, чем от его мощности  $P_{nep}$ . При этом имеет место существенное функциональное ограничение параметра  $\theta_{nep}$ , обусловленное погрешностью используемой системы наведения: чрезмерное уменьшение величины расходимости может вызывать промах. Последнее обстоятельство особенно важно при лоцировании высокодинамичных объектов, а также при размещении дальномера на движущемся транспортном средстве.

Необходимо учитывать также, что входящее в формулы (1) и (2) пропускание атмосферы  $\tau_{атм}$  является функцией дальности [3]:

$$\tau_{атм} = \exp \left[ -3,912 \frac{D}{S_m} \left( \frac{0,55}{\lambda} \right)^q \right], \quad (4)$$

где  $S_m$  — метеорологическая дальность видимости (МДВ);  $\lambda$  — длина волны зондирующего излучения,  $q=0,585 \cdot S_m^{1/3}$  при  $S_m \leq 6$  км и  $q=1,3$  для  $S_m > 6$  км. По этой причине в общем виде пара-

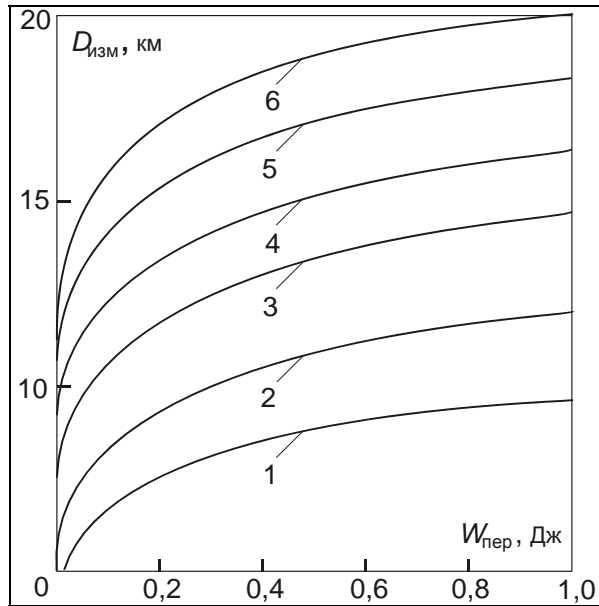


Рис. 1. Зависимость дальности измерений  $D_{изм}$  от энергии излучения передатчика  $W_{пер}$  при  $S_m=10$  км;  $\theta_{пер}=5$  мрад (1), 1 мрад (2–6);  $P_{пр}=10^{-8}$  Вт (1, 2, 4–6),  $10^{-7}$  Вт (3);  $d_{пр}=100$  мм (1), 300 мм (2, 3, 5), 500 мм (4, 6);  $\rho_o=0,1$  м<sup>2</sup> (1, 3, 5, 6), 0,01 м<sup>2</sup> (2, 4)

Последнее обстоятельство обусловлено снижением доли световой энергии, отраженной от объекта, как за счет расходимости лазерного излучения, так и в связи с поглощением его слоем атмосферы.

Существенное влияние на величину  $D_{изм}$  оказывают и другие переменные параметры. Так, на рис. 2,а представлена зависимость дальности действия от расходимости излучения передатчика  $\theta_{пер}$ . Значительный рост  $D_{изм}$  наблюдается в области  $\theta_{пер}=1-2$  мрад. Типичный ход зависимости  $D_{изм}$  от метеорологической дальности видимости  $S_m$  показан на рис. 2, б.

При установке на поверхности объекта ретрорефлектора требования к энергетическим параметрам дальномера существенно снижаются. Так, характерные для предыдущих ситуаций дальности в 20–30 км могут быть достигнуты при  $W_{пер}=0,1-0,2$  Дж, если работа ведется по уголкового отражателю диаметром 60 мм, обеспечивающему расходимость отраженного излучения  $5 \cdot 10^{-5}$  рад (рис. 3,а). При этом может быть также заметно уменьшена чувствительность фотоприемного тракта дальномера (рис. 3,б).

Частичное решение проблемы лазерной безопасности при эксплуатации и обслуживании ИЛД возможно с помощью устройств управления световым потоком, содержащихся, как правило, в передающем тракте. Дополнительным способом существенного снижения факторов риска является использование лазерных источников с длинами волн в спектральной области 1,5–1,6 мкм. Помимо улучшения степени безопасности такое излучение также хорошо пропускается атмосферой.

### Метрологические аспекты измерений

Для выявления метрологических ограничений ИЛД обсудим основные источники и функциональные зоны локализации наиболее значимых компонент погрешности. Рассмотрим их в последовательности, поэтапно характеризующей процесс измерения дальности.

метр  $D$  может быть получен лишь путем численного решения локационного уравнения. На практике учет атмосферного фактора приводит к заметному снижению предельных расчетных значений величины  $D$ .

С учетом изложенного проведена серия расчетов, демонстрирующих влияние названных параметров на энергетические характеристики ИЛД. Использовались следующие фиксированные величины:  $\lambda=1,54$  мкм; пропускание формирующей оптики  $\tau_{opt}=\tau_{пер} \cdot \tau_{пр}=0,5$ ; длительность импульса генерации по полуширине  $\Delta t=10$  нс. В качестве переменных служили параметры  $P_{пр}$ ,  $\rho_o$ ,  $\theta_{пер}$ ,  $S_m$ , энергия в импульсе излучения лазерного передатчика  $W_{пер}=P_{пер} \cdot \Delta t$  и диаметр входного зрачка приемного канала  $d_{пр}$ . Рассчитывалась измеряемая дальность  $D_{изм}$ .

На рис. 1 показана зависимость  $D_{изм}$  от энергии лазерного импульса  $W_{пер}$  для диффузно отражающих объектов. Наблюдается весьма быстрое нарастание дальности на начальных участках графиков, после чего ход кривых существенно замедляется.

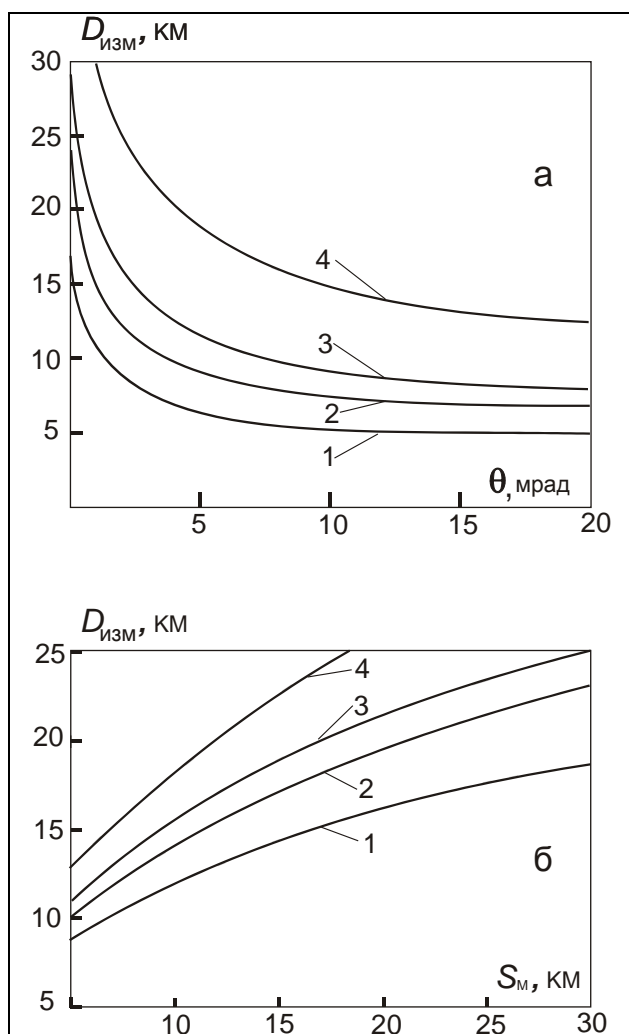


Рис. 2. Зависимость дальности  $D_{изм}$  до диффузно отражающего объекта от расходимости излучения передатчика  $\theta_{пер}$  (а) и метеорологической дальности видимости  $S_m$  (б) при  $W_{пер}=0,2$  Дж: а —  $S_m=10$  км (1, 2), 20 км (3), 30 км (4);  $\rho_ц=0,01$  м<sup>2</sup> (1), 0,1 м<sup>2</sup> (2, 3), 1,0 м<sup>2</sup> (4);  $P_{пр}=10^{-8}$  Вт;  $d_{пр}=150$  мм; б —  $d_{пр}=50$  мм (1), 100 мм (2, 4), 150 мм (3);  $\rho_о=0,1$  м<sup>2</sup> (1–3), 1,0 м<sup>2</sup> (4);  $P_{пр}=5 \cdot 10^{-9}$  Вт;  $\theta_{пер}=1$  мрад

Вторая область локализации компонент погрешностей связана с распространением лазерного излучения через атмосферу и включает в себя два главных фактора: флуктуацию амплитуды принимаемых сигналов, вызываемую турбулентностью атмосферы, и увеличение времени распространения световых импульсов, обусловленное регулярной рефракцией атмосферы. Снижение влияния на результаты измерений дальности первого из названных факторов может быть также обеспечено с помощью УВП. Методика учета второго фактора представлена в [4].

Третьей областью локализации ошибок измерения является лоцируемый объект. Следует различать две предельные ситуации: работу дальномера по диффузно отражающему или по кооперированному объекту. Так, при измерении дальности до объекта с диффузно отражающей поверхностью величина погрешности может достигать размеров этого объекта в направлении

Первая область локализации включает в себя источник формирования локационных сигналов (лазерный передатчик) и другие устройства передающего тракта дальномера. При этом механизм формирования ошибок измерений включает в себя следующие основные факторы: нестабильность временного положения импульсов генерации, нестабильность их амплитуды и формы.

Не обсуждая физическую природу этих факторов, отметим, что при отсутствии необходимости привязки результатов измерений к шкале времени первый из данных факторов во внимание может не приниматься. В случае же необходимости такой привязки может быть установлен дополнительный измеритель временных интервалов между стартовым сигналом дальномера и следующим за ним импульсом системы единого времени (СЕВ). Подобная ситуация характерна, например, при использовании лазера с пассивным затвором. В случае лазера с активной модуляцией добротности резонатора импульсы генерации могут быть синхронизованы с сигналами СЕВ непосредственно.

Регистрация стартового и стопового импульсов излучения с помощью единого фотоприемного устройства (ФПУ) переносит решение проблемы нестабильности их амплитуды и формы в область приемного тракта ИЛД, возлагая ее на устройство временной привязки (УВП). Технически такая задача решается путем ответвления незначительной части лазерного излучения от источника к ФПУ. Необходимо подчеркнуть также, что подобная схема построения ИЛД одновременно ликвидирует дополнительную, искажающую результаты измерения дальности задержку стартового сигнала в электронных цепях дальномера, которая формируется в случае его регистрации отдельным ФПУ.

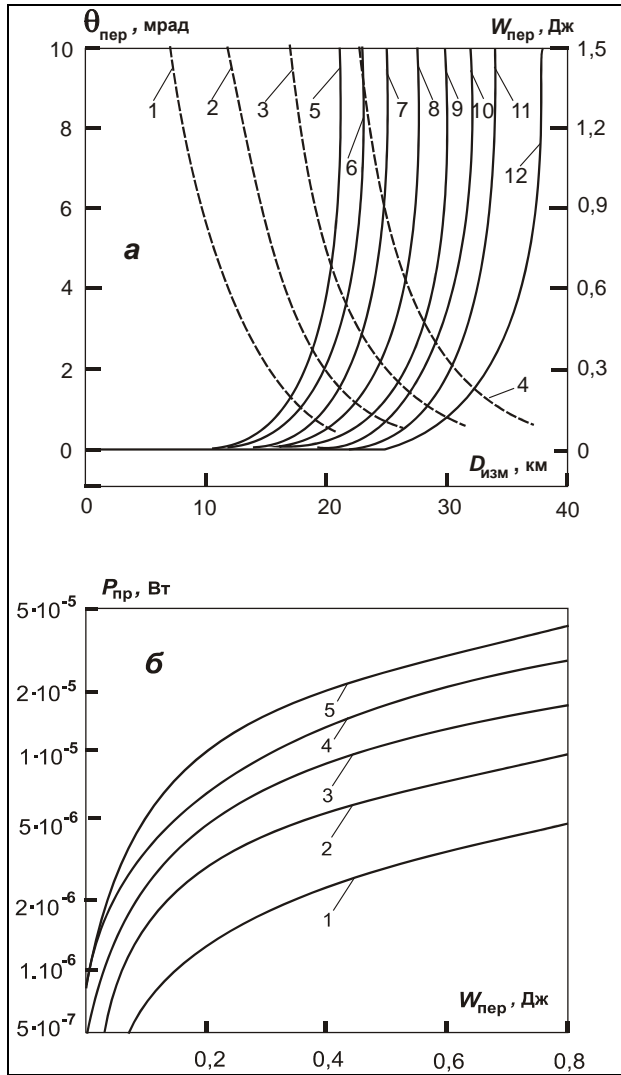


Рис. 3. Зависимость дальности действия  $D_{изм}$  от расходимости  $\theta_{пер}$  (1–4) и энергии  $W_{пер}$  (5–12) излучения передатчика при работе по объекту, снабженному уголковым отражателем (а), а также связь чувствительности фотоприемного устройства  $P_{пр}$  и энергии излучения передатчика  $W_{пер}$  в зависимости от диаметра входного зрачка приемника  $d_{пр}$  (б): а —  $W_{пер}=1$  мДж (1), 10 (2), 100 (3), 150 мДж (4);  $\theta_{пер}=10$  мрад (5), 7,5 (6), 5 (7), 3 (8), 2 (9), 1,5 (10), 1 (11), 0,5 мрад (12); б —  $d_{пр}=100$  мм (1), 150 (2), 200 (3), 250 (4), 300 мм (5);  $D_{изм}=40$  км

сигналов (обусловленные, например, приближением или удалением лоцируемого объекта) могут обрабатываться оптическими аттенуаторами, входящими в состав передающего и приемного трактов дальномера.

Среди разнообразия современных ФПУ имеются фактически лишь три типа, удовлетворяющих требованиям ИЛД. К ним относятся фотоэлектронные умножители (ФЭУ), лавинные фотодиоды (ЛФД) и pin-фотодиоды (pin-ФД). Для получения неискаженного квантовыми эффектами наносекундного фотоотклика импульс должен содержать не менее 103 фотоэлектронов, что при квантовом выходе фотоэмиссии  $\alpha \approx 0,1$  требует до 104 фотонов

распространения лазерного излучения [2]. Практическим выводом в подобной ситуации является нецелесообразность наращивания точностных характеристик ИЛД выше названного предела, что в ряде случаев существенно экономит аппаратные и финансовые затраты. При лоцировании кооперированного объекта подобная проблема практически не существует: ошибка, обусловленная размерами объекта, пренебрежимо мала и при оценках погрешности измерения дальности может не приниматься во внимание.

Среди факторов, вызывающих ошибки, локализованные в области объекта, следует назвать также погрешность наведения. И хотя напрямую от ИЛД она не зависит, попадание на объект разных зон светового пучка может вносить дополнительную погрешность, связанную с неоднородным распределением энергии по сечению последнего. Отработка данного фактора с помощью УВП позволяет, как и в предыдущих ситуациях, заметно снизить его влияние на суммарную погрешность измерения дальности.

Наконец, четвертая область локализации компонент погрешности связана с приемным трактом дальномера. Она формируется в процессе функционирования ряда устройств, главными из которых являются ФПУ и УВП, а также генератор опорной частоты (ГОЧ) и блок счета дальности (БСД). Обсудим роль каждого из них в формировании метрологических особенностей рассматриваемых категорий ИЛД.

Основной задачей фотоприемного устройства, помимо обеспечения требуемого уровня чувствительности, является реализация неискаженной формы локационных импульсов. Ее решение связано с быстродействием и динамическим диапазоном ФПУ. При этом предполагается, что низкоскоростные изменения уровня принимаемых световых

[5, 6]. Имея в виду, что реальное значение  $\alpha$  может быть заметно выше, но для получения достоверного единичного измерения дальности необходимо отношение сигнал/шум, значительно превышающее единицу (на практике оно, как правило, не менее 3), соответствующая предельная мощность принимаемого светового сигнала должна составлять порядка  $10^{-7}$  Вт. Реализация такой чувствительности при быстродействии  $10^{-8}$ – $10^{-9}$  с и максимально широком динамическом диапазоне принимаемых сигналов представляет достаточно сложную техническую и технологическую задачу.

Наиболее существенная функциональная нагрузка, связанная с минимизацией погрешности измерения дальности, ложится, как это вытекает из изложенных материалов, на устройство временной привязки ИЛД. При использовании наиболее простого однопорогового УВП ошибка измерения временного интервала может достигать половины длительности импульса локационного сигнала, что в ряде случаев эквивалентно дальности в несколько метров.

Дальнейшее снижение величины погрешности, обусловленной УВП, возможно путем усложнения схемотехники и алгоритмов функционирования подобных устройств [7]. Так, исследованное нами УВП, реализующее метод выделения постоянной части импульса со следящим порогом, позволяет учитывать поправку в дальность  $\Delta D_{yвп}$  с помощью соотношения  $\Delta D_{yвп} = 0,56 - 1,05 U_{ex}^2 - 0,06 U_{ex}^3$ , где  $U_{ex}$  — амплитуда сигнала на входе устройства. Остаточная (неисключенная) часть погрешности такого УВП не превышает 0,15–0,25 м, что удовлетворяет требованиям всех рассмотренных категорий ИЛД при работе по ретрорефлектору, а в случае диффузно отражающих объектов является даже избыточно низкой.

В общем случае источниками ошибок измерителя временных интервалов (ИВИ), включающего в себя ГОЧ и БСД, являются дискретизация (квантование) измеряемого временного интервала, а также вариации периода квантования  $T_{кв}$ , вызываемые нестабильностью рабочей частоты  $F_{кв}$  генератора ( $F_{кв} = 1/T_{кв}$ ) [8]. Поэтому текущее значение погрешности ИВИ может быть записано в виде  $\Delta t_{ивп} = \Delta t_{кв} + \Delta t_{оч}$ , где  $\Delta t_{кв}$ ,  $\Delta t_{оч}$  — соответственно погрешность квантования и погрешность опорной частоты. Величина  $\Delta t_{кв}$  обусловлена несинфазностью стартового  $\Delta t_1$  и стопового  $\Delta t_2$  сигналов с импульсами тактовой частоты:  $\Delta t_{кв} = \Delta t_1 + \Delta t_2$ . Ее среднеквадратичное отклонение  $\sigma_{кв} \approx 0,4 T_{кв}$ . Значение  $\Delta t_{оч}$  связано с нестабильностью рабочей частоты  $\Delta F_{пч}$  и неточностью настройки на рабочую частоту  $\Delta F_{ни}$  и зависит от величины измеряемого временного интервала (дальности  $D$  до цели):  $\Delta t_{оч} = [(\Delta F_{пч}/F_{кв}) + (\Delta F_{ни}/F_{кв})] \cdot D/c$ , где  $c$  — скорость света.

Очевидно, что при использовании для определения дальности метода прямого счета значение  $\Delta t_{кв}$  будет тем меньше, чем выше частота опорного генератора  $F_{кв}$ . На практике ограничивающим фактором наращивания величины  $F_{кв}$  является оправданность аппаратных и финансовых затрат. Альтернативным способом минимизации погрешности квантования является применение фазированных генераторов опорной частоты [9–11]. Главным методом снижения параметра  $\Delta t_{оч}$  является его максимально точная настройка на частоту, кратную скорости света в вакууме [12]. В целом для высокочастотных ГОЧ весьма полезна термостабилизация.

В нашей работе в качестве базового был принят генератор опорной частоты с  $F_{кв} \approx 30$  МГц. В нем используется первая гармоника кварцевого резонатора типа РГ–05–16ЕТ–29.979МГц–МВ–В. Генератор функционирует в диапазоне температур от  $-50$  до  $50^\circ\text{C}$  без дополнительной термостабилизации, обеспечивает разрешающую способность 5 м и может быть применен в составе ИЛД, предназначенных для работы по диффузно отражающим объектам. Расчетное значение среднеквадратичной погрешности ИВИ, созданного с использованием такого генератора, эквивалентно 1,4 м при проведении измерений дальности до 10 км.

Для работы по кооперированным объектам при расстоянии в десятки километров может служить ИВИ с тактовой частотой 150 МГц (разрешение 1 м). В нем используется усиленный сигнал пятой гармоники базового ГОЧ, а вся конструкция помещена в термостат, обеспечивающий поддержание температуры генератора с точностью  $0,2^\circ\text{C}$  в диапазоне внешних температур от  $-30$  до  $50^\circ\text{C}$ .

Последующее снижение погрешности ИВИ данного типа достигается за счет увеличения эффективной тактовой частоты генератора  $F_{эф}$  путем фазового сдвига исходного синусоидального сигнала с  $F_{кв} \approx 150$  МГц. Так, при сдвиге двух синусоид на половину периода реализуется значение  $F_{эф} \approx 300$  МГц (разрешение 0,5 м). Обеспечиваемая им величина среднеквадратич-

ной погрешности измерения дальности не превышает 0,2 м. При сдвиге четырех синусоидальных сигналов на четверть периода друг относительно друга реализуется  $F_{эф} \approx 600$  МГц (разрешение 0,25 м, среднеквадратичная погрешность 0,1 м). Применение подобных ГОЧ позволяет не учитывать ошибку квантования при решении большинства прикладных задач в составе оптико-локационных систем даже в случае работы по кооперированным объектам.

Для практической отработки рассмотренных схемных решений были созданы макеты ИЛД, которые исследовались в натуральных условиях. Зарегистрировано удовлетворительное согласие экспериментальных и расчетных данных.

### Заключение

Результаты исследований могут быть положены в основу модернизации ранее выпущенных и создания новых оптико-локационных систем с лазерными каналами измерения дальности.

## PULSE LASER RANGEFINDERS FOR OPTIC LOCATION SYSTEMS

A.A. STAVROV, M.G. POZDNIAKOV

### Abstract

The paper deals with the peculiarities of energy and accuracy characteristics of pulse laser rangefinders, used as a part of optical location systems of various purpose, taking into consideration the equipment parameters, the medium for spreading of information luminous fluxes, specifications of the objects to be located and laser safety. A sufficient correspondence of the calculated data with the results of the real life experiments is pointed out.

### Литература

1. *Молебный В.В.* Оптико-локационные системы. М., 1981.
2. *Климков Ю.Н.* Основы расчета оптико-локационных приборов с лазерами. М., 1978.
3. *Хинрикус Х.В.* Шумы в лазерных информационных системах. М., 1987.
4. *Ставров А.А., Поздняков М.Г.* Рефракционные параметры атмосферы и их влияние на точностные характеристики лазерных дальномеров. Мн., 2003.
5. *Гамал К.* // Квантовая электроника. 1978. № 11. С. 2428–2435.
6. *Батраков А.С., Бутусов М.М., Гречко Г.П. и др.* Лазерные измерительные системы / Под ред. Д.П. Лукьянова. М., 1981.
7. *Малевиц И.А.* Методы и электронные системы анализа оптических процессов (при их временном отображении). Мн., 1981.
8. Расчет элементов импульсных и цифровых схем радиотехнических устройств / Под ред. Ю.М. Казаринова. М., 1976.
9. Аппаратура для частотных и временных измерений / Под ред. М.И. Горшкова. М., 1971.
10. *Малевиц И.А., Чернявский А.Ф.* // Приборы и техника эксперимента. 1971. № 6. С. 108–111.
11. *Данилевич В.В., Чернявский А.Ф., Якушев А.К.* // Приборы и техника эксперимента. 1977. № 1. С. 232.
12. *Воробьев В.И.* Оптическая локация для радиоинженеров / Под ред. В.П. Васильева. М., 1983.