

В. Л. Козлов, И. А. Кобак, С. И. Чубаров

**МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ
ЭЛЕМЕНТЫ ПРЕЦИЗИОННЫХ ЛАЗЕРНЫХ
ИЗМЕРИТЕЛЕЙ РАССТОЯНИЙ**

Введение

Разработка и создание прецизионных лазерных средств измерения расстояний в настоящее время является актуальной задачей в связи с широкой востребованностью данных приборов в строительстве, геодезии, картографии и других областях науки и техники. Исследования по разработке методов формирования и обработки дистанционных зондирующих сигналов и функциональных элементов лазерных дальномерных систем начали проводиться на кафедре электрофизики еще в начале 70-х годов XX века в тесном взаимодействии с отделом дальнометрии ГОИ им. С. И. Вавилова (г. Ленинград). В результате были защищены несколько кандидатских диссертаций и выполнены ряд совместных НИР по разработке методов повышения точностных характеристик оптических дальномерных систем высокого пространственно-временного разрешения [1–4]. Традиционно эта проблема решалась увеличением мощности источника лазерного излучения, габаритов приемной оптической системы, временного разрешения измерительной схемы. В отличие от известных методов, разработанные на кафедре принципы повышения точностных характеристик лазерных дальномеров основывались на выборе спектральной области работы и параметров источника излучения, использовании патентно-защищенных методов формирования зондирующих сиг-

налов, приема и эффективной обработки дистанционных сигналов с применением оригинальных методов корреляционной обработки, что позволило достигнуть значительного повышения точности измерений прецизионных дальномеров.

1. Методы построения и повышения точностных характеристик прецизионных лазерных дальномеров

Одним из перспективных принципов построения прецизионных лазерных дальномеров является фазовый метод измерения [5]. Измерение дальности основано на выделении разности фаз дистанционного сигнала и опорного. Повышение точности измерений обеспечивается трансформацией искомой разности фаз опорного и измерительного сигналов на низкочастотную несущую с помощью дополнительного измерительного генератора. Для получения разрешения по дальности $\Delta L \sim 1$ мм нестабильность частот опорного, измерительного генераторов и разностной частоты ($f_m - f_{оп}$) должны быть не хуже $\Delta f/f = 10^{-6}$. Стабилизация разностной частоты осуществляется системой фазовой автоподстройки на основе цифрового синтезатора и частотного детектора [6]. Диапазон измеряемых расстояний определяется частотой модуляции f_m , и для $f_m = 10.001$ МГц составляет 0–15 метров при погрешности измерений ± 1 мм. В дальномере использовался лазер с длиной волны излучения 0.83 мкм, мощность излучения 10 мВт.

С целью повышения точности фазовых измерений при модуляции излучения в диапазоне СВЧ были разработаны способы фазовых измерений в точке с максимальной крутизной фазовой характеристики. В первом способе это достигалось благодаря периодической коммутации фазы модулированного излучения на 180° непосредственно в источнике излучения, который состоял из двух излучателей на основе арсенида галлия, включенных параллельно и навстречу друг другу. Проведенная оценка точности фазовых измерений показала, что средняя квадратичная ошибка установки фиксированного сдвига фаз при частоте модуляции 600 МГц составляла всего 3 угловых минуты (0.04 мм), а при 1000 МГц – 4.3 угловых минуты (0.03 мм) [1].

Во втором способе [2] регистрация в точке с максимальной крутизной фазовой характеристики осуществлялась благодаря тому, что опорное высокочастотное напряжение подавалось на фотозлектрический приемник, работающий в режиме фазового детектирования, непрерывно, а напряжение высокочастотной модуляции источника излучения дополнительно модулировалось низкочастотным сигналом. Средняя квадратич-

ная погрешность отдельного измерения, при оценке точности индикации нулевых точек не превышала 3 угловых минут при частоте модуляции 600 МГц [3].

Относительная погрешность измерения расстояний одноволновыми лазерными дальномерами ограничена значениями порядка 10^{-6} из-за отсутствия информации о скорости распространения излучения в конкретных метеоусловиях. Для учета состояний среды был разработан импульсно-фазовый метод измерений [7] с применением зондирующего излучения одновременно на двух оптических длинах волн. В дальномере реализован режим автоматической подстройки частоты зондирующих импульсов таким образом, что при частоте следования импульсов f_{λ_1} на дистанции будет укладываться целое число периодов на длине волны λ_1 , а при частоте f_{λ_2} – целое число периодов на длине волны λ_2 . Значение t_{opt} определяется по величине частоты f_{λ_2} и числу N (целое число периодов зондирующих импульсов, укладывающихся за время распространения излучения на дистанции), а величина Δt – по разности периодов следования импульсов f_{λ_1} и f_{λ_2} .

$$t_{opt} = \frac{N}{f_{\lambda_2}}, \quad \Delta t = \frac{N}{f_{\lambda_2}} - \frac{N}{f_{\lambda_1}}, \quad L = \frac{cN}{2} \left[\frac{1}{f_{\lambda_2}} - \frac{n_o - 1}{\Delta n_o} \left(\frac{1}{f_{\lambda_2}} - \frac{1}{f_{\lambda_1}} \right) \right]. \quad (1)$$

Сравнение результатов измерения дальности одноволновым фазовым дальномером ($\lambda = 837$ нм) и двухволновыми дальномерами ($\lambda_1 = 837$ нм, $\lambda_2 = 787$ нм) представлено на рис. 1.

Показания дальномеров совпадают лишь при $t = 0^\circ\text{C}$. При других тем-

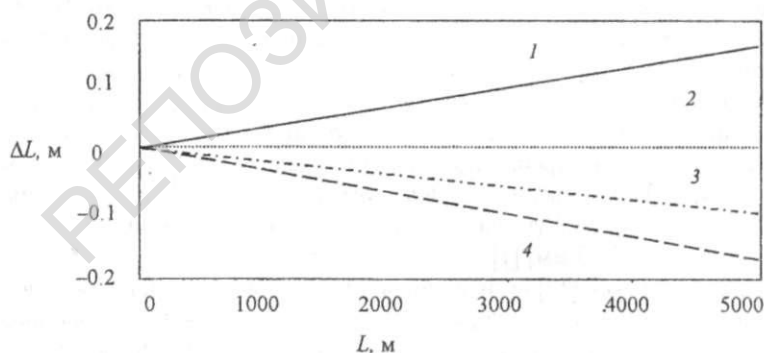


Рис. 1. Зависимость разности показаний одно-волнового и двухволнового дальномеров от измеряемого расстояния при различных температурах окружающей среды
1 – $t = -20^\circ\text{C}$, 2 – $t = 0^\circ\text{C}$, 3 – $t = +20^\circ\text{C}$, 4 – $t = +30^\circ\text{C}$

температурах одноволновый дальномер дает погрешность до 10 см, что связано с отсутствием информации о скорости распространения излучения на трассе. Значения дальности при одноволновых измерениях завышены при минусовых температурах и занижены при плюсовых температурах Цельсия по сравнению с двухволновым. Погрешность измерений одноволновым дальномером по сравнению с двухволновыми оценивается по формуле:

$$\Delta L = -L(n_c - 1)(1 + 15\alpha) \frac{p}{760} \alpha t. \quad (2)$$

Как видно, ошибка ΔL растет линейно с длиной измеряемой трассы L , слабо изменяется с атмосферным давлением p и практически не зависит от длины волны лазерного излучения λ . При $p = 760$ мм рт. ст. на длинах волн вблизи $\lambda = 1$ мкм приближенно находим $\Delta L = -L\delta t$, где $\delta = 1.06 \cdot 10^{-6}$. По сравнению с другими известными разработанная система имеет преимущества в том, что оба зондирующих сигнала на разных длинах волн одновременно генерируются одним лазером и обрабатываются в одном информационно-измерительном тракте.

При высоких частотах модуляции и сильных токах накачки лазера одним из факторов, ограничивающих точность измерения дальномеров, является наличие наводки из передающего в приёмный канал. Разработан метод, позволяющий скомпенсировать влияние наводок из передающего в приёмный канал на результат измерения дальности, основанный на использовании в приёмном канале оптического аттенюатора [5]. При этом осуществляется компенсация наводки при изменении ее амплитуды и фазы в процессе измерений, а также компенсация минимальных наводок, значительно меньших, чем порог регистрации полезного сигнала. Это обеспечивает возможность построения фазовых дальномеров на базе полупроводниковых лазеров, обеспечивающих миллиметровую точность измерения расстояний.

Были разработаны принципы повышения точности измерений рециркуляционных дальномеров, основанные на использовании оригинальных методов формирования зондирующего сигнала, выборе его параметров, оптимизации способа приема и обработки отраженного излучения.

Еще в 70-е годы прошлого века на кафедре были проведены работы по созданию генераторов коротких импульсов тока накачки для полупроводниковых лазеров с большой частотой повторения, которые позволили впервые реализовать оптоэлектронный рециркуляционный генератор с оптической линией задержки [8]. В таких системах с замкнутой обратной связью возникает генерация последовательности оптических импульсов,

период которой определяется временем задержки излучения на измеряемой дистанции при постоянной задержке электрической части схемы [9]. Таким образом, измеряя частоту следования импульсов можно определить длину оптического пути. Однако этот класс дальномеров обладает рядом недостатков, ограничивающих точность измерений, обусловленных погрешностями системы временной привязки импульсов при изменении мощности отраженных сигналов, жесткими требованиями, предъявляемыми к стабилизации электрической задержки, а также невысоким отношением сигнала к шуму, вызванным необходимостью иметь широкополосный фотоприемный тракт.

Для стабилизации электрической задержки рециркуляционного дальмера использовалась синхронизация частоты дистанционных импульсов опорным кварцевым генератором [10]. При этом зависимость периода рециркуляции от измеряемого расстояния имеет ступенчатый характер. В пределах неизменной частоты рециркуляции для точного измерения длины оптического пути разработана оригинальная схема нониусного преобразователя время-время, обеспечивающего временное разрешение 7 пс. В дальномере с использованием двухпорогового способа регистрации дистанционных импульсов и стабилизацией частоты рециркуляции [11] обеспечивалась компенсация погрешностей измерений, обусловленных изменением амплитуды отраженных импульсов, при этом обеспечивалась погрешность измерений временного положения импульсов десятки пикосекунд в широком динамическом диапазоне.

Для повышения точности измерений в качестве рециркулирующего сигнала в дальномере использовался широкополосный линейно-частотно-модулированный (ЛЧМ) радиоимпульс длительностью несколько десятков микросекунд [12]. Для таких сигналов можно использовать известные методы оптимальной обработки, например, с помощью согласованных фильтров, существенно улучшающих отношение сигнал/шум и обладающих высокой стабильностью электрической задержки. При их применении легко осуществляется автоматическая регулировка коэффициента передачи фотоприемного тракта, что устраняет необходимость использования пороговых устройств в петле обратной связи и, следовательно, необходимость системы привязки. Формирование и оптимальная обработка ЛЧМ импульса осуществляется согласованными фильтрами. Дистанционный импульс, прошедший систему оптимальной обработки, имеет следующий вид

$$G(t) = \sqrt{\frac{2\beta}{\pi}} \frac{\sin \left\{ [T - n(\tau_{opt} - \tau_{el})] \beta T / 2 \right\}}{\beta [t - n(\tau_{opt} - \tau_{el})]} \cos \left\{ \omega_0 [t - n(\tau_{opt} + \tau_{el})] \right\}, \quad (3)$$

где n – число периодов рециркуляции, U_0 – амплитуда, T – длительность, ΔF – девиация частоты, ω_0 – начальная частота ЛЧМ импульса, $\beta = 2\pi\Delta F/T$

Как видно из выражения (3), временное положение отклика на выходе согласованного фильтра определяется временем оптической задержки t_{opt} излучения на дистанции при постоянной электрической задержке t_{el} в электронных блоках устройства и согласованных фильтрах. С каждым периодом рециркуляции n происходит накопление времени оптической задержки t_{opt} , поэтому предложенный способ позволяет измерять усредненное значение t_{opt} за $n=10^4+10^5$ периодов рециркуляции, что существенно повышает точность измерений. Исследования дальномера показали, что стабильность частоты рециркуляции составила величину 10^{-5} , погрешность измерений $\Delta L \sim 1$ см. При возрастании времени измерений до нескольких секунд, имеется возможность повышения точности до 1 мм.

Задача улучшения точностных характеристик рециркуляционных дальномеров решалась также путем использования зондирующего излучения, представляющего собой импульсы на двух различных оптических длинах волн. В этом случае повышение точности измерений было достигнуто за счет реализации режима рециркуляции одновременно на двух оптических несущих, что позволило одновременно с вычислением дальности получить информацию о скорости распространения излучения вдоль линии наблюдения и учесть ее значение при вычислении дальности по величине оптической задержки на дистанции [13]. В качестве излучателя использовался лазерный диод на основе асимметричной квантоворазмерной гетероструктуры. Переключение длины волны генерации от $\lambda_1 = 837$ нм на $\lambda_2 = 787$ нм происходит при изменении тока инжекции от 34 до 36 мА. Длительность излучаемых импульсов на разных длинах волн составляет порядка 2 нс. Разность длин волн генерации $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$ для асимметричных квантоворазмерных лазерных диодов достигает 20–70 нм. При использовании термостабилизации и стабилизации тока инжекции относительная нестабильность $\Delta\lambda/\lambda$ имеет величину порядка 10^{-3} . При разности длин волн $\Delta\lambda = 20$ нм величина разности оптических задержек за один период рециркуляции составляет Δt на расстоянии $L = 1$ км составляет порядка единиц пикосекунд. Очевидно, что измерение таких коротких временных интервалов вызывает большие сложности. Однако в режиме рециркуляции происходит накопление разности временных задержек. За число периодов рециркуляции $N = 10^4 - 10^5$ разность задержек становится равной $T = N\Delta t$ и достигает десятков или сотен наносекунд. В разработанной системе для измерения Δt определяется

число периодов рециркуляции N , за которое разность задержек станет равной $T=100$ нс. В этом случае дальность вычисляется по формуле [14]

$$L = \frac{c}{2n_1} t_{\text{opt}} = \frac{c}{2} \left(t_{\text{opt}} - \frac{n_{10} - 1}{\Delta n_{10}} \frac{T}{N} \right), \quad (4)$$

где, t_{opt} – время задержки на дистанции излучения на длине волны λ_1 , n_{10} – показатель преломления воздуха на длине волны λ_1 при стандартных условиях, $\Delta n_{10} = n_{20} - n_{10}$ – разность показателей преломления на длинах волн λ_2 и λ_1 при стандартных условиях.

На рис. 2 представлена зависимость числа периодов рециркуляции N , при котором фазовый набег за счет разности оптических задержек на дистанции для длин волн $\lambda_1=837$ нм и $\lambda_2=787$ нм составит величину $T=100$ нс, от температуры окружающей среды для $\Delta\lambda=50$ нм.

Разработан способ измерения профиля земной поверхности [15], в котором осуществляется не непрерывное измерение высоты полета, а измерение радиальной составляющей скорости полета. При этом достигается независимость точности определения профиля поверхности от высоты полета и точности поддержания горизонтальной линии перемещения летательного средства. Отраженный от поверхности земли оптический сигнал имеет доплеровский сдвиг частоты F_d , обусловленный радиальной составляющей скорости $v_r = cF_d/2f_0$, где c – скорость света, f_0 – частота лазерного излучения. Значение горизонтальной скорости движения летательного аппарата v_h определяется любым из известных в авиации способов. Угол φ наклона касательной в точке падения излучения определяется следующим образом $\text{tg}\varphi = v_r/v_h = h/s = h/v_h \Delta t$, откуда

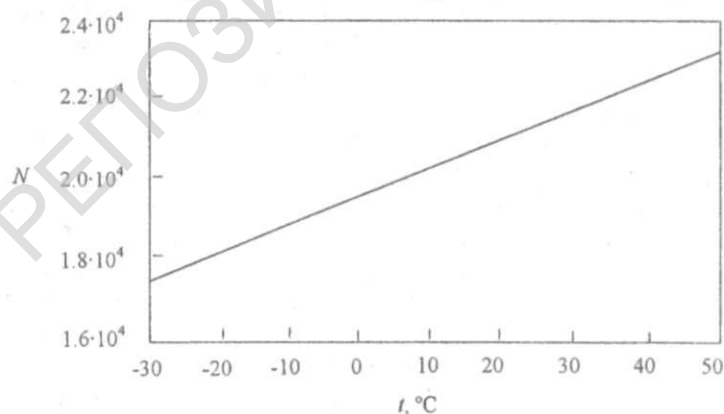


Рис. 2. Зависимость числа N от температуры для $\Delta\lambda = 50$ нм, $L = 3$ км

$h = v_r \Delta t$, где h – превышение последующей точки измерения над предыдущей, $s = v_s \Delta t$ – расстояние по горизонтали между точками измерения, Δt – время между измерениями.

По значению радиальной скорости v_r вычисляется превышение h каждой последующей точки измерения над предыдущей, и затем, по величине v_s , вычисляется расстояние между точками измерений $S = v_s \Delta t$ и воспроизводится профиль земной поверхности вдоль линии передвижения. При этом в расчетные соотношения не входит высота полета летательного аппарата, т.е. погрешность измерений не зависит от стабильности поддержания высоты полета, а определяется лишь разрешением по частоте блока измерения доплеровского сигнала.

При использовании CO_2 лазера с длиной волны 10.06 мкм, фотогетеродинного приема и спектроанализатора доплеровского сигнала [16] с разрешением по частоте единицы килогерц и временем анализа 10 мс, при горизонтальной скорости движения $v = 100$ м/с система измеряет наклон касательной к поверхности и превышение каждой последующей точки измерения над предыдущей через 1 м по линии движения с погрешностью $10^{-3} \dots 10^{-4}$, что обеспечивает более высокую точность измерений, чем все известные профилометры.

2. Функциональные элементы прецизионных лазерных дальномеров

Для решения задач светодальнометрии и ряда других практических применений на кафедре проводилась работа по разработке и созданию генераторов коротких импульсов тока для возбуждения инжекционных лазеров.

На основе разработанного формирователя импульсов из перепадов напряжения, выполненного на двух диодах с накоплением заряда в транзисторе [17] был создан полупроводниковый квантовый генератор ПКГ-1 [18]. Прибор выполнен в виде двух небольших блоков: генератора импульсов тока и источника питания, и имеет расширенные функциональные возможности. Длительность импульсов тока регулируется в пределах 15–150 нс, а амплитуда тока накачки до 35 А. В качестве источника излучения используется излучатель ЛД-13 или ЛД-18.

Созданный ПКГ-1 в 1974 г. экспонировался на ВДНХ СССР и автор разработки доцент кафедры Кобак И. А. был награжден «Серебряной медалью». Впоследствии разработанный полупроводниковый квантовый генератор демонстрировался на выставке «Достижения советской науки и

техники» в г. Софии, а в 1976 г. экспонировался на аналогичной выставке в г. Милане.

Другие генераторы импульсов для возбуждения инжекционных ДСГ-лазеров были созданы на основе разработанного формирователя и СВЧ-полевых транзисторов типа АП-602, что позволило реализовать генераторы импульсов тока наносекундной длительности с регулируемыми параметрами [19, 20]. Генераторы позволяют регулировать длительность выходных импульсов и их задержку в пределах от 1 до 20 нс и от 0.5–100 нс, соответственно. Амплитуда импульса тока, протекающего через лазерный диод типа 32ДЛ106, регулируется плавно в пределах 0–250 мА.

Для использования в импульсных дальномерах разработан способ регистрации последовательности коротких оптических с помощью ЛФД в режиме динамического смещения [21]. Способ заключается в модуляции фототока ЛФД в области лавинного умножения с помощью электрических стробимпульсов, сдвигаемых во времени относительно оптического сигнала, с последующим анализом в нагрузке последовательности стробвырезов оптического сигнала и восстановлении по их огибающей формы входных импульсов. Это позволяет существенно повысить коэффициент внутреннего усиления и расширить диапазон входных сигналов, а также подавить сигналы от фоновой засветки, низкочастотных оптических помех и шумов ЛФД и отличается от известных тем, что стробимпульсы формируются в ЛФД из гармонического сигнала с амплитудой, достаточной для вывода ЛФД в режим лавинного пробоя. Созданное на базе предложенного способа фотоприемное устройство регистрирует короткие оптические импульсы, длительностью $t > 100$ пс, с частотой следования 100 МГц – 2 ГГц. При этом крутизна преобразования равна 10^7 В/Вт, а пороговая чувствительность 10^{-8} Вт в полосе 10 ГГц.

С точки зрения точности измерений большой интерес представлял вопрос распределения фазы электрического поля, создаваемого внешним модулирующим устройством, по фотокатоду фотоумножителя, работающего в режиме фазового детектирования. В качестве внешнего модулирующего устройства использовался неоднородный ступенчатый резонатор. Во внешней и внутренней линиях резонатора проделывались продольные отверстия таким образом, чтобы с перемещением системы резонатор – ФЭУ световой пучок попадал в различные точки фотокатода. Зондирование различных точек на поверхности фотокатода проводилось сфокусированным световым пучком с площадью сечения 0.25 мм^2 . Проведенные исследования показали [4], что для работы в режиме фазового детектирования в прикатодной области необходимо выбирать ФЭУ с од-

народной структурой фотокатода и использовать ограниченную область фотокатода и отверстия в резонаторе.

Для импульсных и рециркуляционных дальномеров разработаны методы построения прецизионных измерителей временных интервалов типа нониусного преобразователя время-время [10], позволяющего непосредственно растянуть малый временной интервал. Использование системы автоматической подстройки частоты измерительного и опорного генераторов обеспечило временное разрешение системы 7 пс. Для расширения динамического диапазона входных сигналов разработан двухпороговый способ регистрации дистанционных импульсов дальномера, сущность которого заключается в введении корректировки в окончательный результат измерения времени появления импульса по результатам измерений при различных порогах регистрации [11], обеспечивающий погрешность измерений временного положения импульсов десятки пикосекунд в динамическом диапазоне 10–12 дБ. Для регистрации импульсных оптических сигналов, изменяющихся в широком динамическом диапазоне, разработаны методы построения импульсной автоматической регулировки усиления (АРУ) для использования в прецизионных дальномерах [22, 23], основанные на удержании амплитуды дистанционного импульса в пределах двух заданных пороговых значений. Система АРУ в комплексе со схемой прецизионной фиксации временного положения обеспечивала погрешность измерений десятки пикосекунд в динамическом диапазоне 40...50 дБ.

Для технической реализации предложенных способов повышения точностных характеристик импульсных дальномеров были разработаны следующие функциональные элементы: прецизионные формирователи временных интервалов [24, 25], импульсный дискриминатор [26], импульсно-фазовые детекторы с расширенными функциональными возможностями [27, 28], фазовращатель [29].

Как указано выше, для повышения точностных характеристик рециркуляционных дальномеров в качестве рециркулирующего сигнала целесообразно использование широкополосного частотно-модулированного радиоимпульса длительностью несколько десятков микросекунд. Это обеспечивает предельную чувствительность приемного тракта, стабильность частоты рециркуляции, широкий динамический диапазон входных сигналов. Для технической реализации такого дальномера разработан генератор ЛЧМ сигнала с автоподстройкой параметров по методу цифрового преобразования [30, 31], обеспечивающий стабильные параметры ЛЧМ сигнала в заданном диапазоне.

Литература

1. Попов Ю. В., Кобак И. А., Шилов А. Ф. Точные фазовые измерения светолокационным способом с помощью спаренного полупроводникового источника излучения при модуляции в диапазоне СВЧ // Вестник БГУ им. В. И. Ленина. 1969. Сер. 1. № 2. С. 71–74.
2. А.с. № 290398 СССР. Способ фазового детектирования. В. Б. Волконский, И. А. Кобак, Ю. В. Попов, А. Ф. Шилов. 1971. Бюл. № 2.
3. Измерение расстояний методом светолокации с полупроводниковым светодиодом / И. А. Кобак, И. С. Манак, Ю. В. Попов, А. Ф. Шилов // Изв. Вузов. География и аэрофотосъемка. 1974. № 2. С. 23–28.
4. О распределении фазы моделирующего напряжения по фотокатоду ФЭУ, работающего в режиме гетеродинамирования / Ю. В. Попов, А. Ф. Шилов, И. А. Кобак, И. С. Манак // Вестник БГУ им. В. И. Ленина. Сер. 1. 1970. № 1. С. 93–94.
5. Kozlov V., Kuzmin K., Chubarov S. Increase of accuracy of laser phase rangefinders // Metrologia u progno trzeciego milenium: Materiały krajowy kongres metrologii. Warszawa 24–27 czerwca 2001. T. III. P. 845–846.
6. А.с. № 1698973 СССР. Импульсно-фазовый детектор. В. Л. Козлов, В. А. Фираго. 1991. Бюл. № 46.
7. Kozlov V., Kononenko V., Manak I. Precision laser rangefinder // Metrologia u progno trzeciego milenium: Materiały krajowy kongres metrologii, Warszawa 24–27 czerwca 2001. T. I. P. 511–515.
8. Вишневецкий В. Н., Кобак И. А., Шилов А. Ф. Рециркуляционный генератор с оптической линией задержки // Приборы и техника эксперимента. 1973. № 6. С. 93–95.
9. А.с. № 1274586 СССР. Оптоэлектронный рециркуляционный генератор. К. Н. Коростик, В. Л. Козлов, Е. Д. Карих. 1986.
10. А.с. № 1144474 СССР. Светодальномер. В. Л. Козлов, А. Ф. Шилов. 1984.
11. А.с. № 1588078 СССР. Рециркуляционный светодальномер. В. Л. Козлов, А. Ф. Шилов. 1988.
12. Козлов В. Л., Шилов А. Ф. Оптоэлектронный рециркуляционный дальномер с ЛЧ-модуляцией оптического излучения. // Сб. Лазерная и оптико-электронная техника. Вып. 2. Мн.: Университетское, 1992. С. 193–197.
13. А.с. № 1810753 СССР. Рециркуляционный дальномер. С. Д. Жарников, В. Л. Козлов, И. А. Малевич. 1993. Бюл. № 5.
14. Kozlov V. L., Kononenko V. K., Manak I. S. Recirculation rangefinder with two-frequency quantum-well semiconductor laser // Czujniki optoelektroniczne i elektroniczne COE 2000: VI Konferencja Naukowa, Gliwice, Poland, 13–16 czerwca 2000. Gliwice, 2000. P. 377–382.
15. Патент РФ № 4076. Способ измерения профиля земной поверхности. В. Л. Козлов. 2001.
16. Козлов В. Л., Фираго В. А., Шилов А. Ф. Быстрый последовательный спектроанализатор доплеровских сигналов // Сб. Лазерная и оптико-электронная техника. Мн.: Университетское, 1989. С. 202–207.
17. А.с. № 1670773 СССР. Формирователь импульсов. И. А. Кобак, И. Д. Бондаренко. 1991. Бюл. № 30.

18. Шилов А. Ф., Кобак И. А., Латушко Е. А. Полупроводниковый квантовый генератор ПКГ-1. // Информационный листок № 369. Ротапринт Бел НИИНТИ, Минск, 1974.
19. Кобак И. А., Манак И. С., Пикулик В. Г. Оптические модули субнаносекундного диапазона на основе инжекционных гетеролазеров. // Тезисы докладов 13 Всесоюзного семинара «Импульсная фотометрия». Тип. ГОИ, Ленинград, 1990. С. 65–66.
20. Кобак И. А., Манак И. С., Пикулик В. Г. Генераторы ультакоротких оптических сигналов на инжекционных гетеролазерах. // Лазерная и оптико-электронная техника. Межвуз. сб. науч. тр. Мн.: Белгосуниверситет, 1992. С. 67–72.
21. А.с. № 1822297 СССР. Способ регистрации оптического сигнала с помощью ЛФД. А. Ф. Шилов, В. М. Стецик, В. Л. Козлов, А. В. Беляков. 1992.
22. Патент РФ № 2012994. Устройство автоматической регулировки уровня сигнала. В. Л. Козлов. 1994. Бюл. № 9.
23. А.с. № 1425811 СССР. Устройство автоматической регулировки уровня сигнала. В. Л. Козлов, И. Д. Бондаренко. 1988. Бюл. № 35.
24. А.с. № 1277366 СССР. Формирователь временных интервалов. В. Л. Козлов. 1986. Бюл. № 46.
25. А.с. № 1622926 СССР. Формирователь временных интервалов. В. Л. Козлов, И. В. Стальмаков. 1991. Бюл. № 3.
26. А.с. № 1226606 СССР. Импульсный фазовый дискриминатор. В. Л. Козлов, В. А. Фираго, А. Ф. Шилов. 1986. Бюл. № 15.
27. А.с. № 1492462 СССР Импульсно-фазовый детектор. В. Л. Козлов, В. А. Фираго, А. Ф. Шилов. 1989. Бюл. № 25.
28. А.с. № 1698973 СССР Импульсно-фазовый детектор. В. Л. Козлов, В. А. Фираго. 1991. Бюл. № 46.
29. А.с. № 1688390 СССР Фазовращатель. В. А. Фираго, В. Л. Козлов. 1991, Бюл. № 40.
30. А.с. № 1631698 СССР. Генератор с линейной частотной модуляцией. В. Л. Козлов, В. А. Фираго, А. Ф. Шилов. 1991. Бюл. № 8.
31. Генератор линейно-частотно-модулированных сигналов с автоподстройкой параметров / В. А. Фираго, В. Л. Козлов, К. Н. Коростик, Е. Д. Карих // ПТЭ. 1990. № 3. С. 91–94.