

Исследование факторов, влияющих на погрешность измерения расстояния фазовым лазерным дальномером

© Б.О. Берников, В.Б. Бокшанский, М.В. Вязовых, А.Н. Перов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрены основные причины снижения точности измерения расстояния лазерным фазовым дальномером. Определены границы допустимых флуктуаций важнейших параметров — фазы и частоты, при которых погрешность измерения не превышает 1 мм.

Ключевые слова: лазер, фазовый дальномер, цифровой фазометр, цифровой фильтр, гетеродин, смеситель, джиттер.

В настоящее время высокоточное определение расстояния осуществляется методом фазовой лазерной дальнометрии. В фазовых лазерных дальномерах расстояние находится путем сравнения фазы сигнала, снимаемого с выхода приемника излучения (фаза излучения, прошедшего расстояние до объекта и обратно), с фазой опорного сигнала (фаза излучения на источнике излучения).

Известно, что расстояние, проходимое светом за время t ,

$$l = ct,$$

где c — скорость света.

За то же время фаза модулированного излучения изменится на

$$\varphi = 2\pi ft,$$

где f — частота модуляции излучения.

Таким образом, дальность до объекта (данное расстояние излучение проходит дважды)

$$l = c \frac{\varphi}{4\pi f}. \quad (1)$$

Подробное описание фазового лазерного дальномера приведено в работе [1]. Одним из важнейших параметров дальномера является погрешность измерения расстояния Δl . В настоящей статье описаны основные причины возникновения погрешности Δl , оценена степень их влияния на результаты измерений и рассмотрены методы снижения этой погрешности.

В формуле определения дальности присутствуют две переменные величины: разность фаз φ измеряемого и опорного сигналов и частота

та f модуляции, на которой проводится измерение. Зависимость погрешности измерения дальности от погрешности определения разности фаз сигналов прямо пропорциональна:

$$\Delta l = c \frac{\Delta \varphi}{4\pi f}.$$

При измерении фазы возникает погрешность $\Delta \varphi$, определяемая типом фазометра. Для аналоговых фазометров она равна $0,5 \dots 1,0^\circ$, для цифровых фазометров погрешность, как правило, составляет $0,01 \dots 0,10^\circ$ в зависимости от отношения сигнал/шум. Существует два варианта реализации цифрового фазометра: классический синхронный фазовый детектор и квадратурный фазовый детектор. При применении таких фазометров амплитуды сигналов (опорного и регистрируемого) не влияют на значение разности фаз. Однако квадратурный синхронный фазовый детектор позволяет реализовать более высокую точность (чувствительность), особенно при работе с зашумленным сигналом. В НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана реализован цифровой фазовый детектор с погрешностью измерения фазы не более $0,1^\circ$ при отношении сигнал/шум не менее 30, что позволило существенно снизить частоту модуляции сигнала без потери точности измерения расстояния.

На рис. 1 представлены зависимости погрешности измерения расстояния, вносимой фазовым детектором, от частоты модуляции

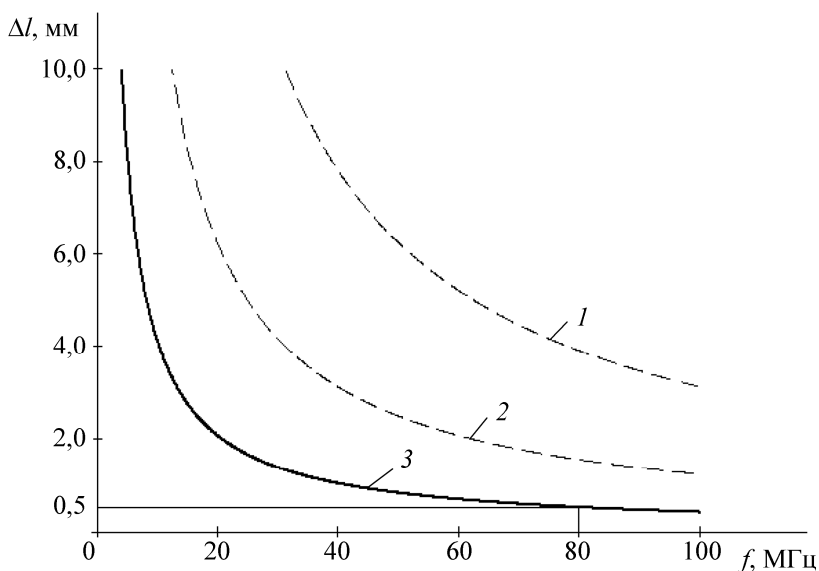


Рис. 1. Зависимость погрешности измерения дальности, вносимой фазовым детектором, от частоты модуляции сигнала:

1 — аналоговый фазометр; 2 — цифровой фазометр на основе синхронного детектора; 3 — цифровой фазометр на основе синхронного квадратурного детектора

сигнала для классической схемы построения фазовых лазерных дальномеров (построенной на аналоговых фазометрах), схемы с использованием синхронного фазового детектора и схемы, построенной на синхронном квадратурном фазовом детекторе. Анализ графиков позволяет заключить, что использование синхронного квадратурного фазового детектора более предпочтительно.

В результате проведенных экспериментов на изготовленном двухчастотном дальномере при частоте модуляции сигнала 80 МГц погрешность определения расстояния, вносимая фазовым детектором, составила 0,5 мм.

Частота модуляции сигнала формируется задающим генератором. В свою очередь, генератор имеет температурную нестабильность, вызывающую сдвиг частоты модуляции относительно номинального значения, а также высокочастотный джиттер фронтов формируемых импульсов.

Рассмотрим сдвиг частоты на Δf от номинального значения. Для этого продифференцируем дальность l в формуле (1) по частоте f :

$$\left| \frac{\partial l}{\partial f} \right| = \frac{c\varphi}{4\pi f^2}.$$

Тогда погрешность Δl_f в зависимости от флуктуаций частоты примет следующий вид:

$$\Delta l_f = \frac{c\varphi}{4\pi f^2} \Delta f.$$

Видно, что погрешность будет максимальной при наибольшем значении $\Delta\varphi$, причем $\Delta\varphi_{\max} = \pi$.

Таким образом, предельное значение погрешности Δl_f можно найти по модифицированной формуле

$$\Delta l_f = \frac{c}{4f^2} \Delta f. \quad (2)$$

Для определения Δf воспользуемся паспортным значением среднеквадратического отклонения (СКО) частоты генерации при изменении окружающей температуры, характеризующим нестабильность генератора. Обычно СКО выражается величиной *ppm* (*part per million*).

Погрешность частоты определяется по формуле

$$\Delta f = \frac{ppm f}{10^6}.$$

Таким образом, получаем формулу для расчета погрешности измерения дальности, вызываемой погрешностью частоты модуляции, в зависимости от частоты модуляции и параметра *ppm*:

$$\Delta l_f = \frac{c \text{ ppm}}{4 \cdot 10^6 f^2}. \quad (3)$$

Так, при использовании типового генератора с $\text{ppm} = 50$ (наиболее часто встречающееся значение) и частотой модуляции сигнала $f = 80$ МГц погрешность измерения дальности, вызываемая нестабильностью генератора, $\Delta l_f = 0,05$ мм. Очевидно, что данная погрешность менее значима, чем погрешность фазового детектора.

Наряду с нестабильностью частоты и погрешностью фазового детектора могут возникать ошибки, вызванные джиттером любого из синхронных компонентов дальномера, например выборки при оцифровке сигнала. При отклонении момента снятия i -го отсчета на Δt от номинального t_i АЦП передает в микропроцессор значение, отличающееся на ΔU от $U(t_i)$ (рис. 2).

На рис. 3 представлены зависимости погрешности измерения разности фаз сигналов от джиттера выборки для обработки одного и 100 периодов сигнала. Анализ этих зависимостей позволяет заключить, что эффект влияния джиттера частоты дискретизации может быть уменьшен за счет усреднения выборки при ее достаточной

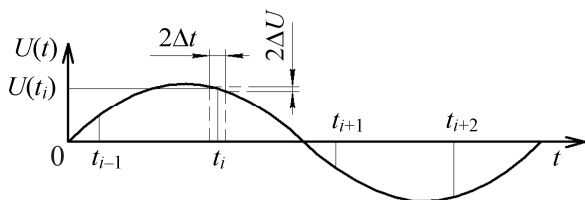


Рис. 2. К вопросу о влиянии джиттера частоты выборки при оцифровке сигнала

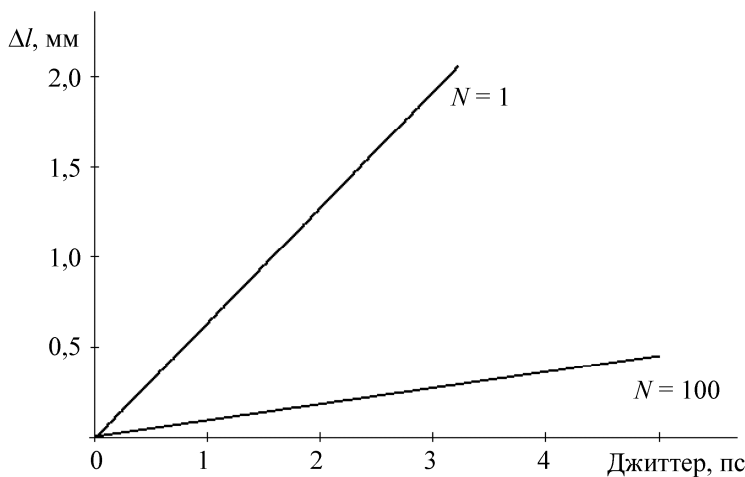


Рис. 3. Зависимость погрешности измерения разности фаз сигналов от джиттера выборки для обработки одного и 100 периодов (N) сигнала

длине. Эксперименты показывают, что оптимальная длина выборки при джиттере несколько пикосекунд составляет 100...200 периодов регистрируемого сигнала на используемой частоте.

В определенных случаях на точность измерений также влияют паразитные гармоники, содержащиеся в сигнале. На рис. 4 представлены ошибки определения расстояния для различных паразитных гармоник, где A_n — отношение амплитуды сигнала к амплитуде паразитной гармоники, Δf_n — разница частот паразитной гармоники и сигнала, $\Delta \varphi_n$ — разница начальных фаз помехи и сигнала. Анализ позволяет сделать вывод, что значение ошибки зависит от разностной частоты и фазового сдвига и носит периодический характер, что связано с линейчатым характером спектра искаженного сигнала. В связи с этим необходимо учитывать характер спектра регистрируемого сигнала и при необходимости корректировать его. В частности, возможно применение узкополосных фильтров в приемном канале с обязательной последующей фазовой коррекцией для исключения температурных фазовых флуктуаций в электронном тракте либо (что предпочтительнее) цифровых фильтров до процедуры вычисления фазы (данный метод рассмотрен в работе [2]).

Практически в любом фазовом дальномере применяется элемент, осуществляющий понижение частоты. В качестве такого элемента могут быть использованы:

- прямое цифровое преобразование при дискретизации гармонического сигнала (эффект размножения спектров);
- преобразование за счет модуляции напряжения питания лавинного фотодиода (данный метод применим только для лавинного фотодиода);
- смеситель (перемножитель) принятого сигнала и сигнала гетеродина.

Первый способ применяется редко из-за требуемой широкой полосы частот приемного канала и необходимости использования быстродействующего АЦП. Второй способ позволяет достичь хороших результатов, но его недостатки схожи с третьим, наиболее популярным способом.

Основным недостатком при применении смесителя является зависимость вносимых им нелинейных фазовых сдвигов от амплитуд и их отношения на входе смесителя, что связано с его нелинейной характеристикой. На рис. 5 представлена зависимость фазового сдвига, вносимого смесителем AD835, от относительных амплитуд U_1 и U_2 входных гармонических сигналов на частоте 2,5 МГц. Видно, что при отношении амплитуд сигналов 1/2 фазовый сдвиг находится в пределах 0,05...0,15°. При разностях отношений амплитуд сигналов не менее 100 отн. ед. фазовый сдвиг достигает 0,5° и более. Экспери-

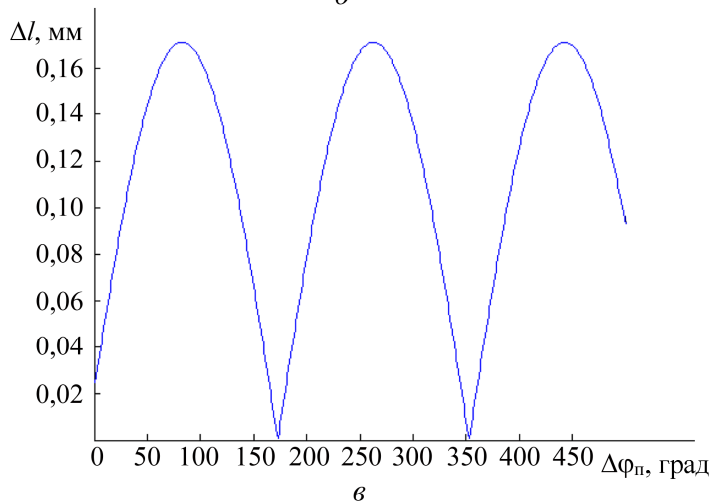
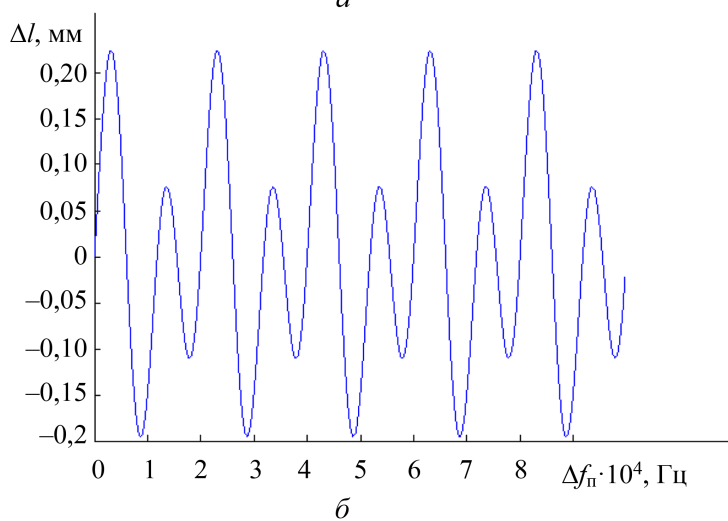
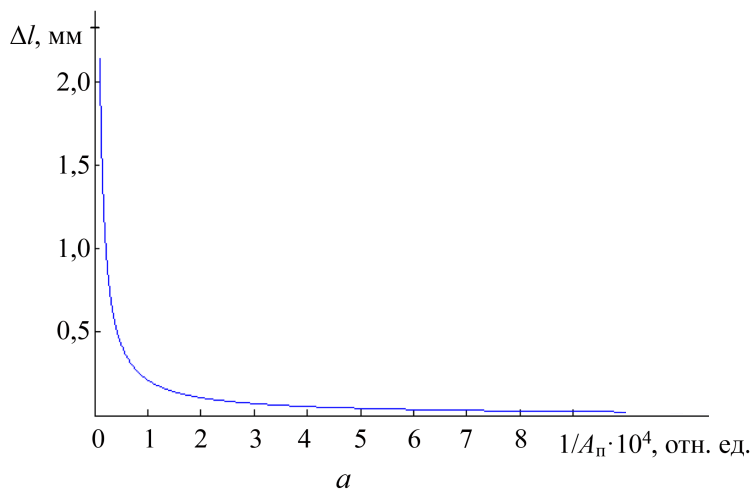


Рис. 4. Ошибки измерения дальности при внесении в сигнал помехи:
 а — $\Delta f_n = 20$ кГц, $\Delta \varphi_n = 30^\circ$; б — $A_n = 10^{-5}$, $\Delta \varphi_n = 0$; в — $A_n = 10^{-5}$, $\Delta f_n = 0$

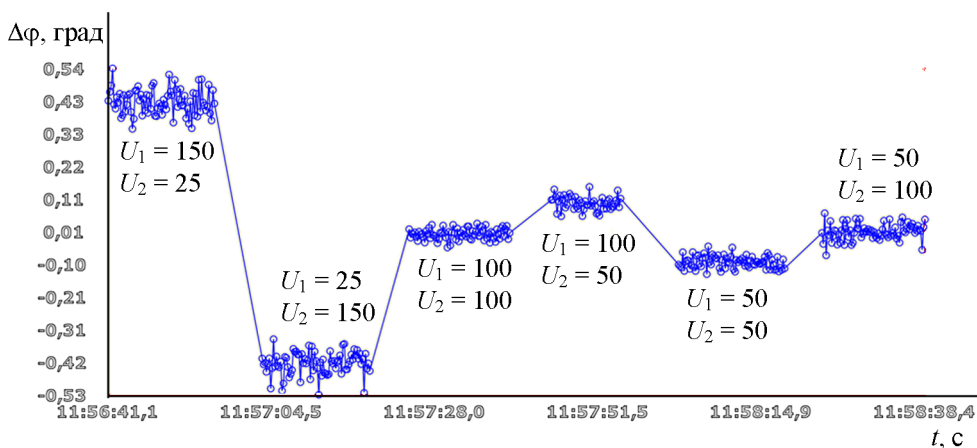


Рис. 5. Зависимость фазового сдвига, вносимого смесителем AD835, от относительных амплитуд U_1 и U_2 входных гармонических сигналов на частоте 2,5 МГц

ментальные исследования показывают, что на высоких частотах (80...100 МГц) фазовый сдвиг возрастает и достигает 10...15°, что недопустимо много. Основной метод решения данной проблемы — предварительное выравнивание сигналов на входе смесителя за счет использования схемы (АРУ).

Таким образом, можно заключить, что достижение высокой точности цифрового фазометра (0,1°) позволяет использовать сравнительно низкую частоту модуляции (80 МГц) для достижения погрешности измерения 0,3...0,5 мм, что упрощает конструкцию прибора и подбор элементов схемы.

Для снижения влияния джиттера выборки целесообразно обрабатывать не менее 100 периодов сигнала при вычислении разности фаз. Однако следует учитывать, что увеличение числа обрабатываемых периодов ведет к увеличению времени обработки.

Гармонические паразитные сигналы существенно повышают погрешность измерений. Для снижения влияния этих помех следует применять узкополосный фильтр, настроенный на частоту полезного сигнала.

Для устранения нелинейных фазовых сдвигов, вызванных использованием смесителей, при понижении частоты сигнала необходимо предварительно выравнивать амплитуды сигналов либо применять (где возможно) прямое цифровое преобразование частоты.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бокшанский В.Б., Вязовых М.В., Е Тэ Вун. Метод высокоточного измерения дальности путем использования цифровой обработки эхо-сигнала.

Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение, 2011, № 1, с. 177–188.

- [2] Берников Б.О., Бокшанский В.Б., Вязовых М.В., Федоров С.В. Методы повышения точности измерения дальности в лазерных фазовых дальнометрах. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2012, № 8, с. 131–141.

Статья поступила в редакцию 03.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Берников Б.О., Бокшанский В.Б., Вязовых М.В., Перов А.Н. Исследование факторов, влияющих на погрешность измерения расстояния фазовым лазерным дальнометром. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 9.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/911.html>

Бокшанский Василий Болеславович родился в 1969 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1993 г. Канд. техн. наук, начальник сектора, доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 40 научных работ в области лазерной локации и оптико-электронных приборов и систем. e-mail: vassily@bmstu.ru

Вязовых Максим Вячеславович родился в 1976 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2000 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 20 научных работ в области лазерной локации и лазерных систем видения.

Берников Борис Олегович родился в 1988 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2011 г. Инженер ОАО «НПП «Геофизика-Космос», аспирант кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор четырех научных работ в области оптико-электронных приборов и систем.

Перов Артем Николаевич родился в 1989 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2012 г. Инженер НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор четырех научных работ в области оптико-электронных приборов и систем.