

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

2014

№4 апрель

**Ежемесячный
научно-технический
журнал
основан в 1939 г.**

Издается
с приложением
«Метрология»



УЧРЕДИТЕЛИ

Федеральное агентство
по техническому регулированию
и метрологии

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт метрологии
им. Д.И.Менделеева»

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт оптико-физических
измерений»

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт физико-технических
и радиотехнических измерений»

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт метрологической
службы»

ФГУП «Уральский
научно-исследовательский
институт метрологии»

ФГУП «Российский
научно-технический центр
информации по стандартизации,
метрологии и оценке соответствия»

Метрологическая академия

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ

- П. И. Неежмаков, А. В. Прокопов. Об оценке экономической целесообразности создания государственных первичных эталонов 3

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕТРОЛОГИИ

- С. Ф. Левин. Шкала космологических расстояний. Ч. II. «Неожиданные» совпадения 7

ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- А. И. Глазов, М. Л. Козаченко, А. Б. Светличный, С. В. Тихомиров. Погрешности высокоточных измерений средней мощности оптического излучения в волоконно-оптических системах передачи информации и пути их минимизации 12
- А. Ю. Поройков. Восстановление 3D-профиля деформированной металлической пластины методом корреляции фоновых изображений 15
- В. Е. Привалов, В. Г. Шеманин. Измерение мощности упругого рассеяния атмосферного аэрозоля реальным лидаром 19

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- В. И. Бочегов, В. М. Грабов, А. С. Парахин. Технические средства для прямого измерения теплопроводности твердых тел 22
- И. А. Козлов, В. А. Чугунов, А. А. Липаев. Устройство и программный комплекс для определения тепловых свойств горных пород в условиях, близких к пластовым 27

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- А. С. Семенов, Н. М. Кузнецов. Анализ результатов мониторинга показателей качества электрической энергии в подземном руднике 31

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- С. С. Шибаев, А. В. Помазанов, Д. П. Волик. Способ снижения систематической погрешности акустооптических измерителей радиочастоты 34
- А. В. Мильников, А. В. Пивак. Калибратор амплитудно- и частотно-модулированных сигналов на базе векторного генератора 37

ИЗМЕРЕНИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

- В. Д. Севастьянов, О. И. Коваленко, В. П. Ярына, А. В. Орлов, В. Н. Богомолов, П. А. Дворников, М. П. Зыбин, С. Н. Ковтун, Ю. А. Прохоров. Исследование характеристик полей нейтронов в каналах графитовой призмы и цилиндрических замедлителей вблизи актиченых зон реактора БАРС-6 40

МЕДИЦИНСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- А. А. Кузнецов. Структурно-частотный анализ ритмограмм больных людей 46

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- Т. З. Хабурзания, А. В. Мешков. Повышение точности количественного хроматографического анализа с использованием нейронных сетей 51
- А. В. Домостроев. Совершенствование эталонной базы в области измерений плотности сжиженных углеводородных газов и широкой фракции легких углеводородов 56
- А. В. Сафонов. Опыт применения ультразвуковых преобразователей расхода в составе систем измерений количества и показателей качества нефти 59
- М. Я. Марусина, Б. А. Базаров, П. А. Галаидин, А. А. Силаев, М. П. Марусин, Е. Ю. Закемская, А. Г. Гилев, А. В. Алексеев. Магнитная система на основе постоянных магнитов для расходомера многофазных текучих сред 62
- А. А. Цурко, А. А. Демьянин. Состояние метрологического обеспечения измерений вязкости нефтепродуктов 65
- Ю. Г. Захаренко, Н. А. Кононова, К. В. Чекирда. Возможности использования 30-метрового лазерного интерференционного компаратора для метрологического обеспечения нефтегазовой отрасли 67
- Л. А. Конопелько, А. А. Далянов. Метрологическое обеспечение идентификации озоноразрушающих веществ 70

Г л а в н ы й р е д а к т о р
В. Н. Крутиков

Редакционная коллегия:

В. И. Белоцерковский,
Ю. А. Богомолов,
С. И. Донченко,
И. В. Емельянова
(зам. гл. редактора),
В. С. Иванов, Л. К. Исаев,
Г. И. Кавалеров, А. Д. Козлов,
С. А. Кононогов, А. Ю. Кузин,
В. М. Лахов
(зам. гл. редактора),
С. В. Медведевских,
А. И. Механиков,
В. В. Окрепилов,
Б. С. Пункевич, П. А. Тодуа,
Н. И. Ханов, В. Н. Храменков,
И. А. Шайко

**Журнал переводится
на английский язык
под названием
«MEASUREMENT TECHNIQUES»
издательством Springer
www.springer.com/11018**

Технический редактор Г. А. Теребинкина
Корректор М. В. Бучная
Компьютерная верстка А. П. Финогеновой

Сдано в набор 05.03.2014. Подписано в печать 14.04.2014. Формат 60×90^{1/8}. Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. п. л. 9,0. Уч.-изд. л. 11,05. Тир. 388 экз. Зак. 427.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-21572 от 15.07.2005 г.
Адрес редакции: 117418 Москва, Нахимовский проспект, д. 31, к. 2, тел. (495) 531-26-21;
Почтовый адрес: 117418 Москва, Нахимовский проспект, д. 31, к. 2,
ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ»,
e-mail: izmt@gostinfo.ru; izmt@yandex.ru; www.gostinfo.ru

Калужская типография стандартов,
248021 Калуга, ул. Московская, 256

© Измерительная техника, 2014

ECONOMICAL QUESTIONS OF METROLOGY

- P. I. Neyezhmakov, A. V. Prokopov. On estimation economical feasibility of establishing national primary standards 3

FUNDAMENTAL PROBLEMS OF METROLOGY

- S. F. Levin. Cosmological distances scale. Pt. 2. «Unexpected coincidences» 7

OPTICOPHYSICAL MEASUREMENTS

- A. I. Glazov, M. L. Kozachenko, A. B. Svetlichny, C. V. Tihomirov. The uncertainty of high-accuracy measurements of fiber-optical average power and the ways of its improvement 12
A. Yu. Poroykov. The reconstruction of 3D profile view of deformed metal plate by image pattern correlation technique 15
V. E. Privalov, V. G. Shemanin. The real lidar measurement of atmospheric aerosol elastic scattering power 19

TERMOPHYSICAL MEASUREMENTS

- V. I. Bochegov, V. M. Grabov, A. S. Parakhin. The direct measurement technology of solids thermal conductivity 22
I. A. Kozlov, V. A. Chugunov, A. A. Lipaev. The device and software complex for determination of thermal properties of rocks in conditions close to bedding 27

ELECTROMAGNETIC MEASUREMENTS

- A. S. Semenov, N. M. Kuznetsov. The results of monitoring analysis of consumed electric power quality coefficients for underground diamond bearing rocks extraction mine 31

RADIO MEASUREMENTS

- S. S. Shibaev, A. V. Pomazanov, D. P. Volik. A method of acousto-optical radiofrequency measuring instruments systematic error reduction 34
A. V. Myl'nikov, A. V. Pivak. The calibrator of amplitude and frequency modulated signals based upon vector generator 37

IONIZING RADIATION MEASUREMENTS

- V. D. Sevastyanov, O. I. Kovalenko, V. P. Yaryna, A. V. Orlov, V. N. Bogomolov, P. A. Dvornikov, M. P. Zybin, S. N. Kovtun, Yu. A. Prohorov. The study of characteristics of neutron fields distribution in channels of graphite prism and cylindrical moderators installed near the BARS-6 reactor cores 40

MEDICAL AND BIOLOGICAL MEASUREMENTS

- A. A. Kuznetsov. The structure-frequency analysis of sick people rhythmograms 46

PHYSICOCHEMICAL MEASUREMENTS

- T. Z. Khaburzaniya, A. V. Meshkov. The increase of quantitative chromatographic analysis accuracy with use of neural networks 51
A. V. Domostroev. Improving a base of standards in the field of liquefied hydrocarbons density measurement 56
A. V. Safonov. Experience of ultrasonic flow transducers application in a system of oil quantity and quality measurement 59
M. Ya. Marusina, B. A. Bazarov, P. A. Galaidin, A. A. Silayev, M. P. Marusin, E. Yu. Zakemovskaya, A. G. Gilev, A. V. Alekseev. Magnetic system based on permanent magnets for flowmeter of multiphase fluid mediums 62
A. A. Tsurko, A. A. Demyanov. The state of metrological assurance of measurements viscosity oil products 65
Yu. G. Zakharenko, N. A. Kononova, K. V. Chekirda. The possibilities of 30-m laser interference comparator use for metrological assurance of oil and gas industry 67
L. A. Konopel'ko, A. A. Dayanov. Metrological assurance of ozone-depleting substances identification 70

Электромагнитные измерения

13. Семенов А. С. Анализ показателей качества электроэнергии потребителей подземного рудника // Метрология — измерения — Учет и оценка качества электрической энергии: Тр. 6-й Всерос. науч.-техн. конф.: СПб., 2013. С. 240—251.

14. Козярук А. Е и др. Искажение формы питающего напряжения в сетях электроснабжения при наличии полупроводниковых преобразователей // Горное оборудование и электромеханика. 2011. № 6. С. 30—35.

15. Карташев И. И. и др. Оценка работы фильтров в системе электроснабжения горнодобывающего предприятия по результатам контроля качества электроэнергии // Горное оборудование и электромеханика. 2012. № 7. С. 16—19.

16. Тульский В. Н. и др. Управление качеством электроэнергии в электрических сетях // Горный журнал. 2012. № 12. С. 52—55.

Дата принятия 02.09.2013 г.

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

621.376.2

Способ снижения систематической погрешности акустооптических измерителей радиочастоты

С. С. ШИБАЕВ, А. В. ПОМАЗАНОВ, Д. П. ВОЛИК

Южный федеральный университет, Таганрог, Россия, e-mail: sheab@list.ru

Предложен алгоритм калибровки акустооптических измерителей параметров радиосигналов, использующий аппроксимацию координатно-частотной кривой настройки реального измерителя ломаной линией, что снижает систематическую погрешность определения частоты.

Ключевые слова: акустооптический измеритель частоты, кривая настройки.

The calibration algorithm for reduction of systematic error of acousto-optical radiofrequency measuring instruments is suggested. It is based on the use of coordinate-frequency adjustment curve approximation with broken line.

Key words: acousto-optical radiofrequency measuring instrument, adjustment curve.

Для измерений неизвестного параметра сигнала (уровня, частоты, направления прихода и т. д.) во многих измерительных приборах используют шкалу, заданную в явной или неявной форме и проградуированную в значениях измеряемого параметра. Полученные значения параметра могут служить в качестве исходных данных для вычисления его уточненного значения. В этом случае проградуированную шкалу можно рассматривать как упорядоченную последовательность опорных значений параметра, которую с определенной точностью можно описать какой-либо зависимостью, например линейной, квадратичной и т. п. От того, насколько точно известны опорные, принадлежащие шкале значения параметра, напрямую зависит погрешность его вычисления. Эту погрешность относят к инструментальным погрешностям измерений.

Рассмотрим данный вид погрешности и способ ее уменьшения на примере акустооптического измерителя частоты (АОИЧ). Дело в том, что принцип действия АОИЧ основан на использовании соответствия между частотой подаваемого на его вход радиосигнала и пространственным положением на фотоприемнике проинфрагировавшего светового сигнала в дефлекторе измерителя светового сигнала [1—4]. Пространственное положение распределения интенсивности

(РИСС) измеряется и регистрируется фотодиодами фотоприемника.

Ценное для практического использования свойство АОИЧ состоит в том, что между некоторыми частотами входного сигнала и пространственными положениями центров x_k на оси X фотодиодов с номером k существует взаимно-однозначное соответствие: при подаче на вход АОИЧ сигнала частотой f_k в точке x_k (или, что одно и тоже, на выходе k -го фотодиода) регистрируется максимальный сигнал. При симметричной форме РИСС максимум светового сигнала расположен на его оси симметрии.

Частоты f_k , соответствующие k -м фотодиодам, можно рассматривать как упомянутые опорные значения измеряемого параметра или как опорные значения частот. Эти частоты называют частотами точной настройки фотодиодов, а их упорядоченную последовательность — кривой настройки (КН) АОИЧ.

В качестве фотоприемников в современных АОИЧ используют линейки приборов с зарядовой связью (ПЗС) [1—4], фотодиодные линейки и матрицы. Во всех этих устройствах фотодиоды расположены эквидистантно по пространственной координате (длине) фотоприемника. В связи с этим зависимость между k и x_k можно представить арифметической прогрессией

$$x_k = x_0 + kh_x, \quad 0 \leq k \leq n - 1, \quad (1)$$

где x_0 — пространственное положение середины фотодиода с нулевым номером; h_x — интервал между положениями центров соседних фотодиодов фотоприемника (шаг фотодиодов); n — количество фотодиодов.

Нелинейность КН проявляется в том, что интервалы между частотами настройки соседних фотодиодов различны на разных участках частотного диапазона приемника-частотомера. Эти различия не учитываются в формулах вычислений частот настройки фотодиодов, поскольку формулы линейны. В результате: частоты настройки фотодиодов определяются с погрешностями и, как следствие, частоту сигнала, в формулах вычислений которой используют частоты настройки фотодиодов, тоже определяют с погрешностью.

Нелинейность реальной КН в АОИЧ, как показывает анализ, объясняется следующими основными причинами.

1. Нелинейным характером зависимости угла дифракции θ_d от частоты f , которая для изотропного варианта применяемого в АОИЧ дефлектора отображается в виде $\theta_d = \arcsin(\lambda f/v)$, где λ — длина волны лазера; v — скорость ультразвука. Данный вид нелинейности проявляется тем больше, чем шире полоса частот измерителя.

2. Аберрациями входящего в состав АОИЧ фурье-объектива с фокусным расстоянием F , которое в параксиальном приближении выбирается из условия $F = LV/(\lambda \Delta f)$, где Δf — полоса рабочих частот АОИЧ; L — протяженность линейки фотодиодов. При этом погрешность фурье-преобразования [5], равная $(L/F) \operatorname{tg} \theta_d$, увеличивается с ростом Δf и L .

3. Погрешностями, связанными с неэквидистантностью расположения диодов в фотолинейках и матрицах (как, например, в фотоматрице ФПУ-14 и др.), неоднородностью распределения чувствительности отдельных фотодиодов и по поверхности их фотоплоскостей.

4. Погрешностями из-за конечной ширины линии излучения лазерного (полупроводникового) источника, асимметрии ее формы, а также паразитных составляющих в спектре излучения, уровень которых, как правило, изготовителями не регламентируется.

Построим зависимость частотной погрешности $\Delta f(k)$ для случая, когда нелинейность КН определяется лишь первой из рассмотренных причин. Тогда КН можно описать выражением

$$f(x_k) = (v/\lambda) \sin[\operatorname{arctg}(x_k/F) + \arcsin(\lambda f_0/v)], \quad (2)$$

где x_k , k связаны формулой (1); f_0 — центральная частота диапазона, на которой $x_k = 0$.

Если для вычисления частоты КН аппроксимировать прямой $f_a(x_k) = ax_k + b$, которая совпадает с (2) на краях диапазона, то зависимость погрешности $\Delta f(k) = f(k) - f_a(k)$ будет иметь вид, показанный на рис. 1. В данном случае погрешность вычислена в процентах от текущей частоты f для параметров АОИЧ: $\lambda = 657$ мкм, $v = 3600$ м/с, $f_0 = 1500$ МГц, $F = 50$ мм, $n = 1001$ в намеренно (для большей наглядности) широком диапазоне $x_k = \pm 10$ мм.

Привязку к двум частотным точкам (калибровку) можно выполнить, если в состав АОИЧ ввести источник опорного (реперного) бигармонического сигнала и применить один из алгоритмов вы-

числения номеров фотодиодов, например, описанный в [6]. В данном варианте совершенно не учитывается нелинейность КН, а погрешность в единицы процентов на рабочих частотах 1—2 ГГц означает погрешности в десятки мегагерц при разрешающей способности в единицы мегагерц [1].

Возможны два способа устранения или уменьшения рассматриваемой инструментальной погрешности, связанной с нелинейностью КН: линеаризация существующей КН аппаратурными средствами или ее замена приближенной (аппроксимированной).

Рассмотрение первого способа выходит за рамки настоящей статьи, что же касается второго, то его идея заключается в аппроксимации нелинейной КН фотодиодов отрезками прямых (ломаной). При этом вся кривая в диапазоне частот АОИЧ равномерно разбивается узлами аппроксимации (например, опорными сигналами) на $(R-1)$ участок. Всего узлов аппроксимации (или опорных сигналов) R и каждый из них (за исключением крайних) является общей точкой и для КН, и для двух соседних аппроксимирующих отрезков прямой. Очевидно, что в узлах погрешность равна нулю.

Для каждого j -го узла аппроксимации ($1 \leq j \leq R$) с помощью одного из алгоритмов [6, 7] находят номера фотодиодов k_j , которые в общем случае выражаются дробными числами, так как узловые (опорные) частоты f_j не обязательно совпадают с частотами настройки («центры» РИСС на этих частотах, в основном, не совпадают с центрами фотодиодов).

Интервалы по частотной оси между соседними узлами аппроксимации могут быть неодинаковыми. Их можно выбирать таким образом, чтобы в пределах j -го интервала нелинейную КН линеаризовать с требуемой частотной погрешностью. После линеаризации всех участков КН частотные интервалы Δf_j между соседними фотодиодами считают постоянными, и, следовательно, в пределах j -го интервала, т. е. в полосе частот $f_j - f_{j+1}$, можно использовать линейную фор-

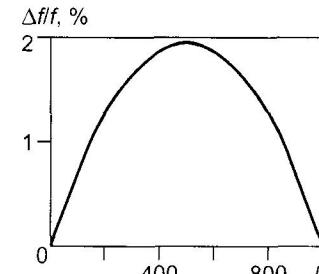


Рис. 1. Погрешность АОИЧ в простейшем варианте обработки

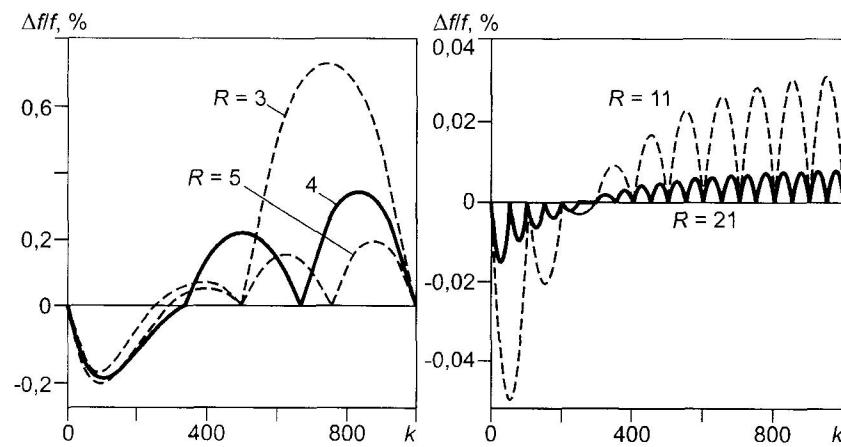


Рис. 2. Погрешности при аппроксимации кривой настройки ломаной линией с различным числом узлов R

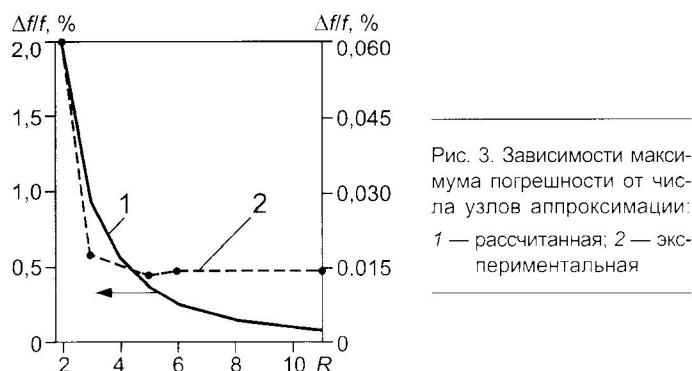


Рис. 3. Зависимости максимума погрешности от числа узлов аппроксимации: 1 — рассчитанная; 2 — экспериментальная

муль $f_{aj} = f_j + \Delta f (k_{j+1} - k_j)$, обеспечивающую, если пренебречь погрешностями линеаризации, точное вычисление частот f .

По-видимому, точность измерений частоты в рассматриваемом случае должна быть выше, поскольку в результатах измерений снижены погрешности, связанные с нелинейностью КН. На рис. 2 представлены графики погрешностей при различном количестве узлов аппроксимации R . С увеличением аппроксимирующих интервалов погрешность все чаще осциллирует вокруг нулевой линии, совпадая с ней в узлах, а амплитуда погрешности при этом заметно падает.

Оценить зависимость максимальной погрешности от числа узлов аппроксимирующей функции можно, использовав рис. 3. Из рис. 3 следует, что для снижения Δf на порядок по сравнению с аппроксимацией КН обычной прямой ($R=2$) достаточно пяти—шести узловых точек. Расчетная зависимость 1 стремится к нулю при $R \rightarrow \infty$.

Экспериментальную оценку предложенного способа выполняли на макете АОИЧ, аналогичном описанному в [1], в котором на каждой частоте, задаваемой высокостабильным СВЧ-генератором, для оцифровки амплитуд сигналов с 1024 фотоприемных ячеек ПЗС-линейки использовали 12-разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Эти данные посредством USB интерфейса вводили в персональный компьютер для формирования РИСС в виде тек-

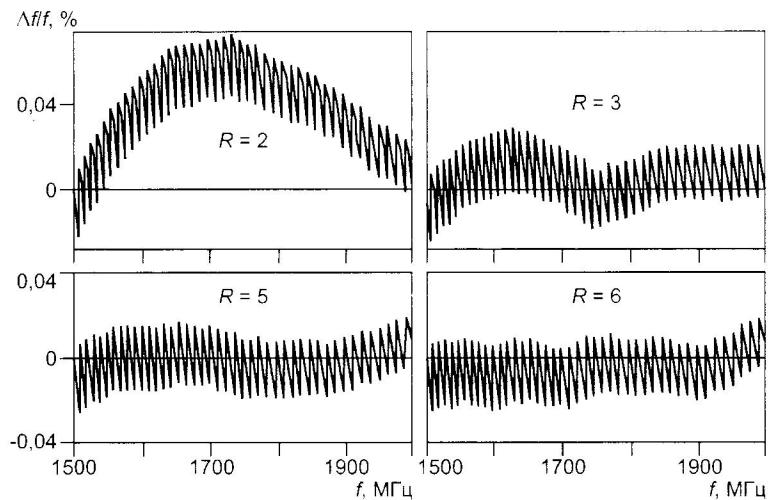


Рис. 4. Экспериментальные зависимости относительной погрешности при различном числе узлов аппроксимации

стовых файлов. Каждый файл содержал 1024-элементный вектор-столбец кодов АЦП. Всего в рабочем диапазоне АОИЧ для 501 частоты генератора было сформировано такое же число распределений, часть которых при последующей обработке могла быть использована в качестве узловых, а оставшиеся — в качестве промежуточных. Результаты экспериментальной оценки погрешности измерения частоты приведены на рис. 4, а экспериментальная зависимость 2 погрешности от количества узлов аппроксимации — на рис. 3.

Из рис. 4 следует, что систематическая (инструментальная) погрешность в эксперименте быстро снижается с увеличением числа узлов (опорных частот), но не до нуля, а до некоторого остаточного уровня (см. рис. 3). Эта остаточная инструментальная погрешность связана с тем, что на практике кроме нелинейности КН существует еще ряд влияющих факторов: асимметрия светового пятна на фотоприемнике; изменение ее как от частоты, так и от амплитуды сигнала; неравномерность амплитудно-частотной характеристики и др.

Пилообразная форма кривых на рис. 4 объясняется методической погрешностью алгоритма, который используется для определения положения светового пятна на линейке фотодиодов, а также дискретностями фотоприемника и шага частот генератора. В данном случае применяли простейший алгоритм определения номера фотодиода, соответствующий середине светового пятна. Размах алгоритмической погрешности не превышает частотного интервала между соседними фотодиодами $\Delta_f = 540$ кГц. Таким образом, при отсутствии инструментальной погрешности график представлял бы собой осциллирующий вокруг нуля пилообразный сигнал амплитудой $\Delta_f/2$.

Из сопоставления зависимостей на рис. 4 следует, что предлагаемый способ уменьшения инструментальных погрешностей несомненно эффективен. Очевидно, что игнорирование расхождений между реальной и идеальной КН может привести к существенным инструментальным погрешностям измерений.

Практическая значимость настоящей работы состоит в эффективности методики оценки и нейтрализации инструментальных погрешностей, выражющихся в нелинейности и неравномерности КН. Поскольку вклад инструментальных погрешностей, вызванных разными причинами, на результатирующую погрешность измерений частоты может оказаться весьма значительным, представляется целесообразным включить оценку этих погрешностей в методики настройки и регулировки разрабатываемых и изготавливаемых АОИЧ.

Предложенный алгоритм можно рекомендовать к практическому использованию, эффективность его будет возрастать с увеличением полосы рабочих частот АОИЧ.

Литература

1. Роздобудько В. В., Пелипенко М. И. Быстродействующий измеритель параметров СВЧ-радиосигналов // Специальная техника. 2006. № 1. С. 28—36.
2. Шибаев С. С., Новиков В. М., Роздобудько В. В. Теория акустооптического спектроанализатора с синтезированной апертурой // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2010. Т. 13. № 1. С. 55—60.