



УДК 535:631.373.826

ВЫСОКОТОЧНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ С ПЗС-ЛИНЕЙКАМИ

Е.Г. Лебедько^а, Е.Н. Зверева^а, Нгуен Ву Тунг^б^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация^б Государственный технический университет имени Ле Куи Дона, Ханой, 236 Хоанг Куок Вьет, Кау Зай, Вьетнам

Адрес для переписки: e.zvereva@rambler.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 22.01.15, принята к печати 01.04.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-3-398-404

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Лебедько Е.Г., Зверева Е.Н., Нгуен Ву Тунг. Высокоточное определение углового положения точечного источника излучения с ПЗС-линейками // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 3. С. 398–404.

Аннотация

Предмет исследования. Предложен метод измерения углового положения точечного источника в системе с ПЗС-линейками посредством преобразования «угол – время – код» в условиях малой освещенности и при повышенных соотношениях сигнал/шум. Проведена оценка потенциальной точности метода, которая определяется неустранимыми аппаратными случайными погрешностями измерения в условиях оптимальной обработки поступающей информации при однократном считывании ее с ПЗС-линейки.

Метод. Предлагается схема оптико-электронной системы измерения углового положения с ПЗС-линейками с вытянутыми чувствительными элементами и опорной точкой отсчета. При этом на линейки проецируются изображения как опорного точечного источника, так и измеряемого точечного источника, угловое положение которого следует определять с высокой точностью. С выхода ПЗС-линейки сигналы поступают на линейный оптимальный (или близкий к нему) фильтр, а с него – на схему фиксации положения максимума сигнала. Схема обеспечивает минимальную погрешность, обусловленную влиянием шумов. Фронты импульсов, соответствующие максимумам сигналов, формируют временной интервал, который заполняется счетными импульсами высокой частоты. Число импульсов в этом интервале будет соответствовать измеряемому угловому положению точечного источника.

Основные результаты. Проведен анализ случайных погрешностей с позиции теории статистических решений. Анализ учитывает спектральную функцию сигналов, определяемую передаточными функциями оптической системы и ПЗС-линейки как анализатора изображения. Проведено исследование точности измерения в зависимости от тактовой частоты считывания информации с ПЗС-линейки при различных значениях отношения сигнала к шуму. Показано, что даже при однократном считывании ПЗС-линейки по предлагаемой оптико-электронной схеме погрешность измерения не превышает 0,01 размера чувствительного элемента.

Практическая значимость. Результаты работы могут найти применение в высокоточных измерительных оптико-электронных системах звездных датчиков для определения углового положения маломощных точечных источников излучения.

Ключевые слова

угловое положение точечного источника, потенциальная точность определения углового положения точечного источника, спектральная функция сигнала на выходе приемника.

HIGH-PRECISION DETERMINATION OF THE ANGULAR POSITION FOR POINT LIGHT SOURCE WITH CCD-ARRAYS

E.G. Lebedko^а, E. N. Zvereva^а, Nguyen Vu Tung^б^а ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation^б Le Quy Don Technical University, Hanoi, 236 Hoang Quoc Viet, Cau Giay, Viet Nam

Corresponding author: e.zvereva@rambler.ru

Article info

Received 22.01.15, accepted 01.04.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-3-398-404

Article in Russian

For citation: Lebedko E.G., Zvereva E.N., Nguyen Vu Tung. High-precision determination of the angular position for point light source with CCD-arrays. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol.15, no. 3, pp. 398–404.

Abstract

Subject of study. A method of angular position measuring for point light source in the system with CCD arrays is proposed by converting of angle – time – code in low light conditions and at high signal / noise ratio. Assessment of the method

potential accuracy is given. It is determined by instrumental irremovable random errors of measurement in terms of optimal processing of incoming information with a single reading it with CCD – arrays.

Method. This work introduces an optoelectronic system circuit with CCD arrays with stretched sensing elements and a point of reference for angular position measuring. In this case the arrays have images projections of both the reference point source and the target point source, which angular position is measured with high precision. From the CCD array output the signals arrive at an optimal (or apt) linear filter, and then to the signal peak position detection circuit. The scheme provides minimum error due to the influence of noise. Pulse edges, corresponding to the signals maximum, make a time interval filled with high-frequency counting pulses. The number of pulses in this interval will correspond to the measured angular position of the target point source.

Main results. Analysis of random errors has been carried out in terms of statistical decision theory. Analysis takes into account the spectral function of the signals defined by transfer functions of the optical system and a CCD array as an image analyzer. Research of measurement accuracy is carried out depending on the clock frequency of reading information from CCD arrays for different values of signal-to-noise ratio. It has been shown that even with a single readout with CCD array by the proposed opto-electronic circuit measuring error does not exceed 0.01 of the sensing element size.

Practical significance. The results are usable in high-precision measuring opto-electronic systems of star sensors for determining the angular position of the low-power point light sources.

Keywords

point source angular position, potential accuracy of point source angular position measurement, signal spectral function at the receiver output

Введение

Высокоточное определение углового положения точечных источников излучения широко используется в измерительной технике. Распространение получили измерители на ПЗС-матрицах с последующей цифровой обработкой для нахождения центра тяжести пятна рассеяния на чувствительных элементах [1–11]. При этом для получения высокой точности измерений используется осреднение за N считываний матрицы. Наряду с таким методом измерения авторами предложен высокоточный метод измерения, не требующий компьютерной обработки при однократном считывании.

Целью настоящей работы являлось рассмотрение метода измерения углового положения точечного источника относительно реперной марки в заданном поле посредством преобразования «линейный размер – временной интервал – код» и определение случайной погрешности измерения, приходящейся на один светочувствительный элемент ПЗС-линейки, в условиях оптимальной линейной фильтрации сигналов на выходе фотоприемника при однократном считывании информации.

Метод и устройство измерения углового положения точечного источника излучения

Предлагаемый метод высокоточного определения углового положения точечного источника излучения в пространстве основан на использовании двух ПЗС-линейек с оптимальной линейной фильтрацией сигналов, снимаемых с них, и применением для дальнейшей обработки преобразования «линейный размер – временной интервал – код» (ЛРВК).

Устройство, реализующее этот метод, состоит из оптико-электронной приемной системы, которая включает в себя приемный объектив (ПО), реперный точечный источник излучения (РИИ), полупрозрачное зеркало (ППЗ), две ПЗС-линейки с вытянутыми чувствительными элементами и схемой управления линейками (СУ), а также измерительные схемы (ИС) (рис. 1).

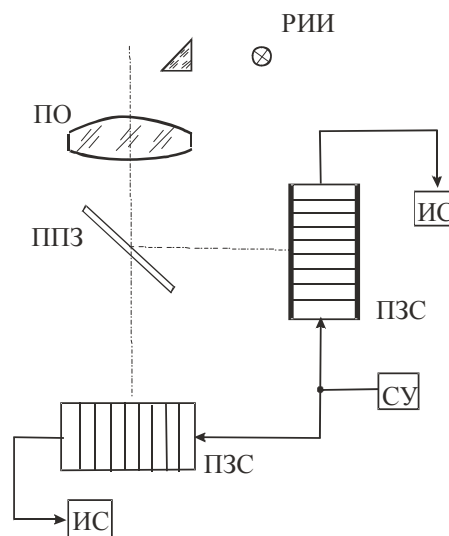


Рис. 1. Оптико-электронная приемная система (пояснения в тексте)

Структурная схема измерительного устройства приведена на рис. 2. Измерительная схема по каждой координате (X и Y) содержит линейный согласованный фильтр (СФ), позволяющий минимизировать погрешность измерения, обусловленную шумами, схему выделения максимума сигнала (СВМ), которая состоит из дифференцирующей цепи (ДЦ), двух пороговых устройств ПУ1 и ПУ2, схемы совпадений (СС1), и схемы преобразования «линейный размер – временной интервал – код». Это простейшая схема, включающая в себя триггер (Тр), генератор счетных импульсов (ГСИ), формирующий последовательность коротких импульсов высокой частоты, и схемы совпадения (СС2) и счетчика импульсов (СИ).

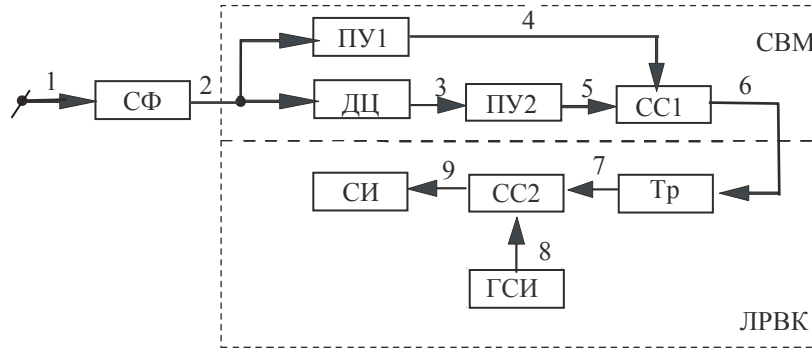


Рис. 2. Структурная схема измерительного устройства

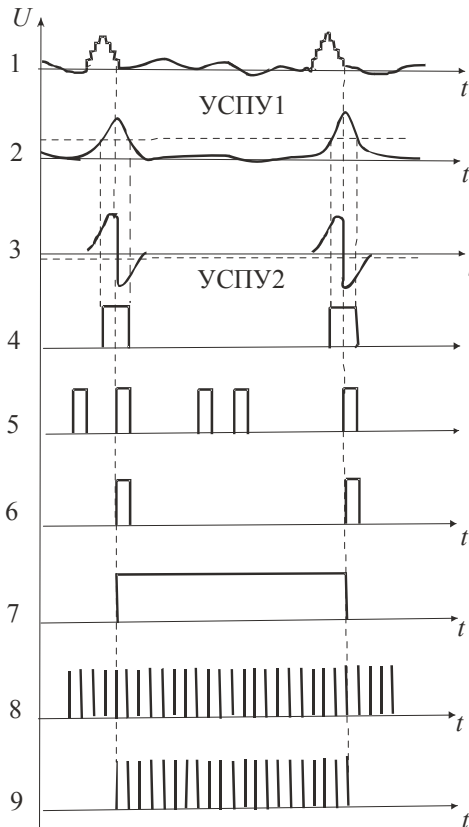


Рис. 3. Временные диаграммы, поясняющие работу измерительного устройства.

Номера диаграмм совпадают с номерами сигналов на структурной схеме (рис. 2).

УСПУ1 и УСПУ2 – уровни срабатывания соответственно пороговых устройств ПУ1 и ПУ2

В схеме выделения максимума сигнала ПУ1 и СС1 представляют собой временной селектор, который пропускает только импульс, фронт которого соответствует максимуму сигнала, так как уровень срабатывания ПУ2 близок к нулю. Работа схемы выделения максимума сигнала подробно описана в [12].

Работа устройства осуществляется следующим образом. Слегка расфокусированное изображение реперного и измеряемого точечных источников проецируется на ПЗС-линейки (соответственно по координатам X и Y). При считывании сначала на выходе линеек появляется сигнал от реперного источника, после оптимальной фильтрации согласованным фильтром сигнал поступает на дифференцирующую цепочку ДЦ и пороговое устройство ПУ1 схемы выделения максимума. Продифференцированный ДЦ сигнал подается на пороговое устройство ПУ2, уровень срабатывания которого близок к нулю, вследствие

чего ПУ2 срабатывает от любого воздействия, в том числе и при переходе продифференцированного сигнала через ноль. Однако благодаря временной селекции, осуществляемой ПУ1 и схемой совпадения СС1, импульс с порогового устройства ПУ1 открывает схему совпадений СС1 только в момент перехода продифференцированного сигнала через ноль, и на выходе СС1 появится импульс, фронт которого соответствует положению максимума сигнала, снимаемого с согласованного фильтра. Этим фронтом импульса опрокидывается триггер Тр, открывается схема СС2, и счетные импульсы от ГСИ поступают в счетчик СИ. С появлением измеряемого сигнала аналогичным образом фронт импульса, соответствующего максимуму сигнала, снимаемого с согласованного фильтра, приводит Тр в исходное состояние, схема СС2 закрывается, и счетные импульсы от ГСИ прекращают поступать в счетчик.

Таким образом, в счетчике будет записано число импульсов, которое соответствует линейному положению изображения точечного источника относительно реперной марки, а следовательно, и угловое положение точечного источника в заданном поле. При этом измерение проводится при однократном считывании информации с линеек. Работу схемы поясняют временные диаграммы (рис. 3), номера диаграмм совпадают с номерами сигналов на структурной схеме (рис. 2).

Так как реперный и измеряемый сигналы проходят через один и тот же приемно-измерительный тракт, то почти полностью исключаются любые погрешности, вызванные частотно-фазовыми искажениями под действием дестабилизирующих факторов, и обеспечивается стабильность измерений [13].

Потенциальная точность измерительного устройства

Потенциальные возможности рассмотренного метода измерения по точности, определяемые случайными составляющими погрешностей измерения с различными законами распределения, можно оценить по формуле

$$\delta_{|p=0,997} = \frac{\pm\Delta_1 \pm \Delta_2 \pm 3\sigma_1 \pm 3\sigma_2}{T_c}, \quad (1)$$

где Δ_1 – максимальная случайная погрешность измерения временного интервала; Δ_2 – максимальная случайная погрешность, обусловленная дестабилизирующими факторами при измерении временного интервала; σ_1 и σ_2 – средние квадратичные погрешности определения положения максимума реперного и измеряемого сигналов соответственно; $T_c=1/F$ – период считывания каждого светочувствительного элемента линейки (F – частота считывания элемента).

Формула (1) определяет величину случайной погрешности с вероятностью $p=0,997$, приходящейся на один чувствительный элемент (пиксель) фотоприемника.

Для удобства расчетов будем исходить из предположения, что максимальная случайная погрешность Δ_2 составляет в худшем случае 20% от погрешности $\Delta_1 = \pm T_0$ (T_0 – период следования счетных импульсов ГСИ), а средняя квадратичная погрешность фиксации реперного источника в пять раз меньше соответствующей погрешности фиксации измеряемого сигнала. В этом случае формула (1) принимает вид

$$\delta_{|p=0,997} = \frac{\pm 1,2T_0 \pm 3,6\sigma}{T_c}. \quad (2)$$

Естественно, что основной составляющей погрешности измерения может оказаться погрешность определения положения максимума реперного и измеряемого сигналов, которая при оптимальной линейной фильтрации определяется соотношением [14]

$$\sigma = \left[\frac{2}{\pi G} \int_0^\infty \omega^2 |S_\Phi(j\omega)|^2 d\omega \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (3)$$

Здесь энергетический спектр G шумов на входе линейного фильтра будем считать равномерным, а спектральную функцию сигнала $S_\Phi(j\omega)$ можно будет представить в виде

$$S_\Phi(j\omega) = \frac{1}{4\pi^2} \iint \int_{-\infty}^\infty S_\Phi(j\nu_1, j\nu_2) \exp j[\nu_1\xi(t) + \nu_2\eta(t) - \omega t] d\nu_1 d\nu_2 dt, \quad (4)$$

где ν_1 и ν_2 – пространственные частоты,

$$S_\Phi(j\nu_1, j\nu_2) = S_E(j\nu_1, j\nu_2) K_A(j\nu_1, j\nu_2) = S_L(j\beta\nu_1, j\beta\nu_2) K_0(j\nu_1, j\nu_2) K_A(j\nu_1, j\nu_2)$$

– спектральная пространственная функция лучистого потока на выходе анализатора изображения, которым является многоэлементный приемник, $S_E(j\nu_1, j\nu_2)$ – спектральная пространственная функция освещенности на чувствительном слое приемника, $K_A(j\nu_1, j\nu_2)$ – передаточная функция анализатора изображения, $K_0(j\nu_1, j\nu_2)$ – передаточная функция оптической системы, $S_L(j\beta\nu_1, j\beta\nu_2)$ – спектральная функция яркости источника излучения, которую для точечного источника можно представить в виде

$$S_L(j\nu_1, j\nu_2) = m_1 \exp[-j(\nu_1 x_0 + \nu_2 y_0)], \quad (5)$$

где $m_1 = \int_{-\infty}^\infty I_0 W(I_0) dI_0$ – среднее значение энергетической силы света I_0 ; $W(I_0)$ – плотность вероятностей энергетической силы света.

Весовая функция характеризует оптическую систему как по способности концентрировать поток излучения, так и по способности распределения энергии в пространстве. При этом эти свойства независимы друг от друга. Исходя из этого, весовую функцию можно представить в виде двух сомножителей:

$$g_0(x, y) = g_0 \cdot g'_0(x, y).$$

Здесь $g'_0(x, y)$ – импульсная характеристика объектива, а

$$g_0 = \frac{\pi\tau(\lambda)D_0^2}{D_0^2 + 4f^2}, \quad (6)$$

где D_0 – диаметр входного зрачка объектива; $\tau(\lambda)$ – спектральное пропускание оптической системы. Будем считать, что $\tau(\lambda) = \tau_0$, т.е. не зависит от длины волны в рабочем диапазоне частот.

Для простоты расчетов объективов со сферическими aberrациями удобно весовую функцию объектива аппроксимировать гауссовой функцией [15]

$$g_0(x, y) = g_0 \frac{1}{\rho_0^2} \exp\left(-\pi \frac{x^2 + y^2}{\rho_0^2}\right), \quad (7)$$

где ρ_0 – радиус пятна рассеяния примерно на уровне 0,5 от максимального значения. В этом случае передаточную функцию объектива с учетом (6) и (7) можно представить в виде

$$K_0(jv_1, jv_2) = g_0 \exp\left[-\frac{\rho_0^2}{4\pi}(v_1^2 + v_2^2)\right]. \quad (8)$$

В матричном фотоприемнике можно считать, что передаточная функция анализатора представляет собой передаточную функцию анализатора с линейным сканированием вида

$$K_A(jv_1, jv_2) = K_{A0}(jv_1, jv_2) \sum_{k=0}^{N-1} \exp[-j(v_1\xi_k + v_2\eta_k)], \quad (9)$$

где $K_{A0}(jv_1, jv_2)$ – передаточная функция элементарной ячейки матрицы.

Исходя из предположения, что при M чувствительных элементах линейки, которые имеют форму прямоугольника со сторонами a по оси ξ и b по оси η , расстояния между чувствительными элементами Δ ничтожно малы, передаточную функцию анализатора изображения $K_A(jv_1, jv_2)$ можно представить в виде

$$\begin{aligned} K_{Ac}(jv_1, jv_2) &= abSa\left(\frac{av_1}{2}\right)Sa\left(\frac{bv_2}{2}\right)\frac{\sin\frac{M(a+\Delta)v_1}{2}}{\sin\frac{(a+\Delta)v_1}{2}}\exp\left[-j\frac{(M-1)(a+\Delta)v_1}{2}\right] = \\ &= abSa\left(\frac{av_1}{2}\right)Sa\left(\frac{bv_2}{2}\right)\frac{\sin\frac{aMv_1}{2}}{\sin\frac{av_1}{2}}\exp\left[-j\frac{a(M-1)v_1}{2}\right] = abMSa\left(\frac{aMv_1}{2}\right)Sa\left(\frac{bMv_2}{2}\right)\exp\left[-j\frac{a(M-1)v_1}{2}\right], \end{aligned} \quad (10)$$

где $Sa(x) = (\sin x) / x$ – функция отсчетов. Так как считывание с элементов линейки осуществляется с частотой f_c , то функцию $\xi(t)$ в (4) можно представить в виде $\xi(t) = V_\xi t = \frac{a}{T_c} t$, где $T_c = \frac{1}{f_c}$. В этом случае формула (4) принимает вид

$$S_\Phi(j\omega) = \frac{1}{2\pi} \int \int_{-\infty}^{\infty} S_\Phi(jv_1, jv_2) \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_\Phi(jv_1, jv_2) \exp j\left[v_1 \frac{a}{T_c} \omega\right] t dt \right] dv_1 dv_2. \quad (11)$$

Интеграл в скобках – интегральное представление дельта-функции, следовательно, используя фильтрующее свойство дельта-функции и формулу $\delta(ax) = \frac{1}{|a|} \delta(x)$, соотношение (11) можно записать как

$$S_\Phi(j\omega) = \frac{T_c}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_\Phi\left(j\frac{\omega T_c}{a}, jv_2\right) dv_2. \quad (12)$$

Тогда спектральная функция сигнала на выходе приемника (12) с учетом (5), (8), (9), (10) равна

$$\begin{aligned} S_\Phi(j\omega) &= \frac{lT_c}{2\pi a} \int_{-\infty}^{\infty} S_L\left(j\beta\frac{\omega T_c}{a}, j\beta v_2\right) K_0\left(j\frac{\omega T_c}{a}, jv_2\right) K_A\left(j\frac{\omega T_c}{a}, jv_2\right) dv_2 = \\ &= \frac{lT_c M b g_0 m_1 J}{2\pi} \exp\left(-\frac{\rho_0^2 T_c^2 \omega^2}{4\pi a^2}\right) \exp\left[-j\omega\left(\frac{T_c \beta x_0}{a} + T_c \frac{M-1}{2}\right)\right] Sa\left(\frac{MT_c \omega}{2}\right) \times \\ &\times \int_{-\infty}^{\infty} Sa\left(\frac{bv_2}{2}\right) \exp\left[-\frac{\rho_0^2}{4\pi} v_2^2 + j\omega \beta v_2\right] dv_2, \end{aligned} \quad (13)$$

где l – чувствительность фотоприемника. Вычисление интеграла приводит к следующему соотношению:

$$\Psi = \int_{-\infty}^{\infty} Sa\left(\frac{bv_2}{2}\right) \exp\left[-\left(\frac{\rho_0^2}{4\pi}v_2^2 + jy_0\beta v_2\right)\right] dv_2 \approx \frac{2\pi}{\beta} \exp\left(-\frac{\pi\beta^2 y_0^2}{\rho_0^2}\right) \operatorname{ch}\left(\frac{\pi\beta y_0}{\rho_0^2}\right) \operatorname{erf}\left(\frac{b\sqrt{\pi}}{2\rho_0}\right). \quad (14)$$

Учитывая, что линейное увеличение $\beta \ll 1$, соотношение (14) приводится к виду

$$\Psi \approx \frac{2\pi}{\beta} \operatorname{erf}\left(\frac{b\sqrt{\pi}}{2\rho_0}\right), \quad (15)$$

где $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt$ – функция Крампа.

Таким образом, выражение для спектральной функции сигнала на выходе приемника учетом (13) и (15) можно представить в виде

$$S_{\Phi}(j\omega) = PSa\left(\frac{MT_c\omega}{2}\right) \exp\left(-\frac{\rho_0^2 T_c^2 \omega^2}{4\pi a^2}\right) \operatorname{erf}\left(\frac{b\sqrt{\pi}}{2\rho_0}\right) \exp\left[-j\omega\left(\frac{T_c\beta x_0}{a} + T_c \frac{M-1}{2}\right)\right], \quad (16)$$

где $P = lT_c M g_0 m_{1j}$.

Таким образом, с учетом (16) формула (3) для средней квадратичной погрешности фиксации временного положения максимума сигнала принимает вид

$$\sigma = \frac{0,6\rho_0 T_c}{\mu a \sqrt{1 - \exp\left(-\frac{\pi a^2 M^2}{2\rho_0^2}\right) \operatorname{erf}\left(\frac{b\sqrt{\pi}}{2\rho_0}\right)}}, \quad (17)$$

где μ – отношение максимума сигнала к среднему квадратичному значению шума на выходе оптимального фильтра.

На графиках рис. 4 приведены, рассчитанные по формуле (2) с учетом (17), кривые изменения погрешности $\delta_{|p=0,997}$ в зависимости от частоты считывания чувствительного элемента при различных значениях отношения сигнал/шум μ и при $T_c = 10^{-8}$ с (т.е. при частоте импульсов ГСИ – 100 МГц) и отношении пятна рассеяния ρ_0 к размеру чувствительного элемента линейки a , равному десяти. Из рис. 4 видно, что, несмотря на то, что при снижении частоты считывания средняя квадратичная погрешность фиксации временного положения сигнала возрастает, погрешность измерения, приходящаяся на один пиксель падает. Такая высокая точность измерения имеет место при однократном считывании.

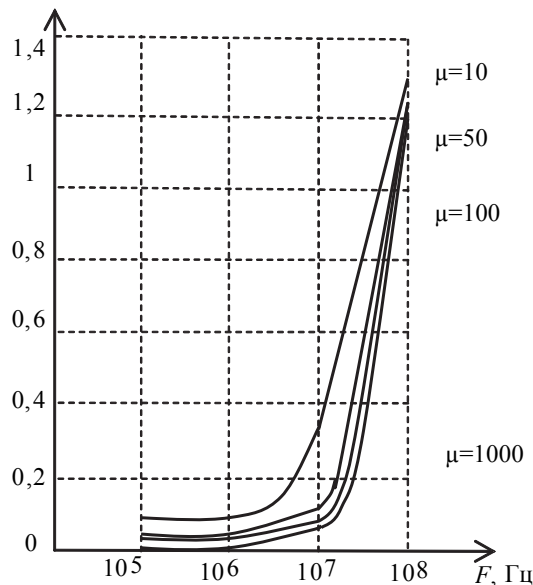


Рис. 4. Погрешность измерения в зависимости от частоты считывания светочувствительного элемента

Следует заметить, что вместо линеек с вытянутыми чувствительными элементами можно использовать обычные ПЗС-линейки в сочетании с цилиндрическими линзами. Однако в этом случае будем иметь энергетический проигрыш в $\sqrt{2}$ раз.

Заключение

Проведенный анализ погрешностей рассмотренного метода измерения углового положения точечного источника показал, что потенциальная точность определения углового положения точечного источника излучения зависит, главным образом, от частоты считывания чувствительных элементов линеек и величины отношения сигнал/шум. Показано, например, что при тактовой частоте считывания 10^5 Гц потенциальная точность может составлять 0,01 и менее размера чувствительного элемента.

Литература

1. Konyakhin I.A., Turgalieva T.V. Three-coordinate digital autocollimator // Journal of Optical Technology (A Translation of Opticheskii Zhurnal). 2013. V. 80. N 12. P. 772–777. doi: 10.1364/JOT.80.000772
2. Konyakhin I.A., Kopylova T.V., Konyakhin A.I. Optic-electronic autocollimation sensor for measurement of the three-axis angular deformation of industry objects // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2012. V. 8439. Art. 84391N. doi: 10.1117/12.922096.
3. Kleshchenok M.A., Anisimov A.G., Lashmanov O.U., Timofeev A.N., Korotaev V.V. Alignment control optical-electronic system with duplex retroreflectors // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2014. V. 9131. Art. 91311X. doi: 10.1117/12.2052290
4. Konyakhin I., Timofeev A., Usik A., Zhukov D. The experimental research of the systems for measuring the angle rotations and line shifts of the large aperture radio-telescope components // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2010. V. 7544. Art. 75443P. doi: 10.1117/12.885604
5. Konyakhin I.A., Timofeev A.N., Konyakhin A.I. Three-axis optic-electronic autocollimation system for the inspection of large-scale objects // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2013. V. 8788. Art. 87882C. doi: 10.1117/12.2020343
6. Konyakhin I.A., Timofeev A.N., Yaryshev S.N. High precision angular and linear measurements using universal opto-electronic measuring modules in distributed measuring systems // Key Engineering Materials. 2010. V. 437. P. 160–164. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.437.160
7. Konyakhin I.A., Kopylova T.V., Konyakhin A.I., Smekhov A.A. Optic-electronic systems for measurement the three-dimension angular deformation of axles at the millimeter wave range radiotelescope // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2013. V. 8759. Art. 87593E. doi: 10.1117/12.2014605
8. Turgalieva T.V., Konyakhin I. A. Research of autocollimating angular deformation measurement system for large-size objects control // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2013. V. 8788. Art. 878832. doi: 10.1117/12.2020861
9. Konyakhin I.A., Timofeev A.N., Usik A.A., Zhukov D.V. Optic-electronic systems for measuring the angle deformations and line shifts of the reflecting elements at the rotateable radio-telescope // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2011. V. 8082. Art. 80823R. doi: 10.1117/12.890059
10. Pantyushin A., Korotaev V. Control measurement system for railway track position // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2012. V. 8486. Art. 84861B. doi: 10.1117/12.930503
11. Anisimov A.G., Pantyushin A.V., Lashmanov O.U., Vasilev A.S., Timofeev A.N., Korotaev V.V., Gordeev S.V. Absolute scale-based imaging position encoder with submicron accuracy // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2013. V. 8788. Art. 87882T. doi: 10.1117/12.2021022
12. Лебедько Е.Г. Системы импульсной оптической локации. СПб.: Лань, 2014. 368 с.
13. Мараев А.А., Timofeev A.N. Energetic sensitivity of optical-electronic systems based on polychromatic optical equisignal zone // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2013. V. 8788. Art. 878836. doi: 10.1117/12.2020757
14. Лебедько Е.Г. Теоретические основы передачи информации. СПб.: Лань, 2011. 352 с.
15. Левшин В.Л. Обработка информации в оптических системах пеленгации. М.: Машиностроение, 1978. 168 с.

<i>Лебедько Евгений Георгиевич</i>	–	доктор технических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, eleb@rambler.ru
<i>Зверева Елена Николаевна</i>	–	старший преподаватель, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, e.zvereva@rambler.ru
<i>Нгуен Ву Тунг</i>	–	кандидат технических наук, зам. заведующего кафедрой, Государственный технический университет имени Ле Куи Дона, Ханой, 236 Хоанг Куок Вьет, Кау Заи, Вьетнам, Vutung76@gmail.com
<i>Evgeny G. Lebedko</i>	–	D.Sc., Professor, Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, eleb@rambler.ru
<i>Elena N. Zvereva</i>	–	senior lecturer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, e.zvereva@rambler.ru
<i>Nguyen Vu Tung</i>	–	PhD, Deputy Department head, Le Quy Don Technical University, Hanoi, 236 Hoang Quoc Viet, Cau Giay, Viet Nam, Vutung76@gmail.com