



УДК 621.382.8

О. В. Алымов, В. А. Арутюнов, Ю. А. Быстров
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Погрешность измерения угловой координаты линейным фоточувствительным прибором с переносом заряда

Рассмотрен вопрос о погрешности измерения угловой координаты, которая вызвана неодинаковой интегральной чувствительностью отдельных пикселей разработанного линейного фоточувствительного прибора с переносом заряда, а также разбросом их размеров, обусловленных конструкцией и технологией изготовления.

Угловая координата, погрешность измерения, центр тяжести светового луча

Линейные фоточувствительные приборы с переносом заряда (ЛФППЗ) нашли широкое применение в системах ориентации космических аппаратов (КА) [1]. Использование ЛФППЗ в таких системах позволило отказаться от ранее применявшихся одноэлементных устройств с механическим сканированием, что существенно улучшило их массогабаритные характеристики.

В таких системах ориентации ЛФППЗ выступает как элемент, измеряющий угол между осями орбитальной (опорной) системы координат и осями системы координат, жестко связанной с космическим аппаратом [2].

Астрономическими источниками излучения, к которым привязывается опорная система координат, являются Солнце, Земля и звезды. В качестве астроориентира в большинстве околоземных КА используется Солнце [3]. Это связано с тем, что Солнце настолько мощный источник видимого излучения, что вопрос о выделении полезного сигнала на фоне помех практически не стоит. Поэтому при создании приборов ориентации по Солнцу отсутствуют ограничения, вытекающие из требований оптимизации пространственно-временной обработки по критерию минимизации влияния помех.

Разрешающая способность любого дискретного фоточувствительного устройства, каковым является ЛФППЗ, определяется размерами его

пикселей [4], [5]. Однако погрешность измерения угловой координаты можно существенно уменьшить, если использовать метод вычисления центра тяжести светового штриха (метод средне-взвешенного). В этом случае световой штрих засвечивает несколько пикселей [6].

На рис. 1 представлена схема расположения отдельных элементов измерения угла α между соответствующей осью КА и направлением на Солнце. Датчик состоит из ЛФППЗ 1 и целевой диаграммы 2, плоскости которых расположены параллельно друг другу и находятся на расстоянии d . Сформированный щелью солнечный луч 3 попадает на поверхность ЛФППЗ, и засвеченные фотоэлементы преобразуют его в электрический сигнал.

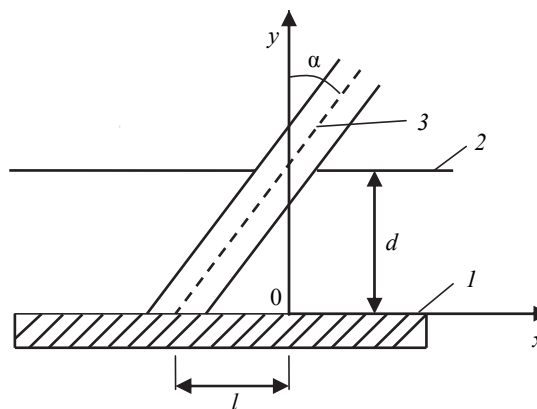


Рис. 1

Поскольку известно местоположение фоточувствительных элементов от начала координат и, соответственно, центр тяжести светового луча l , то угол отклонения солнечного луча от оси y в плоскости xOy , связанной с системой координат КА, будет определяться соотношением

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{l}{d}. \quad (1)$$

При использовании ЛФППЗ в системах ориентации КА одним из главных параметров является точность измерения угловой координаты α , на которую оказывают влияние конструкция и технология изготовления ЛФППЗ. Зависимость эта вызвана тем, что при производстве ЛФППЗ имеются разброс параметров фотошаблонов, неточность их позиционирования, подтрав при плазмохимической обработке, неодинаковая прозрачность поликремниевых электродов, различная толщина диэлектрических слоев и др. Все это приводит к тому, что интегральная чувствительность пикселей оказывается различной и появляется разброс их размеров, что, в свою очередь, влияет на погрешность измерения угловой координаты.

В работе [7] получено соотношение, позволяющее рассчитать погрешность измерения центра тяжести светового штриха Δl из-за неодинаковой интегральной чувствительности элементов ЛФППЗ:

$$\Delta l = a \frac{\Delta S}{S} \sqrt{\frac{(n-1)(n+1)}{12n}},$$

где a – размер пикселя; ΔS – разброс чувствительности пикселей; S – средняя интегральная чувствительность; n – количество пикселей, засвеченных световым штрихом.

В соответствии с (1) погрешность измерения угловой координаты $\Delta \alpha$, обусловленная разбросом интегральной чувствительности пикселей, будет определяться выражением

$$\Delta \alpha_1 = \operatorname{arctg} \frac{a}{d} \frac{\Delta S}{S} \sqrt{\frac{(n-1)(n+1)}{12n}}. \quad (2)$$

Из полученного соотношения следует, что составляющая погрешность измерения угловой координаты $\Delta \alpha$ зависит как от параметров ЛФППЗ (размера пикселей a и разброса их чувствительности), так и конструкции измерительного устройства (расстояния между щелевой диафрагмой

и фоточувствительной поверхностью ЛФППЗ d и ширины щели, формирующей световой штрих). Размер светового штриха однозначно определяет число засвеченных пикселей n . Соотношение (2) было использовано для определения погрешности измерения угловой координаты разработанного ЛФППЗ [8]. С этой целью был измерен разброс чувствительности пикселей созданного ЛФППЗ.

На рис. 2 приведен вид строки видеосигнала при равномерной засветке пикселей и различной освещенности.

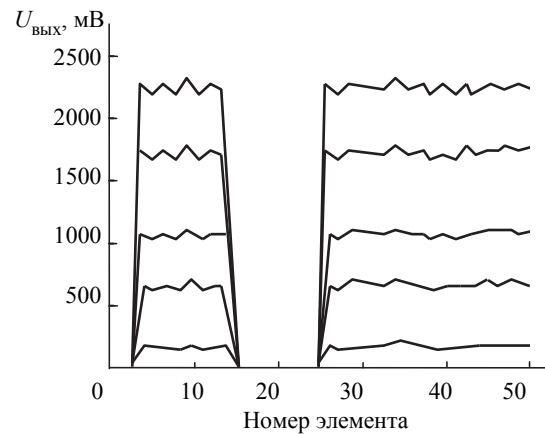


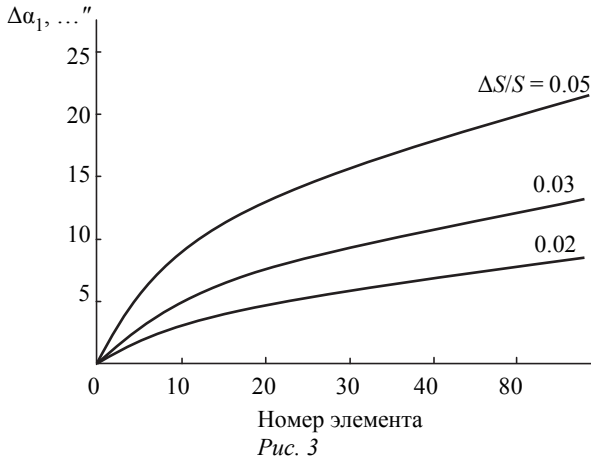
Рис. 2

Как видно, имеет место разброс величины видеосигнала, который обусловлен неодинаковой интегральной чувствительностью пикселей. Из рис. 2 следует, что среднее значение $\Delta S/S$ при различной освещенности равно $\Delta S/S = \Delta U_{\text{вых}}/U_{\text{вых}} = 0.03$.

С использованием измеренного значения $\Delta S/S = 0.03$ была рассчитана погрешность определения угловой координаты $\Delta \alpha_1$.

На рис. 3 представлена зависимость $\Delta \alpha_1$ от числа засвеченных пикселей при различных значениях $\Delta S/S$ и фиксированных значениях $d = 1$ см, $a = 12$ мкм. Как видно, погрешность измерения угловой координаты разработанного ЛФППЗ из-за неодинаковой чувствительности пикселей при $n < 100$ не превышает $15''$. Она снижается при уменьшении числа засвеченных пикселей. Однако следует иметь в виду, что это уменьшение приводит к снижению точности определения центра тяжести светового луча. Поэтому при конструировании устройства измерения угловой координаты нужно исходить из разумного компромисса при выборе числа засвеченных пикселей.

Среднеквадратичная погрешность положения центра тяжести светового штриха Δl_2 из-за неодинаковых размеров пикселей Δa в соответствии



с теорией размерных цепей [9] определяется выражением

$$\Delta l_2 = \sqrt{\Delta a^2 \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial l_{ц.т}}{\partial x_i} \right)^2} \quad (3)$$

Здесь

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial l_{ц.т}}{\partial x_i} \right) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\sum_{i=1}^n U_0 x_i}{\sum_{i=1}^n U_0} \right) \right)^2 = \frac{\sum_{i=1}^n U_0^2}{\left(\sum_{i=1}^n U_0 \right)^2} = \frac{n U_0^2}{n^2 U_0^2} = \frac{1}{n}, \quad (4)$$

где n – количество засвеченных пикселей; $l_{ц.т}$ – положение центра тяжести светового штриха; x_i – координата i -го пикселя; U_0 – сигнал i -го пикселя, который в данном случае принимается постоянным.

После подстановки (4) в (3) получаем

$$\Delta l_2 = \sqrt{\frac{\Delta a^2}{n}} = \frac{\Delta a}{\sqrt{n}}.$$

Отсюда погрешность измерения угловой координаты из-за разброса размеров пикселей $\Delta \alpha_2$ будет определяться соотношением

$$\Delta \alpha_2 = \arctg \frac{1}{d} \frac{\Delta a}{\sqrt{n}}. \quad (5)$$

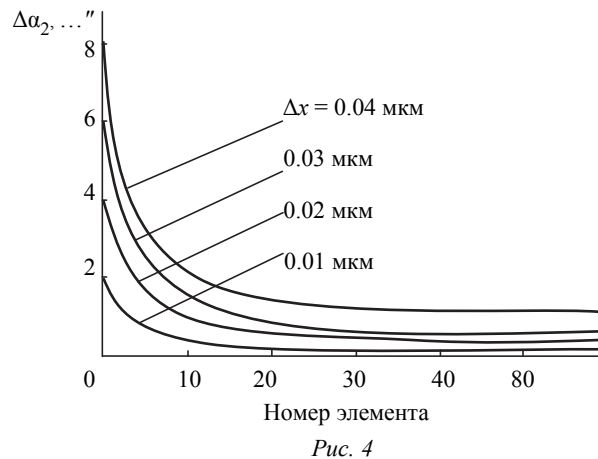
Для расчета угловой погрешности по формуле (5) необходимо знать разброс размеров фоточувствительных элементов Δa , который обусловлен, по меньшей мере, двумя причинами: сдвигом областей стопорной диффузии и разбросом параметров фотошаблонов.

Относительный сдвиг областей стопорной диффузии может быть вызван различной величиной растрыва, которая определяется в основном процессом плазмохимического травления нитрида кремния.

Возможный уход размеров фотошаблонов складывается из отклонения при их изготовлении – подтравка хрома при химико-физической обработке шаблона и погрешности позиционирования координатного стола.

Измерение разброса размеров пикселей Δa разработанного ЛФППЗ показало, что он не превышает 0.2 мкм при среднем размере пикселей $a = 12$ мкм.

На рис. 4 приведены рассчитанные с использованием соотношения (5) зависимости $\Delta \alpha_2$ от числа засвеченных пикселей n при различных значениях Δa и $d = 1$ см.



Из графиков следует, что $\Delta \alpha_2$ резко уменьшается при увеличении n , и для разработанного ЛФППЗ при $n > 20$ погрешность измерения угловой координаты из-за разброса размеров пикселей составляет менее 1".

Таким образом, проведенные исследования показали, что разработанный ЛФППЗ при измерении угловой координаты вносит погрешность не более 15".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федосеев В. И., Колосов М. П. Оптико-электронные приборы ориентации и навигации космических аппаратов. М.: Логос, 2007. 248 с.

2. Раушенбах Б. В., Токарев Е. Н. Управление ориентацией космических аппаратов. М.: Наука, 1974. 600 с.

3. Черемухин Г. С. Приборы ориентации на Солнце. М.: Техпромиздат, 1998. 342 с.

4. Пресс Ф. П. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью. М.: Радио и связь, 1991. 264 с.

5. Зворыкин В. К., Мортон Д. А. Телевидение. М.: Изд-во иностр. лит., 1956. 784 с.

6. Краснов В. Н., Сахно С. П., Тымчик Г. С. Формирователь центра тяжести видеоимпульсов // Приборы и техника эксперимента. 1987. № 6. С. 111–113.

7. Черемухин Г. С., Ракчеев Д. П. Погрешность измерения координаты энергетического центра светового

штриха из-за неодинаковой чувствительности элементов линейки ПЗС // Изв. вузов. Приборостроение. 1991. Т. 39, № 9. С. 80–83.

8. Алымов О. В. Линейный фоточувствительный прибор с переносом заряда для систем космического базирования // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2012. № 5. С. 71–76.

9. Кордонский Х. Б. Приложение теории вероятности в инженерном деле. М: Физматгиз, 1963. 436 с.

O. V. Alymov, V. A. Arutyunov, Yu. A. Bystrov
Saint-Petersburg state electrotechnical university «LETI»

ACCURACY OF ANGULAR COORDINATE MEASUREMENT WITH THE LINEAR PHOTSENSITIVE DEVICE WITH CHARGE TRANSFER

In article the question of an accuracy of angular coordinate measurement which is caused by unequal integral sensitivity of separate pixels of the developed linear photosensitive charge transfer device, and also dispersion of their sizes caused by construction and manufacturing techniques is considered.

Angular coordinate, measurement accuracy, center of mass of a light beam

УДК 533.9, 621.38

В. Т. Барченко, Д. К. Кострин, А. И. Кузьмичев
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМЕННОГО КАТОДА, ОГРАНИЧЕННОГО ПРОВОДЯЩЕЙ СТЕНКОЙ

Рассмотрены характеристики плазменного катода при помощи математической модели, учитывающей рекомбинацию заряженных частиц на стенках, вторичную ионно-электронную эмиссию стенок и плазмы, ионизационные процессы вблизи эмитирующей поверхности катода, непосредственно в эмиссионном канале сравнительно большой протяженности. Рассмотрен диапазон давлений, в нижней части характерный для источников электронов и в верхней части – для газоразрядных коммутационных приборов типа тиратронов и псевдоискровых разрядников. Анализируются условия возникновения электрического пробоя ускоряющего (анодного) промежутка и возникновения самостоятельного разряда в самом эмиссионном канале.

Плазменный катод, математическая модель, эмиссионные характеристики, пробой, разряд

Плазменные катоды наряду с термокатадами широко используются для получения потоков электронов в мощных приборах сверхвысокой частоты, технологических электронных пушках, ускорителях, газоразрядных коммутационных приборах [1]. При теоретическом анализе обычно рассматривают неограниченный плазменный катод [1], хотя в реальных конструкциях он всегда

ограничен проводящими стенками вследствие необходимости повышения газовой эффективности и электрической прочности ускоряющего анодного промежутка. Оценка влияния этих стенок даже в сильно упрощенном виде [2], [3] указывает на необходимость их учета при расчете эмиссионных характеристик плазменного катода. Данный факт также упоминается в [4], [5], где