

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маттей Г. Л., Янг Л., Джонс Е. М. Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи: в 2 т. Т. 1 / пер. с англ.; под общ. ред. Л. В. Алексеева, Ф. В. Кушнира. М.: Связь, 1971. 440 с.

2. Маттей Г. Л., Янг Л., Джонс Е. М. Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи: в 2 т. Т. 2. / пер. с англ.; под общ. ред. Л. В. Алексеева, Ф. В. Кушнира. М.: Связь, 1972. 496 с.

3. Беляев Б. А., Сержантов А. М., Лексиков А. А. Исследование коэффициентов связи полосковых ре-

зонаторов в конструкциях фильтров на подвешенной подложке // Радиотехника и электроника. 2010. Т. 55, № 12. С. 1330–1339.

4. Богачков И. В. Выбор формул для расчета основных параметров микрополосковых линий // ОНВ. 1999. № 7. С. 56–61.

5. Калькулятор индуктивности и емкости микрополосковых линий. URL: <http://radiopro.ru/calculator/list> (дата обращения 10.06.2020)

A. D. Maksimenko, B. E. Lavrenko
Saint Petersburg Electrotechnical University

MATHEMATICAL MODEL OF THE INTERACTION COUPLED MICROSTRIPS RESONATORS

Describes a mathematical model of the interaction two coupled counter-directed quarter-wave microstrip resonators. The mathematical model is based on the search of frequency-dependent coupling coefficient of interacting resonators. The merit of the mathematical model is possible to obtain an estimate of the transmission coefficient for changed topology of resonators of the interdigital filter, which cannot be obtained by circuit simulation in common software tools. The estimate of the transmission coefficient in order to determine the initial approximation of the geometric dimensions of the topology is need because the next stage after of the initial approximation is electrodynamic modeling, which consumes large computer power and time of analyzing the topology. Without the initial approximation of the geometrical dimension of the topology, one can «wander» for a long time in search of the optimum using only electrodynamic modeling.

Analog filters, coupled microstrip resonators, mathematical model, electrodynamic modeling, frequency-dependent coupling coefficient, distribution of high-frequency currents and voltages in resonators, energy stored in electric and magnetic field

УДК 520.6.05

А. Э. Дегтерев, У. А. Кузьмина, И. А. Ламкин, И. И. Михайлов,
М. М. Романович, С. А. Тарасов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Исследование влияния угла падения светового воздействия на точность координатных измерений в линейном фоточувствительном приборе с переносом заряда для систем ориентации на Солнце

Исследуется влияние угла падения светового воздействия на точность координатных измерений в линейном фоточувствительном приборе с переносом заряда (ЛФППЗ), что позволяет оценить положение энергетического центра тяжести светового штриха. Изучены возможности оптимизации основных узлов ЛФППЗ, с помощью которых можно увеличить точность и стабильность измерения угловых координат. Экспериментальная часть основана на использовании щелевого растра и приемника, функцию которого выполняет прибор с зарядовой связью линейного типа. После геометрической калибровки оптического солнечного датчика рассчитаны угол отклонения луча от Солнца, координата энергетического центра тяжести светового штриха, относительная погрешность определения центра тяжести от угла падения светового штриха с использованием различных спектральных фильтров. Результаты исследования показывают, что к увеличению точности регистрации светового штриха и временной стабильности измерения приводит использование спектральных фильтров.

Световой штрих, оптический солнечный датчик, ЛФППЗ, координата энергетического центра тяжести светового штриха, временная стабильность, светофильтры, система ориентации на Солнце

В настоящее время продолжает активно развиваться аэрокосмическая отрасль. На орбите

Земли находится большое число искусственных спутников, выполняющих различные функции,

без которых невозможно существование современной человеческой цивилизации [1].

Современные спутники оборудованы сложной системой навигации, позволяющей спутникам двигаться по заданным траекториям с заданными ориентациями. Ориентирами для систем навигации служат яркие звезды, Солнце, Земля и т. д. Основным навигационным ориентиром служит Солнце, вследствие чего все спутники оснащаются датчиками солнечной ориентации, в том числе датчиками с использованием фотоприемников на основе твердых растворов нитридов галлия и алюминия [2], [3]. Такие оптико-электронные приборы необходимы для обнаружения Солнца и формирования электрических сигналов, зависящих от направления на энергетический центр диска Солнца в связанной со спутником системе координат. Сигналы с датчиков используются бортовой системой управления спутника для поворота спутника и расчета его местоположения. В первом случае прибор называется датчиком угловой ориентации спутника, а во втором – датчиком углового положения Солнца [4].

В современных приборах солнечной ориентации активно применяются фоточувствительные приборы с переносом заряда (ФППЗ), важной особенностью которых является связь импульсного выходного сигнала с физическим местоположением отдельных фоточувствительных элементов в оптической системе датчика, что позволяет с высокой точностью определять угловое положение Солнца [4]. Крайне важным является выработка конструкторских и технологических решений для разработки линейного фоточувствительного прибора с переносом заряда, предназначенного для применения в системах ориентации на Солнце. В рамках исследований определялась зависимость точности координатных измерений от угла падения светового воздействия. Результаты исследования позволяют определить местоположение энергетического центра тяжести светового штриха.

Исследование. Схема измерения. Схема измерения основана на использовании щелевого V-образного раstra и прибора с зарядовой связью линейного типа (ПЗС-линейка). ПЗС-линейка размещается за плоской диафрагмой. Диафрагма оснащена двумя оптическими щелями, расположенными под углом друг к другу [5], [6]. Солнечное излучение проходит через оптические щели, создавая тем самым их изображения на ПЗС-линейке в виде световых штрихов (рис. 1).

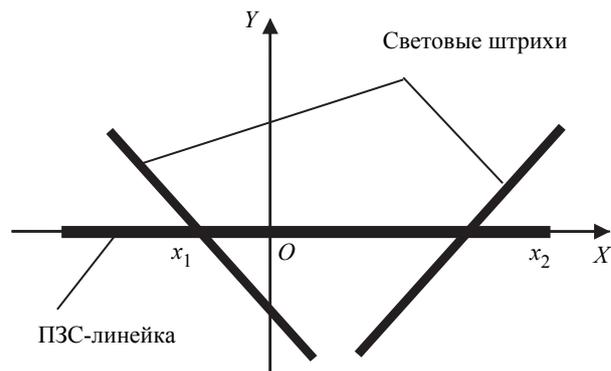


Рис. 1

Углы отклонения направления на Солнце от оси OZ в плоскости XOZ и в плоскости YOZ (α и β соответственно) характеризуются двумя точками пересечения световых штрихов с ПЗС-линейкой (x_1 и x_2). На рис. 1 ось OZ ориентирована по нормали к плоскости чертежа и соответствует нормали плоскости диафрагмы. При незначительных отклонениях существует линейная зависимость α от $x_1 + x_2$ и β от $x_1 - x_2$. Не выделяя частных эти зависимости сильно нелинейны и корреляционны. В действительности поведение этих зависимостей становится намного сложнее вследствие необходимости учета характеристик разнородных оптических сред, таких, как воздух, стекло, вакуум, на пути распространения излучения. В связи с этим в реальной обстановке оптимальным способом учета данных зависимостей является экспериментальное определение таковых на готовом устройстве [6], [7].

В состав устройства ориентации на Солнце входят: оптическая система, представляющая собой щелевой растр, в котором находятся приемник (ПЗС-линейка) и светофильтр, узел, осуществляющий предварительную обработку сигнала, и вычислитель. В узле вычислителя, оснащенного специальным программным обеспечением, реализуются следующие базовые функции обработки сигналов:

- вычленение сигнала, исходящего от Солнца, с целью исключения регистрации вероятных помех (электрических и т. д.);
- учет различия чувствительности каждой отдельной ячейки ПЗС-линейки;
- прецизионное определение координат изображения световых штрихов на приемнике;
- учет влияния положения светового штриха на приемнике на значения измеряемых углов;
- наладка работы во внешнем интерфейсе.

Оптическая система, имеющая ПЗС-линейку с двумя штрихами, определяет углы отклонения направления на Солнце от нормали в двух плоскостях. Однако такое устройство имеет недостатки, первым из которых является значительная нелинейность зависимости таких углов от положения штрихов на приемнике, вторым – относительно малая точность их определения (порядка 3') [7], [8].

Исходя из изложенного, многообещающим методом вычисления углов отклонения и, соответственно, ориентирования по Солнцу представляется метод, использующий лишь один штрих и, следовательно, один координатный угол, который позволяет достигнуть лучшей точности определения этих углов. На рис. 2 представлена схема расположения элементов солнечного датчика с одним штрихом для измерения угла между осью и направлением на Солнце.

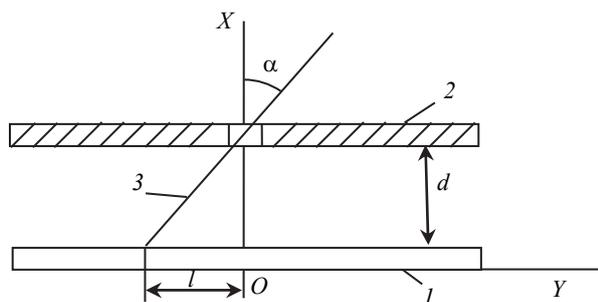


Рис. 2

Датчик включает в себя ПЗС-линейку 1 и щелевую диафрагму 2, плоскости которых параллельны и находятся на расстоянии d . Прошедший сквозь щель луч Солнца 3 падает на поверхность приемника (ПЗС-линейки), где происходит преобразование штриха соответствующей фоточувствительной ячейкой в электрический сигнал. В связи с тем, что расстояние l от этого элемента до начала координат известно, угол отклонения луча Солнца от оси X в плоскости XOY , которая связана с системой координат космического аппарата (КА), будет вычисляться по формуле

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

Три таких датчика, расположенных по координатным осям и жестко связанных с КА, с прецизионной точностью обеспечат получение данных о положении КА в пространстве [7].

Геометрическая калибровка оптического солнечного датчика (ОСД). Для того чтобы вычис-

лить направление на Солнце, нужно произвести геометрическую калибровку прибора для фиксации ряда конструктивных параметров устройства:

- азимутального угла разворота ПЗС-линейки;
- угла наклона ПЗС-линейки;
- координат середины ПЗС-линейки во внутренней системе координат xO, yO, f .

Эти параметры обязательны для того, чтобы рассчитать направление на Солнце во внутренней системе координат устройства.

Стенд геометрической калибровки и испытаний служит для определения конструкторских параметров ОСД. Первым этапом геометрической калибровки является последовательный поворот стенда на определенные углы вокруг вертикальной оси. Измерения осуществляются в диапазоне $\pm 50^\circ$ с шагом 2° . После того как с помощью контрольно-испытательной аппаратуры стенд установлен на определенный угол, координаты объектов с ОСД сохраняются в памяти компьютера.

Углы направления на Солнце, которые мог бы измерить прибор с заданными конструкторскими параметрами, определяются, исходя из результатов измерения по координатам энергетических центров изображений.

Ключевым моментом является определение точек пересечения оси ПЗС-линейки с плоскостью, которая образована направлением на Солнце и направлением щели оптического элемента [9].

Моделирование работы схемы измерения прибором ориентации на Солнце. Коллимированное излучение источника типа А проецируется посредством лабораторной оснастки, изображенной на рис. 3 (показано для угла падения, равного 0°).

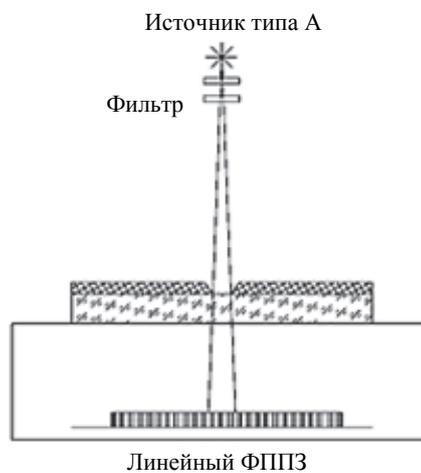


Рис. 3

Чтобы сформировать зону облучения ЛФППЗ, на поверхности входного окна располагается щелевая диафрагма (рис. 4).

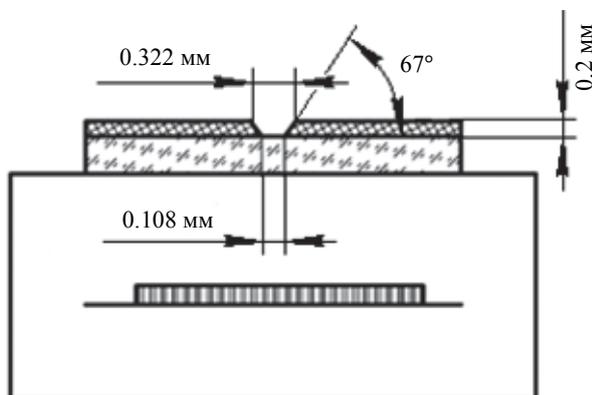


Рис. 4

Методика измерения угловых координат. Методика включает в себя набор непосредственных прямых измерений [10]. Согласно методике:

1. Устанавливаются габариты оптической схемы: расстояние от ЛФППЗ до точечного источника, на ЛФППЗ располагается диафрагма.

2. Размещается спектральный фильтр.

3. Размещается нейтральный ослабляющий фильтр.

4. Выставляются характеристики тока источника излучения типа А.

5. Выделяется диапазон изменений падения светового излучения на входное окно ЛФППЗ.

6. Устанавливается угол падения излучения согласно заданному диапазону изменений угла.

7. Регулируется излучение с ЛФППЗ посредством ЭВМ.

8. Осуществляется накопление данных для дальнейшей обработки:

- запоминается пакет сигналов от фоточувствительных ячеек ЛФППЗ в цифровом виде;

- фиксируется временная последовательность строк сигналов ЛФППЗ в количестве 50–100 с целью вычисления статистических параметров;

- вычисляется набор положений энергетических центров тяжести каждой строки изображения;

- полученный массив данных положения энергетических центров изображения усредняется, что дает возможность вычислить среднее квадратическое отклонение положения энергетических центров тяжести;

- по результатам вычислений, полученных выше, оценивается точность, с которой был определен угол падения штриха на ЛФППЗ.

Для дальнейшей обработки результатов измерений необходимо вычислить координаты энергетических центров изображений. Координата энергетического центра тяжести светового штриха $x'_{ц.т.}$ определяется соотношением [7]

$$x'_{ц.т.} = \frac{\int_0^L U(x)x dx}{\int_0^L U(x)dx},$$

где L – ширина светового штриха; $U(x)$ – функция распределения сигнала по координате x .

Координата центра тяжести $x_{ц.т.}$ в случае дискретного фоточувствительного преобразователя вычисляется следующим образом:

$$x_{ц.т.} = \frac{\sum_{i=1}^n U_i x_i}{\sum_{i=1}^n U_i}, \quad (1)$$

где U_i – значение сигнала пикселя; x_i – координата пикселя; n – число пикселей.

Центр тяжести по выражению (1) определяется с вычисляемой погрешностью $\delta x_{ц.т.}$:

$$\delta x_{ц.т.} = \frac{x_{ц.т.} - x'_{ц.т.}}{x'_{ц.т.}} = \frac{x_{ц.т.}}{x'_{ц.т.}} - 1.$$

В особом случае, когда $U(x) = U_0 = \text{const}$,

$$x'_{ц.т.} = \frac{\int_0^L U(x)x dx}{\int_0^L U(x)dx} = \frac{L}{2};$$

$$x_{ц.т.} = \frac{\sum_{i=1}^n U_i x_i}{\sum_{i=1}^n U_i} = \frac{U_0 \frac{L}{n} (1 + 2 + 3 + \dots + n)}{U_0 n} = L \frac{n+1}{2n}.$$

Тогда

$$\delta x_{ц.т.} = \frac{x_{ц.т.}}{x'_{ц.т.}} - 1 = \frac{1}{n}. \quad (2)$$

Из (2) можно сделать вывод, что относительная погрешность определения центра тяжести, вычисленная при помощи метода дискретизации, обратно пропорциональна числу дискретизаций. Следова-

тельно, ширина проекции светового пучка должна охватывать максимальное количество пикселей.

При исследовании световых процессов дифракцией Фраунгофера можно пренебречь в случае, если ширина щели, которая формирует световой штрих на фоточувствительную поверхность, больше длины волны падающего излучения λ . В данной ситуации распределение света в штрихе будет подчиняться законам геометрической оптики [7], [11]. Если принять во внимание вышеупомянутое замечание и учесть расходимость солнечного света, ширина светового штриха

$$L = l + 2d \operatorname{tg} \varphi,$$

где $\varphi = 32'$ – угол расходимости солнечного света.

Вместе с тем в пределах ширины штриха количество пикселей

$$n = \frac{l + 2d \operatorname{tg} \varphi}{a},$$

где a – размер пикселя.

Результаты измерений. Результаты измерений представлены на рис. 5–8.

На рис. 5 представлена зависимость сдвига координаты центра тяжести от угла падения светового штриха с использованием светофильтров: 1 – СЗС23, 2 – СЗС23 + ЖС11, 3 – СЗС23 + ЗС8, 4 – СЗС23 + КС10. Согласно (2) вычисляется положение энергетических центров тяжести штриха.

Линейная аппроксимация этих зависимостей показывает, что наибольшее отклонение вычисленных значений не превышает 5 %.

Вследствие того, что глубина поглощения квантов разной длины волны различна, для разных фильтров данные зависимости имеют различные углы наклона. Например, для фильтра СЗС23 поглощение подавляющего большинства квантов происходит в толще кремния, поэтому для него угол отклонения координат центров тяжести штриха больше. В этом случае, если рассматривать комбинацию фильтров СЗС23 + КС10, которые формируют более коротковолновое излучение, угол отклонения координат центров тяжести светового штриха, прошедшего через такой фильтр, будет меньше.

В эксперименте при облучении источником типа А применялись светофильтры СЗС23, ЗС8, КС10 и ЖС11. Использование таких светофильтров объясняется стремлением найти наилучшие длины волн для угловых перемещений в солнечном датчике, который работает с источником типа А в заданной геометрии расположения фоточувствительных элементов. Эта задача является принципиально важной при оптимизации конструкции аппаратуры. В настоящее время существует тенденция уменьшения габаритов систем ориентации по Солнцу до уровня субмикронных размеров. В связи с этим данное исследование становится крайне важным, поскольку оптимизация размеров осуществляется, исходя из длин волн, в которых работает данная система. Использование фильтра СЗС23 в комбинации с фильтрами ЗС8, КС10, ЖС11 обусловлено необходимостью обеспечить суженный спектральный диапазон длин волн.

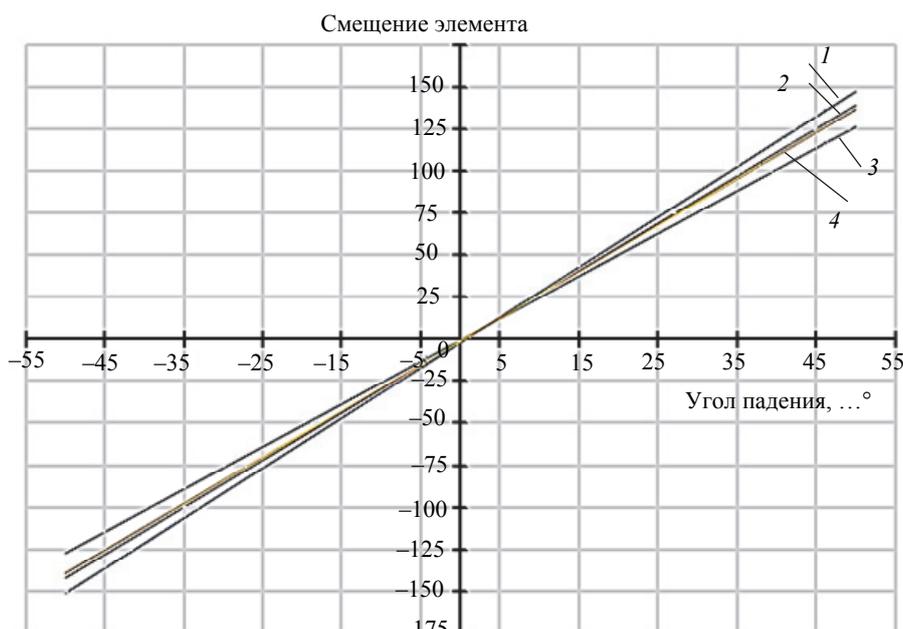


Рис. 5

Для осуществления измерения необходимо, чтобы временная стабильность сигнала соответствовала требованиям РМГ 29-2013, пункт 5.17, 7.50. Согласно этому документу в течение времени измерения сигнал должен оставаться стабильным. В ходе работы анализировалась временная стабильность сигнала для различных углов падения светового штриха ввиду того, что необходимо было непрерывно получать координаты отсчетов штриха в аппаратуре ориентирования по Солнцу. Несмотря на то, что временная стабильность сигнала ЛФППЗ в случае нормального падения светового штриха – это паспортный параметр устройства, из-за вероятного изменения характеристик области, где происходит сбор фотогенируемых носителей при различных углах падения штриха, она нуждается в дополнительном подтверждении.

На рис. 6 представлена зависимость среднеквадратического отклонения координат центра тяжести от угла падения светового штриха с использованием светофильтров: 1 – СЗС23, 2 – СЗС23 + ЖС11, 3 – СЗС23 + ЗС8, 4 – СЗС23 + КС10. Вычисленное временное среднеквадратическое отклонение (СКО) координат центра тяжести выполняло функцию критерия, характеризующего временную стабильность сигнала.

Из рис. 6 следует, что увеличение накопленного заряда приведет к росту стабильности измерений угла. В свою очередь, увеличение этого заряда достигается широким спектром излучения в области длин волн от 310 до 700 нм.

Также было замечено, что увеличение угла падения приводит к росту СКО. Данная тенденция может быть истолкована следующим образом: при изменении длины волны, сопровождающемся возникновением флуктуации носителей между фоточувствительными ячейками, изменяется область сбора фотогенированных носителей.

На рис. 7 показано распределение интенсивности светового штриха на фокальной плоскости ЛФППЗ при нормальном падении с использованием светофильтров: 1 – СЗС23, 2 – СЗС23 + ЖС11, 3 – СЗС23 + ЗС8, 4 – СЗС23 + КС10.

Из полученных зависимостей СКО следует, что большему значению накопленного заряда соответствует большая амплитуда сигнала и меньшее СКО. Для фильтра СЗС23 более широкого спектра значение СКО меньше, чем для фильтров, составляющих комбинации с СЗС23 (ЖС11, ЗС8, КС10).

На рис. 8 приведен график, иллюстрирующий зависимость СКО угловой координаты от угла падения (1 – СЗС23, 2 – СЗС23 + ЖС11, 3 – СЗС23 + ЗС8, 4 – СЗС23 + КС10).

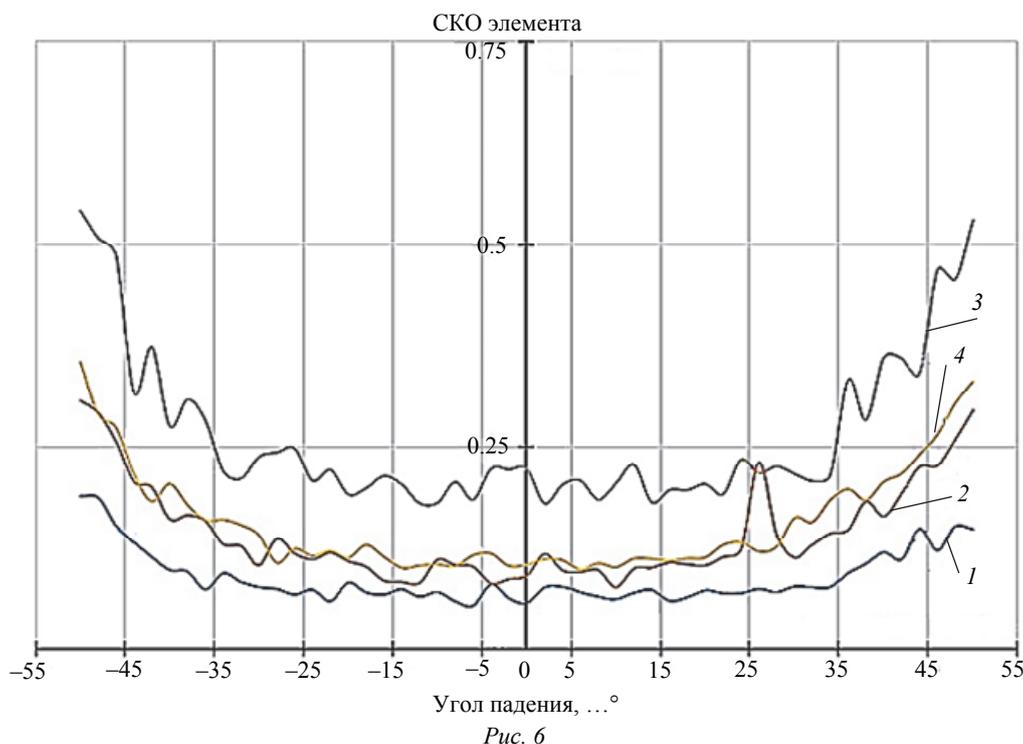


Рис. 6

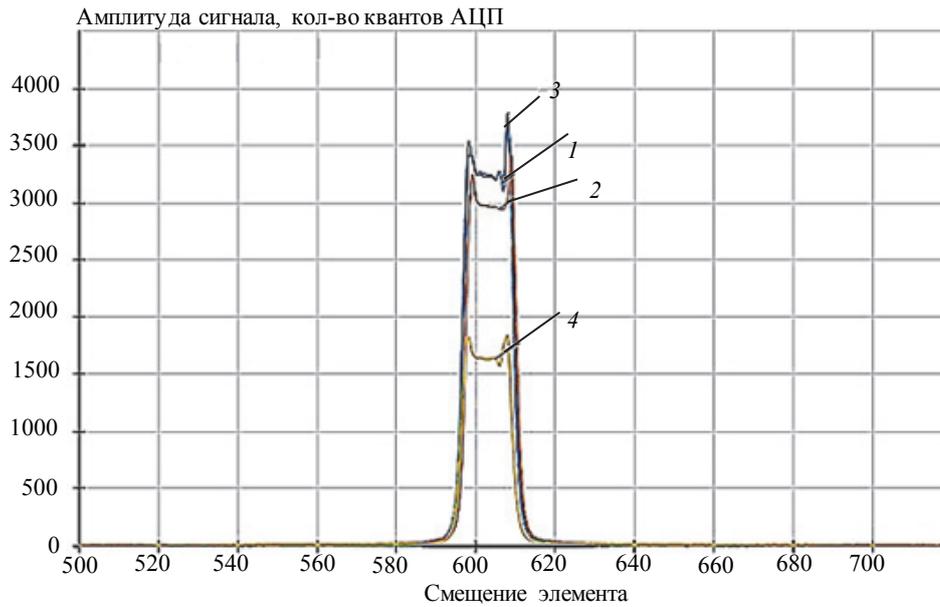


Рис. 7

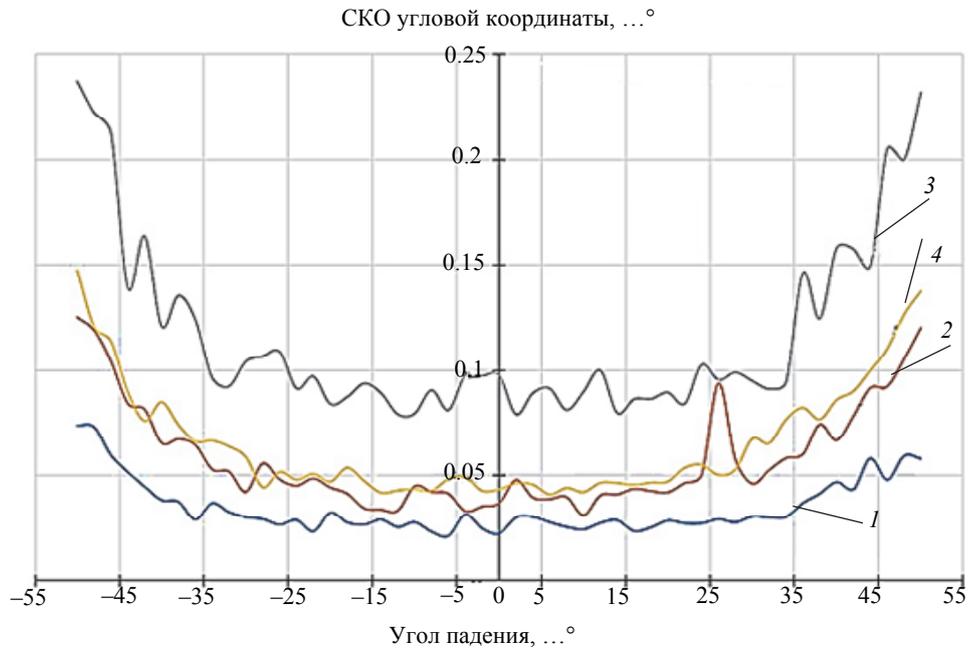


Рис. 8

Фильтр СЗС23 обеспечивает наилучшую точность, составляющую $\pm 0.038^\circ$ и $\pm 0.019^\circ$ для всего диапазона изменения углов падения $\pm 50^\circ$ и $\pm 35^\circ$ соответственно.

Таким образом, продемонстрировано, что с помощью спектральных фильтров может быть оптимизирована регистрация светового штриха в системах ориентации на Солнце. Как следует из приведенных данных (рис. 8), фильтр СЗС23

обеспечивает наилучшую точность регистрации. Также использование фильтра СЗС23 подтверждает долгосрочную временную стабильность на уровне СКО не более 0.03° и не более 0.075° для малых и предельных углов соответственно.

Работа выполнена в рамках проекта № 0788-2020-0008, являющегося частью государственного задания № 075-00306-20-01 Минобрнауки России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Furgale P., Enright J., Barfoot T. Sun Sensor Navigation for Planetary Rovers: Theory and Field Testing //

IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2011. № 47(3). P. 1631–1647.

2. Селективные ультрафиолетовые фотоприемники на основе барьера Шоттки «Металл-AlGaN» / С. А. Тарасов, И. А. Ламкин, И. И. Михайлов, А. С. Евсеенков, А. В. Соломонов // Успехи прикладной физики. 2016. № 5. С. 480–484.

3. Оптимизация параметров контактов «металл-твердые растворы AlGaN» как основы фотодетекторов для ультрафиолетового диапазона спектра / И. А. Ламкин, С. А. Тарасов, Е. А. Менькович, А. А. Петров // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2013. № 5. С. 80–84.

4. Vladov M., Ukrainev D., Nedkov R. Solar orientation sensor for microsattellites // Eighth Scientific Conf. with Intern. Participation SPACE, ECOLOGY, SAFETY, Sofia, Bulgaria, 2012. P. 1–9.

5. Алымов О. В. Линейные фоточувствительные приборы с переносом заряда для ориентации космических аппаратов по Солнцу: дис. ... канд. техн. наук. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. 155 с.

6. Кузьмин В. С., Федосеев В. И. Оптико-электронные приборы ориентации и навигации КА:

опыт разработки, проблемы и тенденции // Оптический журн. 1996. № 7. С. 4–9.

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

8. Аванесов Г. А., Никитин А. В., Форш А. А. Оптический солнечный датчик // Изв. вузов. Приборостроение. 2003. № 4. С. 70–73.

9. Дроздова Т. Ю., Катасонов И. Ю., Никитин А. В. Программно-алгоритмическое обеспечение оптического солнечного датчика // Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов: сб. докл. первой Всерос. науч.-техн. конф., Россия, 2008. Таруса, 2008. С. 91–103.

10. РМГ 29-2013 ГСИ // Метрология. Основные термины и определения. Введ. 2015-01-01. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200115154> (дата обращения 05.09.2020)

11. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория поля. М.: Наука, 1988. Т. 2. 512 с.

A. E. Degterev, U. A. Kuzmina, I. A. Lamkin, I. I. Mikhailov, M. M. Romanovich, S. A. Tarasov
Saint Petersburg Electrotechnical University

STUDY OF THE ANGLE INFLUENCE OF THE INCIDENCE LIGHT IMPACT ON THE ACCURACY OF COORDINATE MEASUREMENTS IN A LINEAR PHOTOSENSITIVE DEVICE WITH CHARGE TRANSFER FOR ORIENTATION SYSTEMS ON THE SUN

The study of the angle influence of the incidence light effect on the accuracy of coordinate measurements in a linear photosensitive device with charge transfer (LPDCT) was done. The results of which make it possible to estimate the position of the energy center of the light stroke gravity. The possibilities of optimization of the LPDCT main units have been studied, with the help of which the accuracy and stability of measuring the angular coordinates can be increased. The experimental part is based on the use of a slit raster and a receiver. The function of which is performed by a linear charge-coupled device. After geometric calibration of the optical solar sensor was done, the angle of the beam deflection from the Sun was calculated. Then the coordinate of the energy center of the light line gravity and the relative error in determining the center of gravity were estimated. The dependences of the coordinate shift and the root-mean-square deviation of the gravity center on the angle of the incidence light streak are given using various spectral filters. The results of the study show that the use of spectral filters leads to an increase in the accuracy of registration of the light streak and the temporal stability of the measurement.

Light stroke, optical solar sensor, LPDCT, the energy center of the light stroke gravity coordinate, temporal stability, light filters, solar orientation system