

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ПОГРЕШНОСТЬ ПОСТРОИТЕЛЯ МЕСТНОЙ ВЕРТИКАЛИ ТИПА 8201, УСТАНОВЛИВАЕМОГО НА КА «МЕТЕОР-М» № 2, ПРИ ПОПАДАНИИ В ЕГО ПОЛЕ ЗРЕНИЯ СОЛНЦА У ГОРИЗОНТА

Ю. М. Гандлевский, А. В. Мельников,  
Е. Н. Михайлов, А. Е. Рабовский

**Р**ассмотрена дополнительная погрешность ориентации прибора - построителя местной вертикали, при попадании в его поле зрения Солнца около горизонта. Рассмотрен случай «зари», т. е. выхода Солнца из-за горизонта до выдачи сигнала «Наличие Солнца» солнцезащитными датчиками прибора. Исследован вопрос о выборе порога срабатывания этих датчиков.

**Ключевые слова:** ИК горизонт Земли, датчики горизонта, местная вертикаль, IR horizon sensors.

При анализе телеметрии прибора ориентации по Земле – построителя местной вертикали (ПМВ) 8201-В4М, установленного на КА «Метеор-М» № 2, были обнаружены кратковременные импульсы выходных сигналов крена и тангажа амплитудой – 20' и +10' соответственно. Эти сигналы длительностью примерно 45 с выдавались с частотой орбитального вращения на нескольких витках подряд в моменты выхода КА из тени.

Предположительно это явление связано с влиянием на работу прибора эффекта «зари», связанного с нагревом Солнцем атмосферы, если оно восходит в поле обзора прибора или в непосредственной близости от него.

Солнце является очень мощным источником излучения, искажающим при попадании в поле зрения ПМВ результаты его работы. В связи с этим в приборе имеются малогабаритные датчики Солнца (ДС), поля зрения которых с запасом перекрывают участки его поля обзора («засечки») [1]; при попадании Солнца в поле любого из этих датчиков выдается сигнал НС («Наличие Солнца») и ПМВ отключается от управления. КА переходит на управление от других приборов, например, звездных датчиков или гироскопов.

### Влияние годовой прецессии орбиты КА на эффект «зари»

Очевидно, что влияние эффекта «зари» на работу прибора зависит от того, насколько близко Солнце восходит от поля обзора прибора. Для солнечно-синхронной орбиты КА «Метеор-М» № 2 Солнце при вращении КА вокруг Земли перемещается по конусу, ось которого совпадает с осью «+Y» связанной системы координат, а угол при вершине определяется углом  $\gamma$  между направлением на Солнце и бинормалью орбиты. Этот угол меняется по кривой, показанной на рис. 1 [2].

Для определения угла между направлением на Солнце у горизонта и полем обзора прибора обратимся к рис. 2.

На рис. 2 принята объектовая система координат, в которой ось  $X$  – направление полёта КА, ось  $Y$  – бинормаль орбиты, ось  $Z$  – направлена в надира, а точка  $O$  совмещена с центром КА.

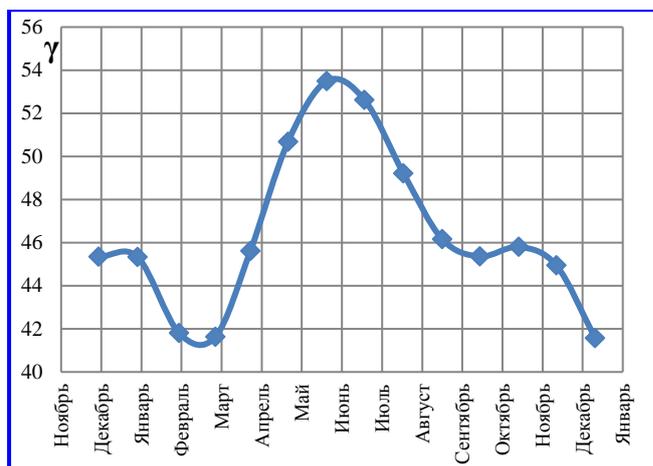


Рис. 1. Годовое изменение величины  $\gamma$

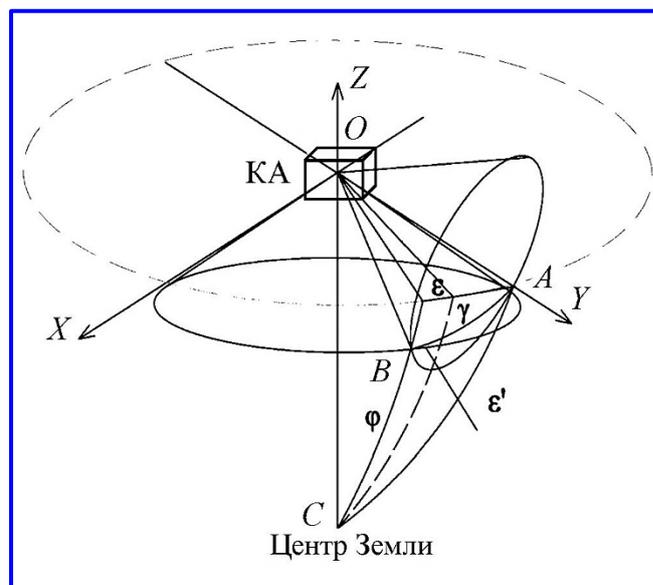


Рис. 2. Определение угла между полем зрения и Солнцем

В сферическом треугольнике ABC  $\varphi$  – угол визирования на горизонт;  $\gamma$  – угол между бинормалью орбиты и направлением на Солнце. Судя по рис. 1, минимальный угол  $\gamma$  имеет место в феврале 2018 г. и в декабре 2019 г. ( $\gamma = 41^\circ$ ). Двугранный угол  $C$  при этом равен

$$C = \arccos \frac{\cos(\gamma)}{\sin(\varphi)} = 33,5^\circ.$$

В приборе 8201-В4М приборная система координат, вдоль которой направлены участки поля обзора («засечки»), развернута относительно объектовой системы координат на угол  $27^\circ$ . Таким образом, угол  $\varepsilon$  между направлением на Солнце и центром засечки равен  $6,5^\circ$  в азимутальной плоскости XOY. Проекция этого угла на плоскость горизонта Земли  $\varepsilon' = \varepsilon \sin(\varphi) = 5,8^\circ$ . Угол между краем Солнца и краем поля зрения (размер поля зрения равен  $3^\circ$ , угловой размер Солнца равен  $0,5^\circ$ ) равен  $4^\circ$ .

Как показал анализ телеметрии прибора 8201-В4М на КА «Метеор-М» № 2 явление «зари» действительно имело место 15.02.18 г. и 21.12.18 г., на витках 18705 и 23092, когда угол  $\gamma$  был минимален.

### Расчёт части диска Солнца, выступающей из-за горизонта при срабатывании сигнала «НС»

Для оценки влияния на работу прибора части диска Солнца, выступающей из-за горизонта при срабатывании сигнала «НС», определим его геометрические и энергетические параметры.

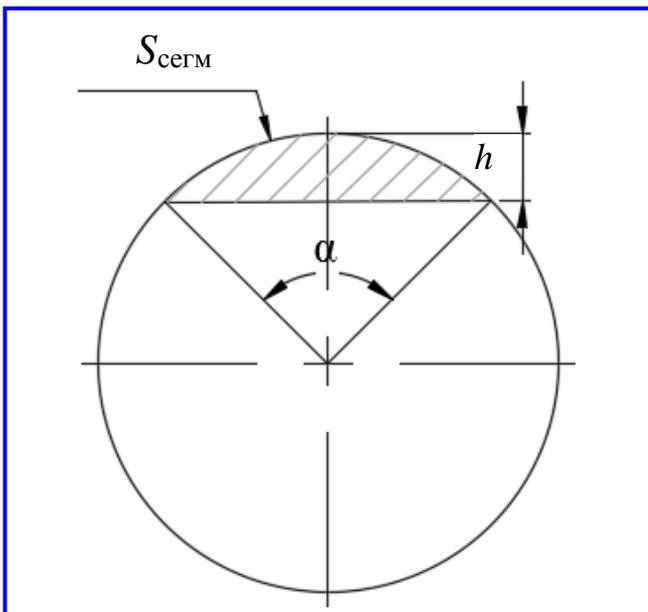


Рис. 3. Сегмент солнечного диска при сигнале ДС, равном  $I_{\text{пор}}$

Сигнал в ДС при полной засветке его Солнцем составляет  $I_{\text{макс}} \approx 500$  мкА. Порог срабатывания, установленный для ДС, составляет:

$$I_{\text{пор}} = \frac{U_{\text{пор}}}{R_{\text{н}}} = \frac{3,2 \text{ В}}{24 \text{ кОм}} = 133 \text{ мкА},$$

где  $U_{\text{пор}} = 3,2$  В – порог срабатывания схемы выдачи сигнала «НС»;  $R_{\text{н}} = 24$  кОм – сопротивление нагрузки.

Таким образом, отношение площади части диска Солнца, выступающего из-за горизонта при срабатывании сигнала «НС», к полному Солнцу, равно:

$$S' = \frac{S_{\text{сегм}}}{S_{\text{полн}}} = \frac{I_{\text{пор}}}{I_{\text{макс}}} = 0,266.$$

Определим площадь сегмента солнечного диска, выступающего за пределы твёрдой Земли при такой величине сигнала (см. рис. 3):

$$S_{\text{сегм}} = 0,5 r^2 \left( \frac{\pi \alpha}{180} - \sin \alpha \right).$$

Радиус Солнца составляет в угловой мере  $r = 16'$ .

Солнце выступает за пределы твёрдой Земли на высоту  $h$  (см. рис. 3). Центральный угол  $\alpha$  выступающей части равен:

$$\alpha = 2 \arccos \left( \frac{r-h}{r} \right).$$

Относительная величина выступающей части Солнца равна:

$$S' = \frac{S_{\text{сегм}}}{S_{\text{полн}}} = \frac{0,5 r^2 \left( \frac{\pi \alpha}{180} - \sin \alpha \right)}{\pi r^2} = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{\pi \alpha}{180} - \sin \alpha \right).$$

Зависимость относительной величины  $S'$  от высоты  $h$  выступающей части Солнца в угловых минутах приведена на рис. 4.

Учитывая коэффициент пропускания атмосферы в спектре солнечного датчика ( $\lambda \approx 1$  мкм), равный  $\tau \approx 0,85$ , получим

$$S' = \frac{S_{\text{сегм}}}{S_{\text{полн}}} \tau = 0,31.$$

Из графика рис. 4 следует, что данному соотношению соответствует величина  $h = 10,5'$ .

Поток лучистой энергии от полного Солнца с приемника излучения основного тракта ПМВ составляет  $(\Phi_c)_{\text{полн}} = 1$  мВт. Тогда поток энергии от сегмента Солнца при срабатывании сигнала НС будет равен (в основном тракте)

$$\Phi_{\text{нс}} = (\Phi_c)_{\text{полн}} \eta S' = 155 \text{ мкВт},$$

где  $\eta = 0,5$  – коэффициент использования прибором пропущенного атмосферой Земли излучения Солнца в широком ИК-диапазоне спектра. Поток лучистой энергии от Земли средней яркости  $(\Phi_3)_{\text{ср}} = 12$  мкВт. Таким образом поток от сегмента Солнца у горизонта («зари») в 13 раз выше потока от Земли средней яркости.

### Определение модели излучения Солнца у горизонта

Картина излучения Солнца вблизи горизонта в широкой инфракрасной области спектра рассмотрена в работе [3].

Из рис. 5 видно, что Солнце вызывает свечение атмосферы, даже находясь за твердым горизонтом, видимо за счет нагрева верхних слоев атмосферы. Поэтому лучистый поток из-за излучения атмосферы при выходе сегмента солнечного диска из-за горизонта возрастает по всему фронту прохождения поля и достигает максимума при прохождении полем самого сегмента Солнца (величиной  $h = 10,5$  угл. мин.).

На рис. 6 показана модель энергетической яркости горизонта при средней лучистости Земли (пунктир) и при выходе сегмента солнечного диска из-за горизонта (сплошная линия).

Приняв сигнал от Земли средней яркости за 1 (модель А), получим, что величина сигнала от сегмента Солнца у горизонта будет равна 13 (см. выше).

Модель А, принятая при энергетических расчетах ПМВ (показана на рис. 6 пунктиром), подразумевает линейное нарастание сигнала от 0 до 1 отн. ед. при высотах атмосферы от 40 км до 0 (твёрдый горизонт). Модель излучения «зари» характеризуется излучением величиной 13 отн. ед. при высотах от 0 до 10 км (для высоты полёта 800 км 10 км соответствует примерно 10 угл. мин.). Поскольку атмосфера нагревается излучением Солнца, принимаем, что её яркость линейно нарастает от 0 при высоте 40 км до 13 отн. ед. при высоте 10 км, где виден сегмент Солнца через атмосферу. При отрицательных высотах сигнал соответствует максимальному излучению Земли средней яркости.

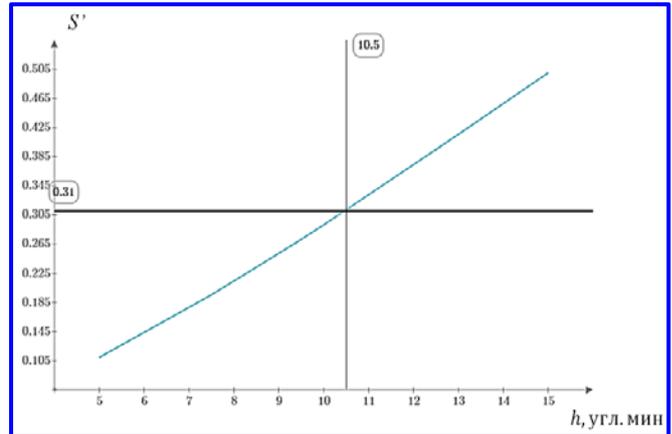


Рис. 4. Зависимость  $S'$  от  $h$

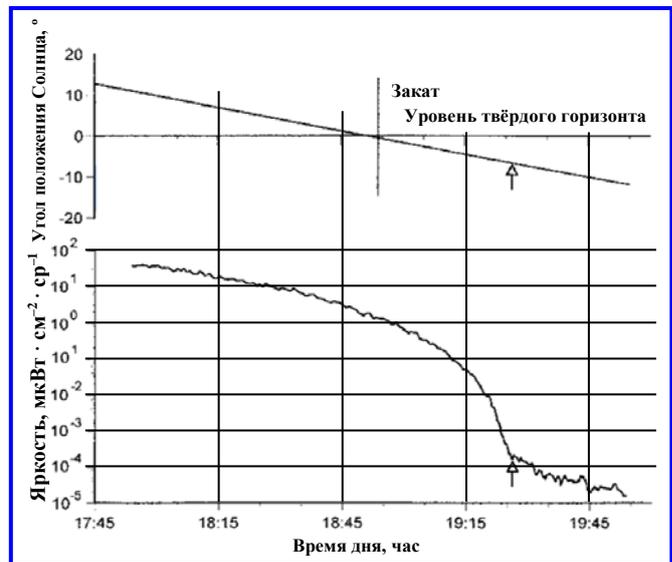


Рис. 5. Лучистость атмосферы в зависимости от положения Солнца

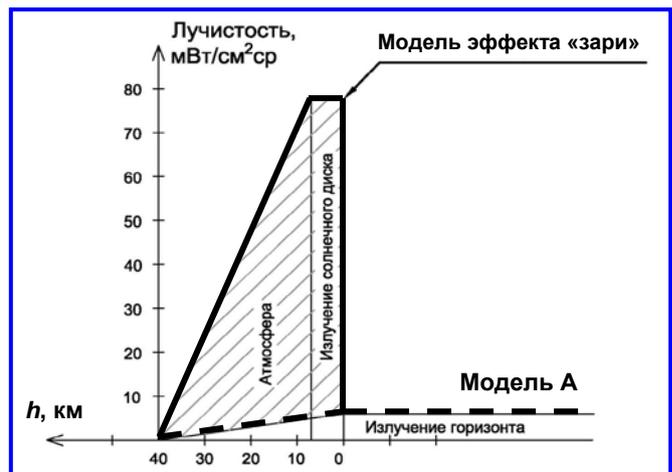


Рис. 6. Модель горизонта Земли

Расчёт выходного сигнала в основном тракте прибора для модели А и модели с сегментом Солнца, выступающим из-за горизонта на  $10,5'$  (см. рис. 6)

производился по программе математического моделирования, приведённой в [4]. Результаты расчёта по этой модели выходного сигнала  $U_{\text{вых}}$  в зависимости от угла сканирования  $\theta$  при пересечении полем зрения горизонта Земли представлены на рис. 7.

Как видно из рис. 7, сигнал  $U_{\text{вых}}$  с сегментом Солнца выше рассчитанного по модели А в  $\approx 3$  раза. Уровень первого порога прибора составляет  $U_{\text{п1}} = 1/3 U_{\text{мин}} = 1/3 U_{\text{ср}} \frac{6}{2,5} = 0,8$  отн. ед. Оперение импульса с сегментом Солнца относительно стандартного (по модели А) по этому уровню составляет примерно  $1^\circ$ .

### Оценка влияния Солнца у горизонта на последующий импульс

Для оценки влияния импульса, приведенного на рис. 7, на работу электронного тракта прибора, обратимся к инструкции [5], в соответствии с которой

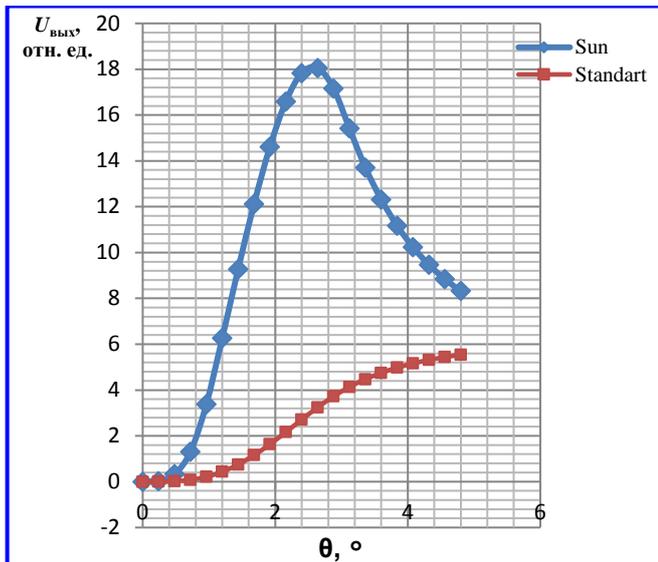


Рис. 7. Результаты расчёта выходного сигнала

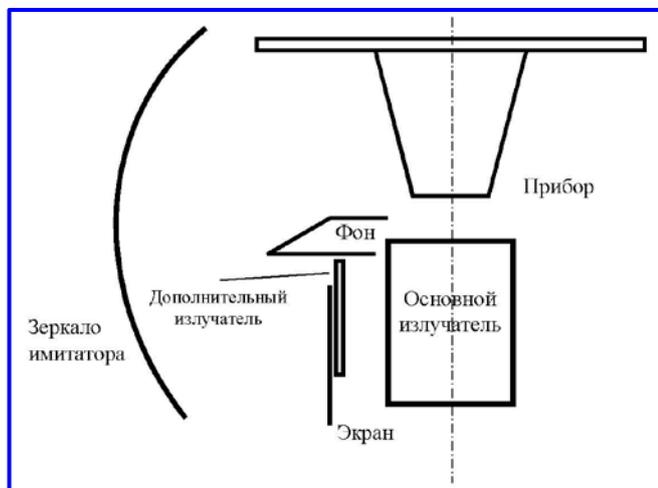


Рис. 8. Схема лабораторной установки

юстируется объектив ПМВ типа 8201. В ходе юстировки производится регулировка частотной характеристики электронного тракта прибора. Для этого используется абсолютно-черное тело (АЧТ) с температурой  $1100^\circ\text{C}$  и модулятор, позволяющий получить при частоте 20 Гц один импульс за период длительностью 12,5 мс, что соответствует ситуации с засветкой Солнцем одной из засечек прибора. Амплитуда сигнала в  $\approx 7$  раз выше сигнала от Земли средней яркости. С помощью подборных конденсаторов настраивают частотную характеристику электронного тракта так, чтобы величина затухания импульсов не превышала  $\Delta_n < 0,1$  В, что составляет 10% от уровня 1-го порога в этой точке тракта.

Поскольку амплитуда сигнала от сегмента солнечного диска в 13 раз выше сигнала от Земли средней яркости, то можно предположить, что пропорционально увеличится и уровень затухания, то есть  $\Delta_n$  составит 20% от уровня порога. В худшем случае, при минимальной яркости Земли, уровень 1-го порога составляет 1/3 от величины поля зрения, т. е. примерно  $1^\circ$ . Итак, помеховый сигнал от «зари» составит не более 20% от этого уровня, что соответствует сдвигу фронта сигнала для соседней засечки на 12'.

### Описание экспериментального исследования явления «зари»

Эксперимент по исследованию явления «зари» был проведён на имитационном оборудовании предприятия с использованием прибора ПМВ типа 8201. Прибор был установлен на имитатор излучения Земли 8201-И со следующими параметрами:

- отклонение по обоим каналам равны 0;
- питание излучателя  $U = 35$  В;  $I = 0,7$  А;
- ток контраста в установившемся режиме равен  $J = 62$  мкА.

Для имитации явления «зари» в поле обзора прибора вводился дополнительный излучатель – тепловая панель, температура которой регулировалась путём изменения подаваемого на неё напряжения питания. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 8.

Первоначально на дополнительный излучатель было подано такое питание, чтобы сигнал от засвечиваемой им засечки сравнивался с сигналами от остальных засечек (см. рис. 9).

При этом напряжение питания  $U_{\text{доп}} = 2,2$  В; ток  $I = 0,38$  А; мощность на дополнительном излучателе ( $W_{\text{доп}}$ )  $= U_{\text{доп}} I_{\text{доп}} = 0,836$  Вт.

На экране осциллографа:

- канал 1 – импульс А (синхронизирующий);
- канал 2 – импульсы R (границы измерения для 4-х засечек);

канал 3 – импульсы Ga (срабатывание по 1-му порогу, а время G между передними фронтами импульсов R и Ga определяет углы отклонения по крену и тангажу);

канал 4 – сигналы с болометра  $U_{сб}$ .

Амплитуда сигналов с болометра на рис. 9 равна примерно  $(U_{сб})_{\max} = 2,2$  В. Из сравнения сигналов на каналах 3 и 4 видно, что срабатывание импульсов Ga имеет место при сигнале  $U_{сб} \approx U_{п1} = 0,7$  В, т. е. амплитуда сигнала примерно равна  $(U_{сб})_{\max} = 3U_{п1}$ . Это означает, что при условиях нагрева имитатора и дополнительного излучателя, соответствующих рис. 9, сигнал  $U_{сб}$  соответствует минимальной яркости Земли.

При нагреве дополнительного излучателя до яркости, соответствующей трем средним яркостям Земли (как показано на рис. 7), получим картину рис. 10.

Мощность дополнительного излучателя должна быть равна  $W_{\max} = (W_{\text{доп}})1 \cdot 3 \cdot \frac{6}{2,5} = 6$  Вт. На излучатель подавалось напряжение  $U_{\text{доп}} = 5,9$  В при токе  $I_{\text{доп}} = 1,03$  А.

Из рис. 10 видно, что при такой яркости дополнительного излучателя сигнал от него искажается только в засвеченной 4-й засечке (перед синхронизирующим импульсом A). Замеренные величины G (между передними фронтами импульсов R и Ga) равны:

$$G1 = 2,8 \text{ мс}; G2 = 2,68 \text{ мс}; \\ G3 = 2,8 \text{ мс}; G4 = 1,48 \text{ мс}.$$

Результирующая погрешность измерения угла  $\beta$  будет равна:

$$\beta = \frac{G2 - G4}{2} V_{\text{рад}} = \frac{2,68 - 1,48}{2} 2,46 = 1,47^\circ,$$

где  $V_{\text{рад}} = 2,46$  %/мс – радиальная скорость сканирования в приборах типа 8201.

Таким образом, имитация явления «зари» показывает, что в худшем случае, при выходе Солнца из-за горизонта непосредственно в поле зрения до выдачи датчиком Солнца сигнала НС погрешность измерения угла отклонения не превышает  $1,5^\circ$ ; при этом сигнал НЗ («Наличие Земли») не пропадает и прибор продолжает работать в точном режиме.

### Выбор порога срабатывания датчиков Солнца

Как показано в предыдущей главе, влияние явления «зари» на погрешность прибора зависит от сигнала выходящего из-за горизонта (до срабатывания ДС) сегмента солнечного диска, и следовательно её можно снизить путём снижения величины порога срабатывания СД.

Величина порога срабатывания СД выбирается исходя из условия его превышения сигнала от отраженного поверхностью Земли излучения Солнца.

Величина потока излучения на входе приемника СД при засветке всего его поля зрения отраженным излучением Солнца равна:

$$\Phi_A = B_A S_{\text{Фд}} \eta \Omega_{\text{СД}},$$

где  $B_A = B_S A \frac{\Omega_S}{\pi}$  – энергетическая яркость отра-

жённого поверхностью Земли излучения Солнца;  $B_S$  – энергетическая яркость Солнца;  $A = 0,7$  [6] – наибольшая величина альбедо поверхности Земли в спектре работы СД (около 1 мкм);  $\Omega_S$  – телесный угол Солнца;  $S_{\text{Фд}}$  – площадь чувствительной площадки приемника СД (фотодиода);  $\eta$  – коэффициент использования СД излучения Солнца (как прямого, так и отражённого);  $\Omega_{\text{СД}} = 38^\circ \cdot 8^\circ / 57,3^2 = 0,093$  ср – телесный угол поля зрения СД.

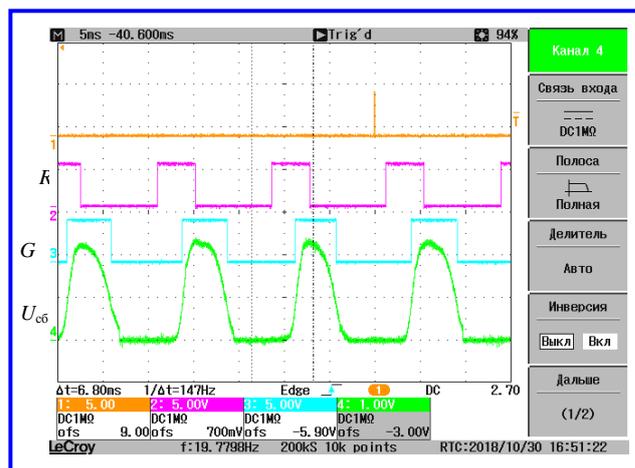


Рис. 9. Исходная картина при отключённом дополнительном нагревателе

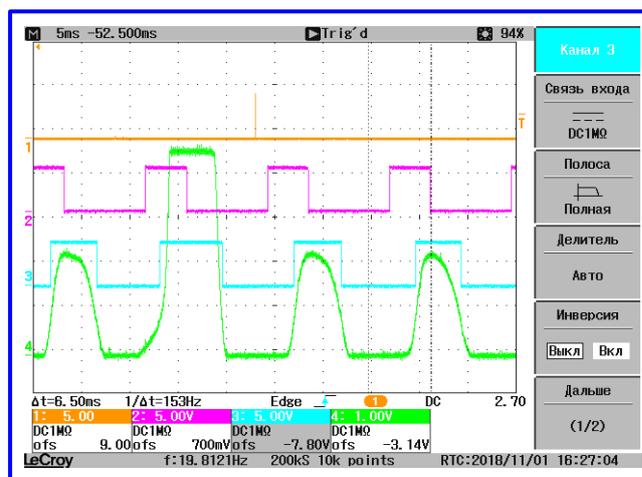


Рис. 10. Картина на экране осциллографа при мощности питания дополнительного излучателя  $W_{\text{доп}} = 6$  Вт

Величина потока излучения на входе приёмника СД при засветке его прямым излучением Солнца равна:

$$\Phi_S = B_S S_{\text{Фд}} \eta \Omega_S.$$

Относительная величина потока отраженного излучения относительно прямого излучения Солнца равна:

$$\Phi' = \frac{\Phi_a}{\Phi_S} = \frac{A\Omega_{\text{сд}}}{\pi} = 0,02.$$

Как показано в разделе 2 порог срабатывания СД выбран равным 0,266 от полного Солнца, т. е. запас относительно отраженного Землей излучения Солнца более 10. Если снизить порог срабатывания в 2 раза, запас останется достаточный, а срабатывание сигнала НС будет происходить при меньшем выходе Солнца из-за горизонта (около 6,5') и погрешность прибора существенно уменьшится.

#### Заключение

Из анализа данных телеметрии ПМВ типа 8201, установленного на КА «Метеор-М», были обнаружены погрешности ориентации КА на местную вертикаль в моменты выхода КА на освещенную сторону, идентифицированные как результат влияния «зари» на работу ПМВ.

Найдена зависимость угла между направлением на Солнце и бинормалью орбиты КА и определена временная зона влияния эффекта «зари» на работу ПМВ.

Разработана математическая модель, позволяющая определить величину погрешности прибора из-за влияния явления «зари», которая не превышает 1,5°; при этом продолжает выдаваться сигнал НЗ («Наличие Земли»).

На имитационной аппаратуре АО «Корпорация «ВНИИЭМ» проведена экспериментальная проверка влияния явления «зари» на работу прибора.

Полученный результат позволяет провести качественную оценку величины возникающей при этом погрешности.

В инструкцию по юстировке узла объектива прибора введена операция, позволяющая снизить влияние эффекта «зари» на работу прибора.

Произведена оценка величины порогового сигнала солнечного датчика, используемого для защиты прибора от Солнца, и рекомендовано снижение этого порога для уменьшения влияния эффекта «зари» на его работу.

Необходимо отметить, что данное явление имеет кратковременный характер. При скорости орбитального движения КА 4°/мин и размере солнечного сегмента в 10' эффект от него будет регистрироваться в течение 2,5 сек полётного времени и не вызовет существенного изменения ориентации КА.

#### Литература

1. Гандлевский Ю. М. [и др.] Устройство ориентации по Земле для низкоорбитального космического аппарата. – Авторская заявка 2017130874/11(053819). – 2018.
2. КА «Метеор». Инструкция по подготовке исходных данных по управлению в полете, ИЭ-62 : часть 1. – АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2014.
3. Newton R., Qayum H., Klimley A., Richert J. Broad-band versus narrow band irradiance for estimating latitude by archival tags // Marine Biology. – 151(2). – April 2007. – Pp. 467 – 481.
4. Ю. М. Гандлевский, Е. Н. Михайлов, Ю. С. Мосолова, А. Е. Рабовский Оценка точности инфракрасных построителей местной вертикали по результатам летных испытаний // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М. : ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ». – Т. 141. – № 4. – 2014. – С. 31 – 38.
5. Объектив. Инструкция по юстировке. ТАИК.402128.013 И1. – АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2017.
6. Куликов К. А., Сидоренков Н. С. Планета Земля / К. А. Куликов, Н. С. Сидоренков. – 2-е изд., доп. – М. : Наука, 1977. – 192 с.

Поступила в редакцию 11.04.2019

**Юрий Моисеевич Гандлевский**, ведущий инженер-конструктор.  
**Александр Викторович Мельников**, инженер 1-й категории, e-mail: melni-kov20082009@yandex.ru.  
**Евгений Николаевич Михайлов**, главный конструктор направления.  
**Александр Ефимович Рабовский**, старший научный сотрудник, e-mail: Raskiy@mail.ru.  
 Т. (495) 366-33-92.  
 (АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

## ADDITIONAL ERROR OF LOCAL VERTICAL SENSOR OF 8201 TYPE INSTALLED ON METEOR-M № 2 IN CASE OF SUN ENTERING ITS FIELD OF VIEW NEAR THE HORIZON

Iu. M. Gandlevskii, A. V. Melnikov,  
E. N. Mikhailov, A. E. Rabovskii

**An additional error of local vertical sensor orientation in case of sun entering its field of view near the horizon is considered in the article. The 'dawn' event, i.e. the sun rising above the horizon before the 'Presence of sun' signal is generated by the sun protection sensors of the device, is analyzed. The issue of choosing an activation threshold of these sensors is studied.**

**Key words:** IR Earth horizon, horizon sensors, local vertical, IR horizon sensors.

### References

1. Gandlevskii Iu. M. [et al.] Earth pointing device for low-orbit spacecraft. – Inventor's application 2017130874/11(053819). – 2018.
2. Meteor. Instruction on preparation of in-flight control source data, IE-62 : part 1. – 'VNIIEM Corporation' JC, 2014.
3. Newton R., Qayum H., Klimley A., Richert J. Broad-band versus narrow band irradiance for estimating latitude by archival tags // Marine Biology. – 151(2). – April 2007. – Pp. 467 – 481.
4. Gandlevskii Iu. M., Mikhailov E. N., Mosolova Iu. S., Rabovskii A. E. Assessment of infrared local vertical sensors based on flight test results // Matters of Electromechanics. VNIIEM Proceedings. – M. : 'VNIIEM Corporation' JSC. – Vol. 141. – No. 4. – 2014. – Pp. 31 – 38.
5. Lens system. Alignment instruction. ТАИК.402128.013 И1. – 'VNIIEM Corporation' JC, 2017.
6. Kulikov K. A., Sidorenkov N. S. Planet Earth / K. A. Kulikov, N. S. Sidorenkov. – 2<sup>nd</sup> edition, enlarged. – M. : Science, 1977. – 192 p.

*Iurii Moiseevich Gandlevskii, Leading Design Engineer.*

*Aleksandr Viktorovich Melnikov, 1<sup>st</sup> Category Engineer, e-mail: melni-kov20082009@yandex.ru.*

*Evgenii Nikolaevich Mikhailov, Chief Designer.*

*Aleksandr Efimovich Rabovskii, Senior Researcher,*

*e-mail: Raskiy@mail.ru, tel.: +7 (495) 366-33-92.*

*(JC «VNIIEM Corporation»).*