

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ИНФРАКРАСНЫХ ПОСТРОИТЕЛЕЙ МЕСТНОЙ ВЕРТИКАЛИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЛЁТНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Ю.М. Гандлевский, Е.Н. Михайлов
Ю.С. Мосолова, А.Е. Рабовский
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

Приведены результаты теоретического анализа и экспериментального исследования методической погрешности построителя местной вертикали по результатам ЛКИ КА «Кондор» и «Метеор-М» № 2.
Ключевые слова: построитель местной вертикали, ИК-излучение Земли.

Инфракрасные построители местной вертикали (ПМВ) производства ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ» представляют собой малогабаритные прецизионные оптико-электронные приборы с секущим сканированием ИК-горизонта Земли. Малое мгновенное поле зрения внутри прибора вращается по конусу, который преобразуется системой зеркал в 4 радиальные за-сечки ИК-горизонта. Рабочий диапазон спектра ограничен полосой 6 – 20 мкм. Инструментальная точность прибора обеспечивается прецизионной имитационной аппаратурой и не превышает 3 угл. мин. Она паспортизируется с точностью до 1 угл. мин.

Источником методической погрешности приборов ПМВ является отличие рабочего источника – Земли – от идеальной равнояркой сферы. Рассматриваются следующие составляющие методической погрешности:

- несферичность планеты;
- широтные и сезонные систематические вариации яркости ИК-горизонта Земли;
- случайные метеорологические (погодные) вариации яркости;
- случайные вариации высоты излучающего слоя атмосферы.

Теоретическая оценка методической погрешности ПМВ

Погрешность за счёт несферичности Земли

Земля имеет форму, достаточно точно аппроксимируемую эллипсоидом GRS80 со средним радиусом $R=6371$ км, минимальным радиусом (полярный) $R_{п}=6357$ км, максимальным радиусом (экваториальный) $R_{э}=6378$ км.

Погрешность прибора в определении направления на центр планеты носит чисто геометрический характер и вполне определяется высотой полёта

КА и наклоном орбиты. Расчёт производился для КА «Кондор», на котором установлен прибор ПМВ 8201-В4. Высота орбиты КА 500 км, наклонение $74,5^\circ$. Креновая и тангажная составляющие этой погрешности приведены в табл. 1 для $\frac{1}{4}$ полного витка орбиты (орбитальные углы от 0 до 90°). Как видно из табл. 1, креновая составляющая меняется в пределах ± 5 угл. мин с частотой орбитального вращения КА; тангажная составляющая меняется в пределах ± 9 угл. мин с двойной орбитальной частотой.

Оценка погрешности за счёт вариации яркости Земли

Математическое моделирование работы прибора. Остальные составляющие методической погрешности зависят как от вариаций энергетических и геометрических параметров Земли, так и от характеристик прибора.

Для оценки их величины была разработана математическая модель работы прибора.

Модель заключается в дискретном сканировании мгновенным полем зрения через ИК-горизонт Земли и вычислении выходных сигналов прибора с учётом его параметров.

Форма зависимости излучения ИК-горизонта от угла визирования приведена в [1] и показана на рис. 1.

Яркость ИК-горизонта Земли может варьироваться в широком диапазоне; в соответствии с [1] она меняется от $L_{min}=2,5$ мВт/см²·ср (зимняя Антарктида) до $L_{max}=10$ мВт/см²·ср (сухие субтропики летом).

Для компенсации вариаций энергетической яркости в ПМВ предусмотрен метод защиты, основанный на измерении крутизны переднего фронта рабочего импульса и использовании поправок, зафиксированных в памяти прибора. Поэтому, строго говоря, полная компенсация возможна, только если форма импульсов соответствует имитируемой на поверочной аппаратуре, на которой и снята таблица поправок, внесённая в память прибора.

Таблица 1

| Орбитальный угол V , град | Меридианная составляющая $(\Delta B_{исф})_м$, угл. мин | Тангажная составляющая $(\Delta B_{исф})_т$, угл. мин | Креновая составляющая $(\Delta B_{исф})_к$, угл. мин |
|-----------------------------|--|--|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 4,7 | 4,6 | -1,3 |
| 30 | 8,3 | 7,9 | -2,4 |
| 45 | 9,7 | 9,1 | -3,4 |
| 60 | 8,9 | 7,9 | -4,2 |
| 75 | 6,9 | 4,5 | -4,7 |
| 90 | 4,9 | 0 | -4,9 |

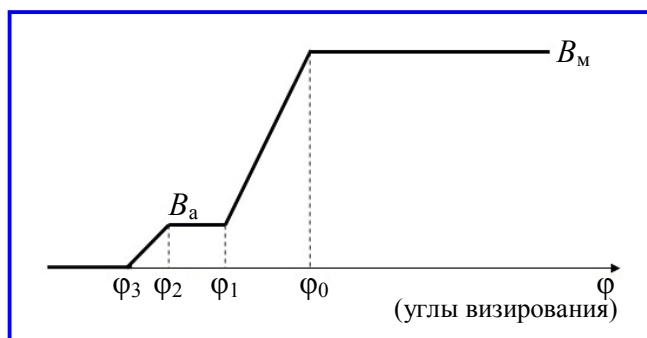


Рис. 1. Профиль излучения ИК-горизонта

Излучение в диапазоне углов визирования $(\varphi_0 - \varphi_1)$ определяется в основном окном прозрачности атмосферы (8 – 14 мкм); оно существенно варьируется по мощности и высоте излучающего слоя. Излучение B_a в диапазоне углов $(\varphi_1 - \varphi_3)$ определяется слоем CO_2 , который окутывает всю Землю на высоте ≈ 60 км и меняется очень незначительно как по яркости, так и по высоте излучающего слоя.

Яркость излучения ИК-горизонта B_m определяется в о. е., где 1 соответствует минимальной яркости $J=L_{min}=2,5$ мВт/см²·ср, а B_m изменяется от 1 до 4.

В соответствии с [1] принимаем $B_a=0,3J$.

Программа математического моделирования

Расчёт производится для двух противоположных засечек горизонта с номерами $f=0; 1$.

Сканирование производится дискретно по v точкам; v меняется от 0 до 2000. Скан начинается с угла $\theta_0=\varphi_3+\gamma$, где $2\gamma=2,2^\circ$ – угол мгновенного поля зрения прибора.

Шаг сканирования по времени $dt=0,01$ мс, по углу $d\theta=dtW_{ск}$, где $W_{ск}=2,46$ град/мс – радиальная скорость сканирования в ПМВ.

Текущее время сканирования $t_v=dt \cdot v$.

Текущий угол сканирования $\theta_v=t_v W_{ск}$, где $W_{ск}$ – скорость сканирования в ПМВ.

Производится «свёртка» профиля ИК-горизонта полем зрения прибора, для чего в определённой точке сканирования суммируются в пределах всего

поля произведения функции чувствительности поля зрения и яркости ИК-горизонта для рассматриваемого участка поля.

Таким образом определяется энергия, воспринятая приёмником от всего поля зрения для двух последовательных точек сканирования; разность энергии для этих точек даёт приращение энергии dU на входе приёмника за один шаг суммирования.

Величина сигнала на выходе инерциального звена для j -й точки суммирования определяется по формуле Дюамеля:

$$U_{in}=dU(1-\exp(-(t_v-t_j)/T_p)),$$

где T_p – постоянная времени приёмника и электронного тракта; t_v – текущее время сканирования; t_j – момент суммирования, j – переменная суммирования, $j=0 \dots v$.

Сигнал, накопленный на выходе инерциального звена от 0 до v -й точки сканирования, определяется как сумма экспонент от начала сканирования до конечной точки с индексом v .

Далее определяются моменты времени, для которых выходной сигнал $U_{out}>J(k)$, где $J(k)$ – пороги срабатывания для двух компараторов прибора, $k=1$ и 2. Величины порогов определены относительно минимальной яркости ИК-горизонта J . Принято для $k=1$ $J(1)=0,33J$, для $k=2$ $J(2)=0,67J$. Линейной интерполяцией находятся моменты времени $t(k)$, соответствующие срабатываниям компараторов прибора по 1 и 2 порогам.

Для двух противоположных засечек ($f=1; 2$) определяются углы срабатывания $G_{am}(f)$, определяющие угол отклонения оси прибора от местной вертикали по одной из осей, и разностные углы $Del(f)$, определяющие крутизну выходного сигнала $U_{out}(t)$ (и, следовательно, яркость ИК-горизонта в точке его пересечения):

$$G_{am}(f)=t(1)W_{ск} \cdot 60 \text{ (угл. мин)},$$

$$Del(f)=(t(2) - t(1))W_{ск} \cdot 60 \text{ (угл. мин)}.$$

Используя рассчитанные для f засечки углы $Del(f)$, обращаемся к таблице поправок $POP=F(Del)$ и линейной интерполяцией находим поправки, соответствующие замеренной яркости ИК-горизонта для данной засечки.

Откорректированные по яркости углы

$$Gam'(f) = Gam(f) - POP(f).$$

Величина погрешности прибора без учёта поправок

$$\beta = 0,5(Gam(1) - Gam(2)).$$

Погрешность прибора с учётом поправки

$$\beta' = 0,5(Gam'(1) - Gam'(2)).$$

В описанной программе математического моделирования могут использоваться различные модели изменения яркости Земли для противоположащих участков ИК-горизонта. Для оценки эффективности использованной в приборе системы коррекции вариаций яркости ИК-горизонта использована ступенчатая модель А, показанная на рис. 2.

Исходные данные расчёта и его результаты приведены в табл. 2.

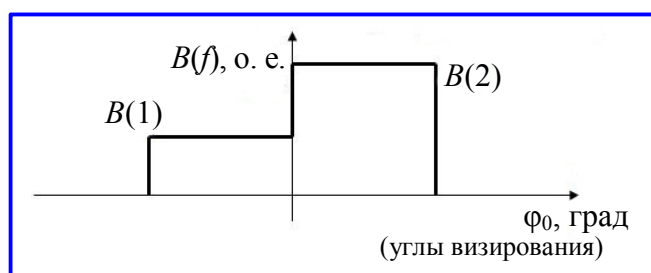


Рис. 2. Модель А излучения Земли

Таблица 2

| $B(1)$, о.е. | $B(2)$, о.е. | $L(1)$, мВт/см ² ·ср | $L(2)$, мВт/см ² ·ср | β , угл. мин | β' , угл. мин |
|------------------|------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|------------------------|
| 1 | 2 | 2,5 | 5 | 22,7 | 0,1 |
| 1 | 3 | 2,5 | 7,5 | 32 | 0,14 |
| 1 | 4 | 2,5 | 10 | 37,4 | 0,8 |
| 2 | 4 | 5 | 10 | 14,7 | 0,66 |

Рассмотрение результатов расчёта в табл. 2 показывает:

- величина погрешности из-за вариаций яркости ИК-горизонта без учёта поправки существенна и для максимального перепада яркостей (1:4) достигает ≈ 40 угл. мин;

- используемая в приборе компенсация вариаций яркости достаточно эффективна; при правиль-

ном подборе кривой поправок для модели А остаточная погрешность не превышает 1 угл. мин.

Систематическая погрешность за счёт широтных и сезонных вариаций яркости Земли

Широтно-сезонные вариации яркости Земли показаны на рис. 3 [1].

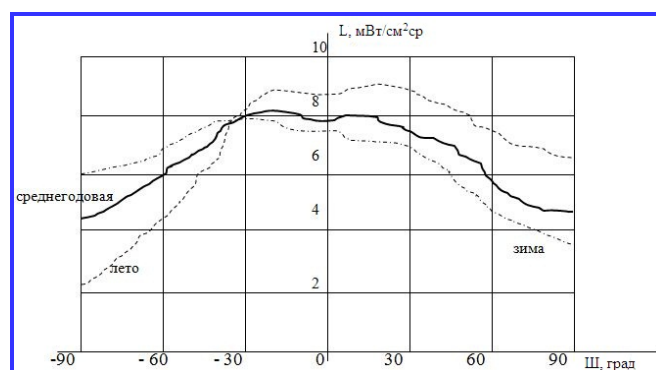


Рис. 3. Широтно-сезонные вариации яркости Земли

Широтная погрешность прибора возникает из-за того, что, в отличие от модели А, в основном соответствующей имитационной аппаратуре, на которой настраивается прибор, яркость внутри Земли линейно изменяется в соответствии с моделью В.

Максимальный градиент яркости в пределах угла визирования имеет место летом в южном полушарии при широте подспутниковой точки 45° ю. ш. В этом случае абсолютные яркости для двух противоположащих засечек равны (из рис. 3): $L(1)=4$ мВт/см²·ср; $L(2)=8,75$ мВт/см²·ср. Яркости (относительно минимальной яркости $J=2,5$ мВт/см²·ср): $B_M(1)=1,6$ о. е.; $B_M(2)=3,5$ о. е. Средняя яркость $B_{до}=2,6$ (для подспутниковой точки КА).

Далее аналогично предыдущей программе производится цикл расчёта для противоположащих засечек ИК-горизонта, для $f=1$ и $f=2$.

Знак градиента яркости в соответствии с рис. 4 противоположен при сканировании с противоположных сторон Земли.

При суммировании по полю зрения (для определённой части поля) энергия, воспринимаемая прибором, рассчитывается с учётом градиента яркости внутри Земли.

Описанная программа рассматривает линейную модель изменения яркости внутри Земли (модель В, см. рис. 4), учитывающую максимальный градиент яркости с учётом широтных и сезонных факторов для высоты полёта 500 км.

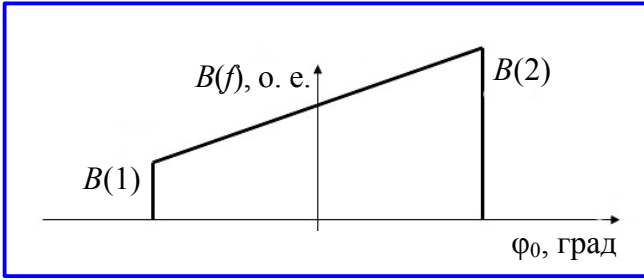


Рис. 4. Модель В излучения Земли

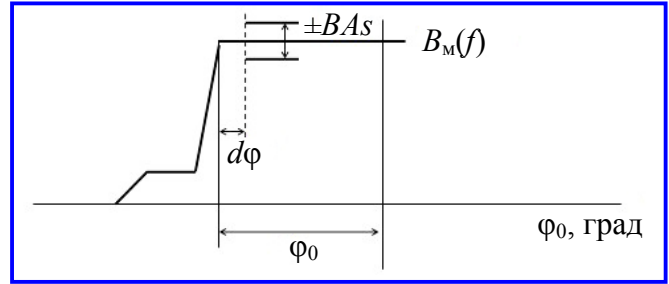


Рис. 5. Модель С случайных погодных вариаций яркости

Таблица 3

| $B(1)$, о.е. | $B(2)$, о.е. | $L(1)$, мВт/см ² ·ср | $L(2)$, мВт/см ² ·ср | $\Delta B_{ш}$, угл. мин | $\Delta B_{ш}'$, угл. мин |
|------------------|------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| 1 | 2 | 2,5 | 5 | 18 | 2,6 |
| 1 | 3 | 2,5 | 7,5 | 24 | 3,7 |
| 1 | 4 | 2,5 | 10 | 27 | 3,6 |
| 2 | 4 | 5 | 10 | 12,2 | 0,8 |
| 1,6 | 3,5 | 4 | 8,75 | 15 | 1,4 |

Условия расчёта и его результаты приведены в табл. 3.

Рассмотрение результатов расчёта показывает:

- использованный метод компенсации погрешностей эффективен и для принятой модели В;
- остаточная погрешность не превышает 4 угл. мин даже для заведомо нереального перепада яркостей 1:4 (типа Антарктида – экватор). Для максимального реального перепада яркостей (-45° ю. ш. зимой) остаточная погрешность составляет 1,4 угл. мин.

Определение случайной погодной погрешности

Для оценки случайной погодной погрешности предположим, что внутри диска Земли вблизи горизонта, при углах визирования $\phi_a = \phi_0 - d\phi$, возникает скачок яркости BA_s , связанный с изменением погодных условий (облачный фронт, циклон, район температурной аномалии и т. д.).

Такое искажение фронта рабочего импульса влияет на измеряемые в приборе углы G_{am} и Del и, следовательно, вызывает погрешность измерения прибором угла β .

Для расчёта используем модель С, показанную на рис. 5.

Расстояние по поверхности Земли с резкой сменой метеоситуации определяется радиусом корреляции облачного покрова $R_x \approx 300$ км для широкого спектра ИК-излучения (6 – 20 мкм) [1]. Изменение угла визирования $d\phi$, соответствующее расстоянию R_x , составляет $d\phi = 0,17^\circ$.

Средняя вариантность яркости в спектре 6 – 20 мкм, определяемая как отношение среднеквадратического отклонения яркости к её среднему значению [1].

$$\eta = \sigma_B / B_{cp} \approx 0,2.$$

Такая вариантность определена для визирования в надиры точечным полем зрения. В реальности имеет место осреднение за счёт наклонного визирования у горизонта и реального размера поля зрения. Это осреднение снижает вариантность до $\eta' = 0,15$ при высоте полёта 500 км.

Средняя яркость Земли в спектре 6 – 20 мкм $B_{cp} = 6$ мВт/см²·ср.

Тогда среднеквадратическая вариация яркости у горизонта с учётом осреднения полем

$$\sigma_B = \eta' B_{cp} = 0,9 \text{ мВт/см}^2 \cdot \text{ср} = 0,36 \text{ о. е.}$$

Дисперсия яркостей для двух точек визирования, разделённых расстоянием $L(1/2) = R_x$, [2]:

$$D_{B1/2} = D_{B1} + D_{B2} - 2K_{B1/2}.$$

Примем, что $D_{B1} = D_{B2} = D_B$, тогда

$$D_{B1/2} = 2D_B - 2K_{B1/2} = 2D_B(1 - K_{B1/2}/D_B),$$

где $K_{B1/2}/D_B = r_B$ – коэффициент корреляции яркости по поверхности Земли;

$$D_{B1/2} = (\sigma_{B1/2})^2 = 2(\sigma_B)^2(1 - r_B);$$

$$\sigma_{B1/2} = \sigma_B \sqrt{2(1 - r_B)}.$$

Закон изменения яркости по поверхности Земли близок к экспоненциальному, т. е. для расстояния $L(1/2) = R_x$

$$r_B = \exp(-L(1/2)/R_x) = 0,368;$$

$$\sigma_{B1/2} = \sigma_B \sqrt{2(1 - r_B)} = 0,4 \text{ о. е.}$$

Итак, для расчёта случайной погодной погрешности задаётся модель С излучения Земли, для которой имеет место средняя яркость с противоположных сторон Земли $B_m(1) = B_m(2) = 6$ мВт/см²·ср = 2,4 о. е.; среднее расстояние от горизонта до появления погодной неоднородности $d\phi = 0,17^\circ$; среднеквадратическое изменение яркости при этом составляет $\sigma_{B1/2} = 0,4$ о. е.

Таблица 4

| $B(1)$, о. е. | $B(2)$, о. е. | $L(1)$, мВт/см ² ·ср | $L(2)$, мВт/см ² ·ср | BA_s о. е. | $\Delta\beta_{п}$, угл. мин | $\Delta\beta_{п}'$, угл. мин |
|-------------------|-------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------|---------------------------------|----------------------------------|
| 2,4 | 2,4 | 6 | 6 | 0,4 | 6 | 3 |
| 1 | 1 | 2,5 | 2,5 | 0,4 | 28,8 | 8,7 |
| 4 | 4 | 10 | 10 | 0,4 | 2,5 | 1,5 |

Составлена программа расчёта случайной погрешной погрешности. Для каждой из f засечек добавлены скачки яркости $BA_s(1)=\sigma_{B1/2}$ при угле $\phi_a=\phi_0+d\phi$.

Дальнейшие операции производятся аналогично описанным ранее программам.

Определяемые по данной программе углы BE_{TA} и BE_{TA}' соответствуют $\sigma_{\beta_{п}}$, $\sigma_{\beta_{п}'}$, т. е. средней квадратической величине погрешности измерения угла отклонения. Для нормального закона вариаций яркости максимальные величины погрешностей [2] $\Delta\beta_{п}=3\sigma_{\beta_{п}}$, $\Delta\beta_{п}'=3\sigma_{\beta_{п}'}$.

Исходные данные и результаты расчёта приведены в табл. 4. Из результатов расчёта можно сделать следующие выводы:

- используемый метод компенсации эффективен и для используемой модели C , отражающей погодные вариации яркости у горизонта;
- остаточная максимальная погрешность зависит от яркости ИК-горизонта и при средней яркости составляет 3 угл. мин.

Погрешность за счёт случайных вариаций высоты атмосферы

Для оценки этой погрешности используем модель D , показанную на рис. 6.

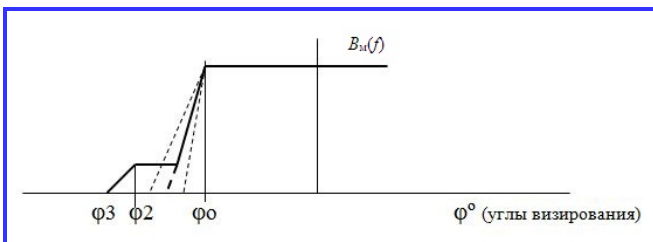


Рис. 6. Модель D, учитывающая вариации высоты атмосферы

Высота излучающего слоя атмосферы для спектральной области 8 – 14 мкм (окно пропускания ИК-излучения атмосферы) составляет 40 ± 20 км, причём закон распределения вероятностей случаен и близок к равномерному [2]. Для такого закона среднеквадратическое отклонение от среднего значения составляет

$\pm 2\sigma_h$, т. е. $\sigma_h=10$ км. Разброс высоты для слоя CO_2 , определяющего излучение при углах визирования $>\phi_1$, пренебрежимо мал ($<0,5$ км).

Составляем программу расчёта случайной погрешности из-за вариаций высоты атмосферы.

Для каждой f засечки добавляются скачки высоты h атмосферы высотой $h(1)=h_{ср}\pm\sigma_h$, $h(2)=h_{ср}=40$ км.

Дальнейшие операции производятся по упомянутой выше программе; определяются углы отклонения без учёта и с учётом компенсации. Эти углы составляют $BE_{TA}=\sigma_{\beta_h}$ и $BE_{TA}'=\sigma_{\beta_h}'$. При этом яркость с двух сторон Земли принимается одинаковой. Предельная величина угловой погрешности для равномерного закона распределения [2] равна $\Delta\beta_h=2\sigma_{\beta_h}$, $\Delta\beta_h'=2\sigma_{\beta_h}'$.

Условия расчёта и его результаты приведены в табл. 5.

Таблица 5

| $B(1)$, о. е. | $B(2)$, о. е. | $L(1)$, мВт/см ² ·ср | $L(2)$, мВт/см ² ·ср | σ_h , км | $\Delta\beta_h$, угл. мин | $\Delta\beta_h'$, угл. мин |
|-------------------|-------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------|-------------------------------|--------------------------------|
| 2,4 | 2,4 | 6 | 6 | 10 | 6,0 | 5,8 |
| 1 | 1 | 2,5 | 2,5 | 10 | 5 | 5 |
| 4 | 4 | 10 | 10 | 10 | 6,5 | 6,6 |

Результаты расчёта показывают, что погрешность за счёт вариации высоты атмосферы практически не компенсируется схемой коррекции прибора.

Суммарная предельная методическая погрешность прибора

Рассмотрев составляющие методической погрешности ПМВ, можно сделать следующие выводы.

1. Погрешность за счёт несферичности Земли меняется по гармоническому закону: для орбиты с высотой 500 км и наклоном $74,5^\circ$ креновая составляющая меняется от 0 до $\pm 4,9$ угл. мин с частотой обращения КА, тангажная составляющая меняется от 0 до $\pm 9,1$ угл. мин с двойной частотой обращения КА.

Ввиду систематического характера погрешности она может быть полностью скомпенсирована алгоритмическим путём.

2. Погрешность за счёт широтно-сезонных вариаций яркости также имеет в основном систематический характер и частично может быть скомпенсирована алгоритмически.

Предельная погрешность имеет место в районе 45° ю. ш. в зимний сезон. С учётом использованного в приборе метода компенсации величина остаточной погрешности не превышает $\Delta\beta_{ш}=1,4$ угл. мин.

3. Максимальная величина случайной погрешности за счёт погодных вариаций яркости $\Delta\beta_n(3\sigma_n)$ составляет с учётом используемого в приборе метода компенсации $\Delta\beta_n=3$ угл. мин.

4. Максимальная величина случайной погрешности за счёт вариаций высоты атмосферы $\Delta\beta_h(2\sigma_h)$ составляет 5,8 угл. мин и практически не поддаётся компенсации.

Предельная суммарная методическая погрешность определяется (с учётом принципа суперпозиции нескольких природных процессов) по формуле:

$$\Delta\beta_s = \sqrt{\Delta\beta_{\text{ш}}^2 + \Delta\beta_n^2 + \Delta\beta_h^2} = 6,5 \text{ угл. мин.}$$

Оценка методической погрешности ПМВ по результатам ЛКИ КА «Кондор» и «Метеор-М» № 2

Точность ориентации КА «Кондор» и «Метеор-М» №2 обеспечивается звёздными датчиками. Принимая во внимание высокую точность приборов звёздной ориентации (единицы угл. с), величину погрешности ПМВ можно непосредственно определить по телеметрической информации о выходных сигналах ПМВ.

В качестве примера рассмотрим оценку методической погрешности ПМВ по результатам ЛКИ КА «Кондор».

КА «Кондор» был запущен в июле 2013 г. на круговую орбиту с высотой 500 км и наклоном $74,5^\circ$. На рис. 7 приведена телеметрическая информация с него за 10.09.2013 г., сеанс 1131. При этом ПМВ работал в телеметрическом режиме, а управление ориентацией КА производилось по гироскопическим приборам, корректируемым звёздными датчиками. На рис. 7 приведена телеметрия выходных углов ПМВ по крену β_k (рис. 7, а) и тангажу β_t (рис. 7, б) для 4 витков полёта КА; величины углов измеряются в угл. с.

На рис. 7 видна зависимость выходных сигналов прибора от орбитального угла КА: угол крена меняется с частотой обращения КА, а угол тангажа – с двойной частотой (период обращения КА ≈ 100 мин). На рис. 7, б можно видеть последствия тангажного ухода гироскопа, корректируемого один раз за виток по звёздному датчику. Приняв линейный закон ухода гироскопа, учтём этот уход при оценке величины тангажного угла β_t . В табл. 6 приведены зависимости от орбитального угла V (град) углов

отклонения по крену β_k и тангажу β_t (с учётом коррекции ухода гироскопа) для нескольких витков полёта КА, а также углы отклонения $(\beta_k)_{\text{ср}}$ и $(\beta_t)_{\text{ср}}$, средние по всем рассмотренным виткам.

Найдём величины математического ожидания по всему массиву углов отклонения: по крену $K_{\text{ср}}=\Sigma\beta_k/48\approx-3,75$ угл. мин и по тангажу $T_{\text{ср}}=\Sigma\beta_t/48\approx 15,5$ угл. мин. Такие постоянные на протяжении нескольких витков отклонения не могли возникнуть из-за методической погрешности прибора и связаны, видимо, с погрешностью установки приборов на КА и погрешностью выдачи орбитальной тангажной поправки на гироскоп. Рассчитаем углы отклонения относительно средних значений: $\Delta\beta_k=(\beta_k)_{\text{ср}}-K_{\text{ср}}$; $\Delta\beta_t=(\beta_t)_{\text{ср}}-T_{\text{ср}}$; эти величины приведены в табл. 7.

Используя расчётные величины погрешности из-за несферичности Земли $(\Delta\beta_{\text{нсф}})_k$ и $(\Delta\beta_{\text{нсф}})_t$ (см. табл. 1), найдём:

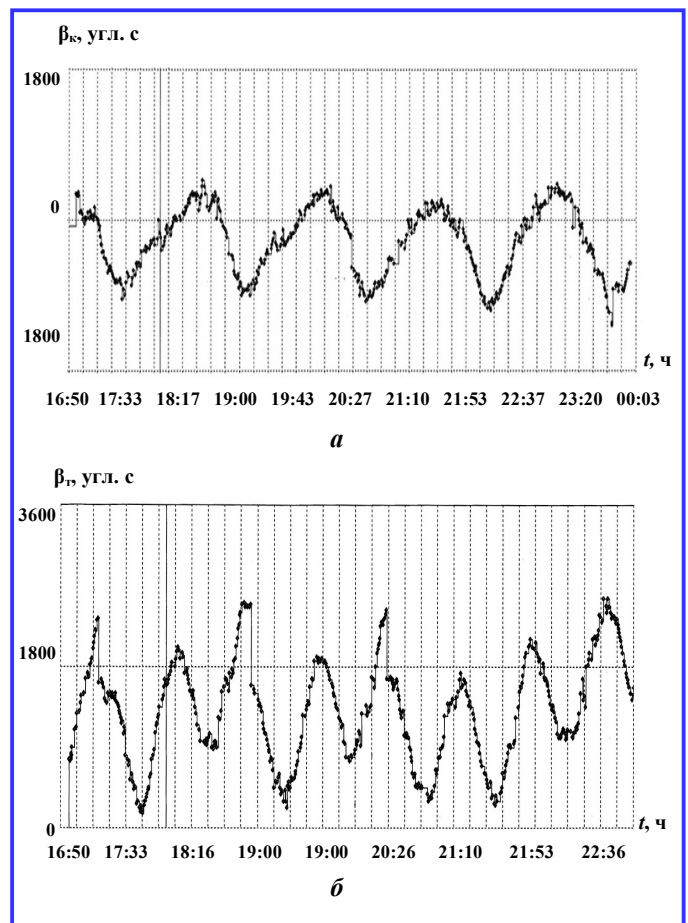


Рис. 7. Выходные сигналы: а – канал крена; б – канал тангажа

Таблица 6

| V, град | В _к , угл. мин | | | (В _к) _{ср} угл. мин | В _т , угл. мин | | | (В _т) _{ср} угл. мин |
|---------|---------------------------|---------|---------|---|---------------------------|---------|---------|---|
| | 1 виток | 2 виток | 3 виток | | 1 виток | 2 виток | 3 виток | |
| 0 | -5,8 | -4,7 | -5,8 | -5,4 | 19 | 18,4 | 19 | 18,8 |
| 22,5 | -9,4 | -10,1 | -12,7 | -10,7 | 25,2 | 23,8 | 26,9 | 25,3 |
| 45 | -12,2 | -14 | -14,8 | -13,7 | 27,2 | 26,5 | 26,3 | 26,6 |
| 67,5 | -12,3 | -13,8 | -13,3 | -13,1 | 23,8 | 23,8 | 20,4 | 22,7 |
| 90 | -12 | -10,5 | -10,3 | -10,9 | 17,7 | 17 | 10,9 | 15,2 |
| 112,5 | -7,9 | -7,1 | -7,5 | -7,5 | 6,5 | 6,8 | 7,5 | 6,9 |
| 135 | -5,9 | -5,8 | -5,9 | -5,9 | 0,7 | 4,1 | 5,4 | 3,4 |
| 157,5 | -3,9 | -4,7 | -3 | -3,9 | 2,7 | 5,1 | 10,2 | 6 |
| 180 | -2,2 | -3,2 | -0,8 | -2,1 | 13,6 | 15,3 | 21 | 16,6 |
| 202,5 | 0 | 0 | 1,4 | 0,5 | 21,8 | 23,8 | 25,9 | 23,8 |
| 225 | 1,9 | 2,4 | 2,8 | 2,4 | 24,5 | 24,5 | 25,9 | 25 |
| 247,5 | 4,3 | 3,9 | 3 | 3,77 | 23,1 | 20,4 | 19,7 | 21,1 |
| 270 | 5,4 | 5,4 | 1,5 | 4,16 | 15,3 | 11,9 | 10,5 | 12,6 |
| 292,5 | 5,8 | 5,6 | -0,6 | 3,6 | 7,8 | 4,8 | 5,1 | 5,9 |
| 315 | 5,7 | 0,7 | -4,2 | 0,7 | 5,8 | 5,4 | 7,5 | 6,2 |
| 337,5 | 2 | -0,3 | -7,1 | -1,8 | 10,9 | 10,2 | 15,6 | 12,2 |

– величины остаточной методической ошибки прибора за вычетом этой погрешности:

$$\begin{aligned}\delta B_k &= \Delta B_k - (\Delta B_{\text{исф}})_k; \\ \delta B_t &= \Delta B_t - (\Delta B_{\text{исф}})_t;\end{aligned}$$

– величину меридиональной составляющей методической погрешности для каждого угла V:

$$\delta B_m = \sqrt{(\delta B_k)^2 + (\delta B_t)^2},$$

– математическое ожидание МО (δB_m)=3,5 угл. мин,

– отклонение величин ошибки от среднего значения:

$$\epsilon = \Delta B_m - \text{МО}(\delta B_m),$$

– среднее квадратическое отклонение погрешности как корень из дисперсии:

$$\sigma_m = \sqrt{(1/(N-1))\sum \epsilon^2},$$

где N=16 – полное число обработанных значений углов V.

Величины δB_k , δB_t , δB_m , ϵ в угл. мин также приведены в табл. 7.

Таблица 7

| V | ΔB_k | δB_k | ΔB_t | δB_t | δB_m | ϵ |
|-------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------------------------------|-------------------------|
| 0 | -1,65 | -1,65 | 3,3 | 3,3 | 3,7 | 0,2 |
| 22,5 | -6,95 | -5,05 | 9,8 | 3,2 | 5,8 | 2,4 |
| 45 | -9,95 | -6,55 | 11,1 | 2,1 | 6,9 | 3,4 |
| 67,5 | -9,35 | -4,85 | 7,2 | 0,6 | 4,9 | 1,4 |
| 90 | -7,15 | -2,15 | -0,3 | -0,3 | 2,2 | -1,3 |
| 112,5 | -3,75 | 0,75 | -8,6 | -2 | 2,1 | -1,4 |
| 135 | -2,15 | 1,25 | -12,1 | -3,1 | 3,3 | -0,2 |
| 157,5 | -0,15 | 1,75 | -9,5 | -2,9 | 3,4 | -0,1 |
| 180 | 1,65 | 1,65 | 1,1 | 1,1 | 2 | -1,5 |
| 202,5 | 4,25 | 2,35 | 8,3 | 1,7 | 2,9 | -0,6 |
| 225 | 6,15 | 2,75 | 9,5 | 0,5 | 2,8 | -0,7 |
| 247,5 | 7,45 | 2,95 | 5,6 | -1 | 3,1 | -0,4 |
| 270 | 7,85 | 2,85 | -2,9 | -2,9 | 4,1 | 0,6 |
| 292,5 | 7,35 | 2,85 | -9,6 | -3 | 4,1 | 0,6 |
| 315 | 4,45 | 1,05 | -9,3 | -0,3 | 1,1 | -2,4 |
| 337,5 | 1,95 | 0,05 | -3,3 | 3,3 | 3,3 | -0,2 |
| | | | | | МО (δB_m)= =3,5 угл. мин | $\sigma_m=1,5$ угл. мин |

Таким образом, предельная суммарная методическая погрешность измерения углов отклонения прибором (с исключением величины погрешности из-за несферичности Земли) по предварительным результатам обработки телеметрической информации составляет:

$$(\Delta\beta_M)_{\max} = MO(\delta\beta_M) \pm 3\sigma_M = (3,5 \pm 4,5) \text{ угл. мин.}$$

Заключение

Величина предельной методической погрешности прибора ПМВ, определённая по результатам обработки телеметрической информации КА «Кондор» и «Метеор-М» №2 (за исключением погрешности за счёт несферичности Земли, которая может быть легко скомпенсирована алгоритмическим путём),

составляет 8 угл. мин, что с достаточной точностью совпадает с расчётным значением.

Указанная методическая погрешность включает в себя систематическую и случайную составляющие.

Систематическая составляющая связана с широтно-сезонными вариациями яркости Земли и поддаётся периодической компенсации.

Таким образом для ПМВ производства ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ» остаточная величина методической погрешности может составить $\sigma \approx 1,5 \div 2,5$ угл. мин.

Литература

1. Андрианов Ю. Г., Караваев И. И., Сафронов Ю. П., Тулупов В. И. Инфракрасное излучение Земли в космос. / Ю. Г. Андрианов и др. – М.: Сов. Радио, 1973.
2. Вентцель Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – М.: Наука, 1969.

Поступила в редакцию 26.05.2014

*Юрий Моисеевич Гандлевский, ведущий инженер-конструктор.
Евгений Николаевич Михайлов, канд. техн. наук, начальник лаборатории.
Юлия Сергеевна Мосолова, инженер, e-mail: mosolova.rl3@yandex.ru.
Александр Ефимович Рабовский, канд. техн. наук, ст. научн. сотрудник.
Т. (495) 366-33-92.*