ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ В ОБРАБОТКЕ ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТОМЕТРОВ КА «TUSUR GO»

Г.Р. Макаров, Б.О. Мухачев, Д.С. Иванов

ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва

makarov.gr@phystech.edu

Методы обработки измерений являются неотъемлемой частью как постобработки телеметрии малых космических аппаратов (КА), так и бортового программного обеспечения КА. В данной работе решается задача подбора характеристик магнитометров, установленных на борту КА «TUSUR GO», с использованием метода наименьших квадратов.

Используется следующая модель измерения магнитного поля Земли ([1]):

$$\hat{\mathbf{B}}^{meas} = \mathbf{KPB}_{ССК}^{model} + \Delta\mathbf{B}$$

где $\mathbf{K} = \mathrm{diag}\left(k_x, k_y, k_z\right)$ – матрица коэффициентов усиления чувствительных элементов магнитометра, $\mathbf{P}$ – матрица направления осей чувствительных элементов, $\Delta\mathbf{B}$ – смещение нуля магнитометра. Модель IGRF позволяет получить вектор магнитного поля Земли в инерциальной системе координат (ИСК) $\mathbf{B}_{ИСК}^{model}$, который затем переводится в связную с главными осями инерции КА систему координат (ССК).

Кадр телеметрии содержит в себе измерения магнитного поля у двух магнитометров и метки времени, когда измерение было получено. Ставится задача минимизации функционала расхождения вектора магнитного поля, полученного согласно модели измерения, с данными из телеметрии:

$$J = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N}\left(\mathbf{B}_{I,i}^{meas} - \hat{\mathbf{B}}_{I,i}\right)^2 + \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N}\left(\mathbf{B}_{II,i}^{meas} - \hat{\mathbf{B}}_{II,i}\right)^2 \to \min,$$

где индексы I и II соответствуют магнитометрам 1 и 2, а N – число измерений.

Оптимизация разделяется на 2 уровня – внутренний и внешний. На внутреннем уровне фиксируются все параметры, кроме смещений нуля магнитометра. Их можно получить аналитически за 1 шаг метода Ньютона. На внешнем уровне оптимизации используется метод роя частиц (PSO, [2]), который не требует вычисления градиента функционала от остальных параметров: матриц коэффициентов усиления $\mathbf{K}_I$ и $\mathbf{K}_{II}$, матриц направления осей чувствительных элементов магнитометра $\mathbf{P}_I$ и $\mathbf{P}_{II}$, а также подбираются начальные условия кватерниона ориентации $\mathbf{Q}_0$ и угловой скорости $\boldsymbol{\omega}_0$ для интегрирования уравнений углового движения КА.

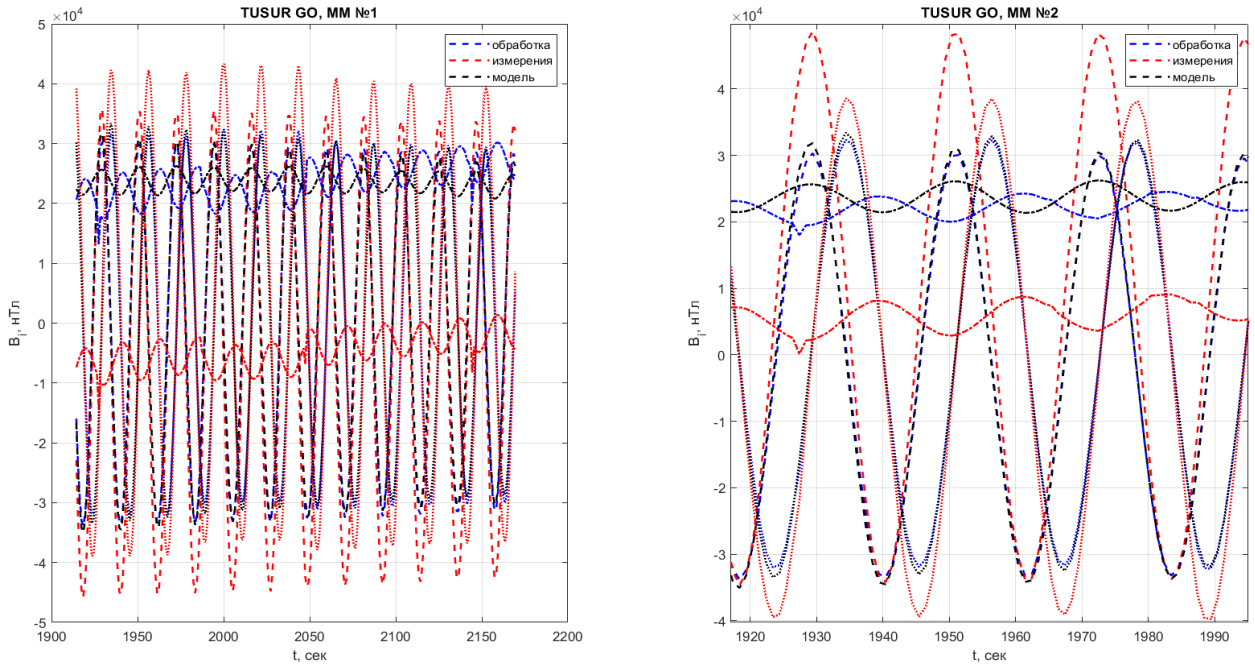

Рис. 1. Сравнение модельного значения магнитного поля Земли с измерениями без обработки и с обработкой.

В ходе работы проведено сравнение различных моделей измерения магнитометра, а в оптимизации варьировалось как число параметров, так и разделение их на внутренний и внешний уровни. Результатом работы методики является вектор оптимальных параметров и оптимальное значение функционала. Было замечено, что использование упрощенной модели измерения значительно сокращает время выполнения программы, однако даже при найденных оптимальных параметрах дает менее правдоподобный прогноз измерения магнитометра, то есть значение функционала сильно выше, чем в полной модели измерения магнитного поля.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-71-10009 (https://rscf.ru/project/22-71-10009/).

Список литературы:

1. Иванов Д.С. и др. Калибровка датчиков для определения ориентации малого космического аппарата // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2010. № 28. 30 с. URL: https://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2010-28
2. Kennedy J., Eberhart R. Particle swarm optimization // Proceedings of ICNN’95 – international conference on neural networks. 1995. Vol. 4. Pp. 1942–1948. https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968