

УДК 621.375.

С.В. ОРЛОВ

*Военный научный центр космических исследований
(при Харьковском военном университете), Украина*

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАВИГАЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ, ВКЛЮЧАЮЩАЯ ПАРИРОВАНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ УГЛОВЫХ ОШИБОК, ВНОСИМЫХ ОСТРОКОНЕЧНЫМ АНТЕННЫМ ОБТЕКАТЕЛЕМ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИМ НАГРЕВОМ

Получены основные соотношения для расчета дополнительных угловых ошибок нагретого обтекателя с учетом отражений внутри неравномерно нагретой стенки обтекателя. Также предлагается новая математическая модель управления движением летательного аппарата, учитывающая систематические дополнительные угловые ошибки местоопределения объекта вследствие аэродинамического нагрева обтекателя антенны.

диэлектрическая проницаемость, тангенс угла потерь диэлектрика, угловые ошибки, обтекатель, аэродинамический нагрев, коэффициент отражения, коэффициент пропускания

1. Формулирование проблемы

Радиопрозрачные обтекатели антенн (ОА), используемые в системах навигации летательных аппаратов (ЛА), в процессе полета в плотных слоях атмосферы подвергаются аэродинамическому нагреву, который вызывает неравномерность температурных градиентов как по толщине, так и по образующей обтекателя, причем положение критической точки с максимальными тепловыми потоками непрерывно изменяется в течение всего полета. При этом материал стенки становится неоднородным в электродинамическом смысле, т.е. диэлектрическая проницаемость и тангенс угла потерь диэлектрика, из которого изготовлен обтекатель, изменяются как по толщине стенки, так и по образующей. Это приводит к дополнительным угловым ошибкам местоопределения объекта, которые носят систематический характер.

1.1. Анализ литературы

В [1, 2] приводятся методики расчета снижения эффективности бортовых радиолокационных станций, использующих остронаправленные антенны с радиопрозрачными обтека-

телями, однако указывается, что в общем случае применить методику не представляется возможным из-за отсутствия исходных данных – распределения температуры по образующей и толщине стенки обтекателя антенны. Общепринятой методикой парирования угловых ошибок для остроконечного обтекателя является профилирование толщины стенок обтекателя для каждого сечения для минимизации дополнительных угловых ошибок, возникающих вследствие аэродинамического нагрева. Однако, когда дальность и случайность маневра летательного аппарата варьируют в широких пределах, спрофилировать толщину стенки с учетом разброса всех возможных значений величины нагрева обтекателя антенны не представляется возможным.

1.2. Цель работы

Цель работы состоит в разработке методики расчета соответствующих поправок в уравнения движения летательного аппарата, по которым производится навигация ЛА с учетом неравномерности нагрева обтекателя антенны как по толщине, так и по образующей.

2. Решение проблемы

В [1, 2] предлагается формула расчета суммарной дополнительной угловой ошибки антенного обтекателя при аэродинамическом нагреве:

$$\Delta\Theta_{\Sigma} = \Delta\Theta_1 + \Delta\Theta_2 + \Delta\Theta_3 \pm 3 \cdot \sigma_{\Delta\theta_{нагр}}, \quad (1)$$

где $\Delta\Theta_1$ – угловая ошибка из-за различной электрической толщины стенки по образующей вследствие температурного изменения материала обтекателя; $\Delta\Theta_2$ – угловая ошибка из-за отражений от неравномерно нагретой стенки по образующей и изменения затухания электромагнитной волны, проходящей через неравномерно нагретую стенку вследствие изменения ϵ и $\text{tg} \delta$; $\Delta\Theta_3$ – угловая ошибка из-за переотражений от неравномерно нагретой стенки по образующей вследствие изменения ϵ ; $\sigma_{\Delta\theta_{нагр}}$ – среднеквадратическое значение угловой ошибки антенны при нагреве обтекателя (вклад шумовой составляющей).

Остановимся на расчете второй и третьей составляющей выражения (1) отдельно. Вторая составляющая рассчитывается как

$$\Delta\Theta_2 = A(G - |G_1 - G_2|), \quad (2)$$

где A – коэффициент пропорциональности; G – коэффициент усиления антенны для холодного обтекателя, G_1 , G_2 – коэффициенты усиления антенны для первого и второго положения антенны.

Отраженная от стенки волна, интерферируя с прямой волной антенны, дает дополнительную ошибку пеленга

$$\Delta\Theta_3 \leq \left(\frac{2\pi\lambda_0}{L} \right) \sqrt{\left(|R_{\Omega_1}|^2 - |R_{\Omega_1}|^2 \right) + \left(|R_{\Omega_2}|^2 - |R_{\Omega_2}|^2 \right)}. \quad (3)$$

Зная распределение температуры по толщине можно определить суммарные коэффициенты прохождения для неравномерно нагретого по толщине обтекателя разбиением стенки на n слоев.

По формуле, приведенной в [3], коэффициент отражения равен

$$R = \frac{Z_{ex}^{(n)} - Z_{n+1}}{Z_{ex}^{(n)} + Z_{n+1}}, \quad (4)$$

где $Z_{ex}^{(n)} = \frac{Z_{ex}^{(n-1)} - iZ_n \text{tg} \varphi_n}{Z_n - iZ_{ex}^{(n-1)} \text{tg} \varphi_n} \cdot Z_n$ – входной импеданс системы на передней поверхности последнего слоя.

Коэффициент прозрачности равен [3]:

$$\frac{A_{n+1}}{A_1} = \prod_{j=1}^{j=n} \frac{Z_{j+1} + Z_{ex}^{(j)}}{Z_j + Z_{ex}^{(j)}} e^{-i\varphi_j}. \quad (5)$$

По вышеизложенной методике был произведен расчет суммарной дополнительной угловой ошибки вследствие нагрева, результаты которого приведены на рис. 1.

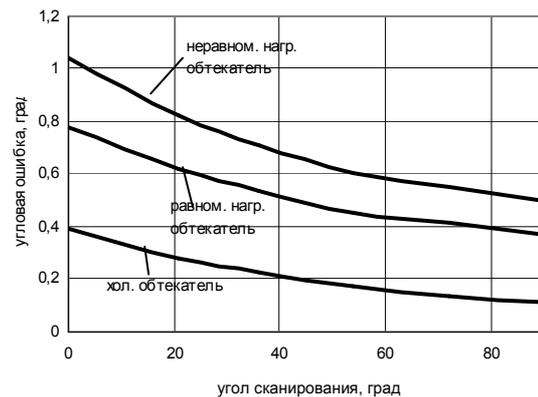


Рис. 1. Дополнительные угловые ошибки, вносимые нагретым АО

Пусть по известному температурному полю были рассчитаны дополнительные угловые ошибки вследствие аэродинамического нагрева для каждого угла поворота антенны Θ_1 [2] и парциальные составляющие Θ_2 и Θ_3 по формулам (2), (3) с учетом неравномерности нагрева по толщине стенки обтекателя. Тогда для какого-то случайного угла поворота антенны β на высоте h , систематическая ошибка в местоопределении по дальности вследствие аэродинамического нагрева составит величину (рис. 2):

$$\Delta L_{нагрева} = h(td(\beta + \Theta) - td\beta), \quad (6)$$

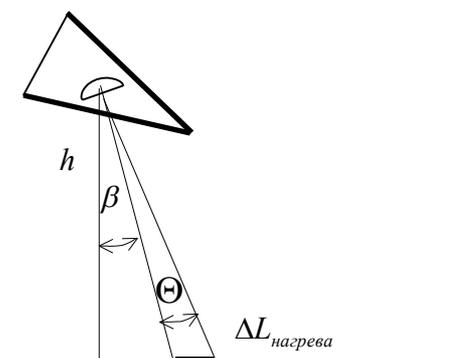


Рис. 2 Ошибка в местоопределении по дальности вследствие нагрева ОА

где Θ – суммарная дополнительная угловая ошибка вследствие нагрева.

Если эту ошибку в дальности скомпенсировать при построении математической модели движения ЛА, то при интегрировании уравнений навигации будут получены соответствующие значения текущих управляющих углов полета ЛА, в которые будут входить поправки на систематическую ошибку, возникающую вследствие аэродинамического нагрева ОА. Например, математическая модель навигации ЛА будет содержать уравнение по дальности со следующими граничными условиями:

$$L_{\text{объекта}} = L_{\text{изображения}} + \Delta L_{\text{нагрева}} \quad (7)$$

где $L_{\text{изображения}}$ – значение дальности до объекта по изображению.

Уравнения управляемого по методу попадающей траектории движения приведены в [4]:

$$\begin{cases} \frac{dV}{dh} = -\frac{\sigma_x \cdot \rho \cdot V}{\sin \theta} - \frac{g}{V}, \\ \frac{dt}{dh} = \frac{1}{V \cdot \sin \theta}, \\ \alpha = \frac{2 \cdot m}{c_y^\alpha \cdot S_{кр} \cdot \rho} \cdot \frac{d}{dh} (\cos \theta); \\ \frac{dl}{dh} = A_1 + 2A_2h + 3A_3h^2. \end{cases} \quad (8)$$

Дополнительная угловая ошибка в этой системе входит в четвертое уравнение, получаемое из полинома дальности [4]:

$$L = L(h) = A_0 + A_1h + A_2h^2 + A_3h^3. \quad (9)$$

Если обрабатывать эту дополнительную поправку непрерывно, можно полностью парировать систематическую ошибку вследствие аэродинамического нагрева ОА до тех пор, пока не будет достигнут критический угол поворота антенны, при котором раскрыв антенны захватывает носок обтекателя и угловая ошибка меняет знак.

Выводы

В работе получены основные соотношения (6), (7), позволяющие рассчитать дополнительную поправку в математическую модель навигации летательного аппарата, учитывающую аэродинамический нагрев обтекателя антенны, что позволяет существенно повысить точность систем землеобзора при высокотемпературном нагреве обтекателя антенны.

Литература

1. Прогнозирование эксплуатационных характеристик антенн с теплозащитой / В.Ф. Михайлов и др. – С.-Пб.: Судостроение, 1994. – С. 25 – 31.
2. Воробьев Е.А., Михайлов В.Ф., Харитонов А.А. СВЧ диэлектрики в условиях высоких температур. – М.: Сов. радио, 1977. – С. 23 – 29.
3. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. – М.: АН СССР, 1957. – 103 с.
4. Турченко В.Я., Казаков А.Е., Борцов В.В. Метод разработки программ управления баллистических объектов и их оснащения // Збірник наукових праць ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова. – К.: НАНУ, ІПМЕ. – 2003. – Вип. 22. – С. 224 – 227.

Поступила в редакцию 02.03.2004

Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.М. Приходько, Харьковский военный университет, Харьков.