

УДК 621.396.96

## РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАДИОТЕПЛОВЫХ КЭСН ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

В.И. ТРОИЦКИЙ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ММИГАиК, г. Москва, Россия

Рассмотрена имитационная модель корреляционно-экстремальной системы навигации (КЭСН) летательного аппарата (ЛА) по микроволновому излучению земной поверхности, позволяющая оптимизировать характеристики системы, начиная от вида используемого сигнала и схемы радиометра до ожидаемой точности привязки КЭСН. Разработанная модель состоит из блока моделирования работы радиометра; блока моделирования излучающих свойств подстилающей поверхности; блока учета влияния атмосферы; блока кинематики, моделирующего движения носителя, характеристики антенной системы и способ обзора пространства; блока вычисления координат. Описываемая в статье модель позволяет оценивать информативность и стабильность излучения земных покровов участка коррекции траектории, влияние атмосферы на перенос радиотеплового излучения земных покровов в точку наблюдения; параметры антенной системы, характеристики радиометра, влияющие на вид выходного сигнала, кинематику движений летательного аппарата, используемые алгоритмы определения координат.

**Ключевые слова:** навигация, моделирование, микроволновое излучение, информативность излучения земных покровов.

### ВВЕДЕНИЕ

Точность определения координат КЭСН, использующих радиотепловое излучение земных покровов, зависит от многих факторов, основными из которых являются:

- информативность и стабильность излучения земных покровов участка земли;
- влияние атмосферы на перенос радиотеплового излучения земных покровов в точку наблюдения;
- параметры антенной системы (число и ширина лучей, уровни боковых лепестков, скорость сканирования и т. д.);
- характеристики радиометра, влияющие на вид выходного сигнала;
- кинематика движения ЛА;
- используемые алгоритмы определения координат.

Влияние перечисленных факторов не является аддитивным, поэтому при анализе работы системы необходимо учитывать их одновременно. При этом эффективным методом анализа работы КЭСН является метод имитационного моделирования процесса коррекции. Использование этого метода позволяет отрабатывать принципы и оценивать эффективность системы еще на этапе проектирования.

В статье описывается разработанная модель процесса коррекции координат летательного аппарата с помощью радиотепловой КЭСН и обосновывается ее структура.

Разработанная модель состоит из следующих достаточно независимых блоков: блока моделирования работы радиометра (включая антенную систему); блока моделирования излучающих свойств подстилающей поверхности; блока учета влияния атмосферы; блока кинематики, моделирующего движения носителя, характеристики антенной системы и способ обзора пространства; блока вычисления координат.

### МОДЕЛЬ РАДИОМЕТРА РАДИОТЕПЛОВОЙ КЭСН

Радиометр включает антенно-фидерный тракт и приемник СВЧ. В радиометрах используются различные схемы приемников. При создании модели радиометра желательно иметь воз-

возможность моделировать сигнал на выходе радиометра при использовании различных схем СВЧ-приемников. Для этого необходимо выяснить, какой вид имеет выходной сигнал, какими параметрами он может быть охарактеризован, и затем, какое влияние на параметры выходного сигнала оказывает выбор конкретной схемы приемника СВЧ.

При моделировании в качестве начальных параметров задаются нормированная чувствительность  $\delta T_H$  и время накопления сигнала  $\tau$ , которое выбирается равным постоянной времени интегратора  $\tau_\phi$  ( $\tau = \tau_\phi$ ). Текущее значение чувствительности и, следовательно, значение дисперсии выходного сигнала вычисляется по формуле

$$\sigma_\tau = \delta T = \frac{\delta T_H}{\sqrt{\tau}}.$$

Математическое ожидание выходного сигнала определяется значениями  $T_a$  и временем накопления сигнала. На величину входного сигнала влияют характеристики антенной системы и закон перемещения луча в пространстве. По этой причине в состав модели входят блок моделирования антенной системы и блок моделирования устройства управления лучом. Наличие этих двух блоков позволяет формировать значение антенной температуры в каждый момент времени.

Сигнал на выходе антенной системы равен взвешенному среднему значению сигналов от каждого из элементов поверхности, попавших внутрь пятна антенны:

$$T_a = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M T_{яij}(\beta_{ij}) F(\varphi_{ij}\theta_{ij}),$$

где  $F$  – диаграмма направленности антенны.

Эти значения температуры подаются на вход блока, моделирующего работу интегратора.

Изменение постоянной времени интегрирующего звена позволяет изменять время накопления сигнала и, следовательно, чувствительность радиометра. На выходе интегрирующего звена получается сигнал, численное значение которого в температурных единицах равно измеренной температуре.

Основная цель при моделировании приемника радиотеплового излучения – воспроизвести статистические характеристики выходного сигнала с учетом реальных параметров радиометра.

Значение дисперсии выходного сигнала ( $\sigma$ ) принимается равным чувствительности радиометра, спектральная плотность  $S(\omega)$  определяется частотной характеристикой НЧ фильтра; математическое ожидание ( $m$ ) выходного сигнала определяется значениями антенной температуры  $T_a$  в каждый момент времени и временем накопления сигнала.

В модель входит датчик случайных чисел, который производит последовательность случайных чисел с заданными значениями  $m$ ,  $\sigma$ ,  $S(\omega)$ .

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ

При рассмотрении проблем, связанных с построением радиометрической аппаратуры, также необходимо рассмотрение вопросов оптимизации и повышения эффективности антенных систем, используемых в радиотепловых корреляционно-экстремальных системах навигации летательных аппаратов. Важное значение имеет выбор способа обзора пространства – использование многолучевой антенной системы либо антенны с линейными или коническим сканированием, ориентация луча антенны относительно поверхности земли при поляризационных измерениях, размещение антенны на борту. Точность радиометрических измерений во многом зависит от таких характеристик антенны, как ширина главного максимума и уровень бокового излучения, принимаемого по боковым лепесткам, что особенно проявляется при исследовании объ-

ектов с неоднородным фоном. При разработке антенных систем важно иметь количественные критерии, позволяющие оценить эффективность работы антенны в составе аппаратуры.

Поскольку в радиометрии имеют дело с приемом шумового сигнала, то речь идет о формировании диаграммы направленности, обладающей требуемыми свойствами. Практический интерес в радиометрии представляет следующая постановка задачи – синтез заданной по мощности диаграммы направленности произвольного вида с эффективным учетом ряда дополнительных ограничений как на вид и свойства самой диаграммы направленности, так и на характер формирующего ее распределения тока.

Такие задачи относятся к классу смешанных задач синтеза антенн и, как показано в работах по этой тематике, являются некорректно поставленными задачами синтеза антенн. Эффективные способы их решения основаны на использовании методов регуляризации.

## БЛОК КИНЕМАТИКИ

В блоке кинематики положение луча антенны в пространстве в каждый момент времени определяется: положением носителя, на котором размещен радиометр, ориентацией антенны относительно носителя, положением луча (лучей) антенны относительно некоторой начальной точки, задаваемой законом сканирования.

Положение и ориентация носителя в пространстве относительно системы координат, связанной с поверхностью земли, задается тремя пространственными координатами и тремя углами Эйлера (углы рыскания, тангажа и крена). Изменение значений координат во времени описывается случайными функциями времени. Статистические характеристики этих функций зависят от вида конкретного ЛА и условий съемки.

В блоке кинематики предусмотрена возможность формирования координат и ориентации носителя как при использовании экспериментальных результатов, полученных при изменении соответствующих параметров во время полета конкретного носителя, так и с помощью аналитического задания траектории и применения датчика случайных чисел для имитации флуктуации параметров.

Ориентация антенны относительно системы координат, связанной с носителем, зависит от способа закрепления антенной системы (наличие или отсутствие стабилизации, способ стабилизации и т. д.). В блоке кинематики имеется возможность моделировать как жесткое крепление антенны, так и ее стабилизацию с помощью гироскопической платформы.

При наличии стабилизации антенны для вычисления координат используется подблок, в котором учитывается влияние на ориентацию антенной системы конкретной гироскопической платформы с заданными параметрами. В блоке кинематики предусматривается использование многолучевой антенны со сканированием луча (поперечным и по конусу). Двумерное изображение земной поверхности при этом получается за счет движения носителя.

В описываемой модели КЭСН, реализуются следующие способы сканирования лучом.

### *Модель КЭСН с использованием конического сканирования*

При коническом сканировании луч антенны описывает на исследуемой поверхности окружность, часть которой – дуга, обычно с угловым размером  $120^\circ$  – используется для выполнения измерений радиояркостной температуры (РЯТ). Эта дуга называется «рабочей», в отличие от остальной части, называемой «нерабочей» и используемой, как правило, для выполнения калибровки.

На основе сведений о текущих координатах платформы и угловом положении антенны определяются координаты следа луча антенны на исследуемой поверхности. При каждом положении луча осуществляется формирование отсчета. При этом учитывается искажающее действие слоя атмосферы и поляризационный эффект. Учитывая случайное расположение отсче-

тов, называемое эволюциями платформы, возникает необходимость построения текущего изображения удобного для определения меры сходства с эталоном. Для этого используется интерполяция текущих значений в узлы регулярной сетки.

Для получения значений РЯТ в узлах регулярной сетки используется линейная интерполяция.

#### *Модель КЭСН с поперечным сканированием*

При проведении радиометрических измерений с применением поперечного сканирования антенна перемещается из одного положения в другое крайнее в направлении, перпендикулярном движению платформы-носителя. При этом с заданной временной дискретностью  $\Delta t$  производятся отсчеты значений сигнала на выходе радиометра.

Текущие координаты центров пятен определяются аналогично предыдущему случаю. Затем формируются отсчеты РЯТ путем свертки диаграммы направленности антенны с соответствующими участками поля РЯТ с учетом влияния атмосферы. В данной модели поле РЯТ подстилающей поверхности представляет собой цифровую карту с заданным шагом.

Таким образом, «пятно» представляет собой матрицу, элементами которой являются соответствующие веса диаграмм направленности.

Поскольку координаты отсчетов определяются с учетом возможных эволюций платформы, имеющих случайный характер, исходная пилообразная траектория луча антенны на поверхности оказывается в значительной степени искаженной. Для приведения полученной совокупности отсчетов к узлам регулярной координатной сетки используется линейная интерполяция с весами, обратно пропорциональными расстоянию между рассматриваемыми узлами и набором отсчетов, расположенных в пределах области интерполяции с радиусом  $R_{обл}$  и центром в данном узле. Если число отсчетов, попавших в пределы  $R_{обл}$ , не превышает двух, то используются дополнительные правила, описанные для случая конического сканирования.

#### *Модель КЭСН с продольным сканированием*

Рассматриваемый тип сканирования реализуется в системах с многолучевым радиометром, перемещаемым в заданном направлении с помощью платформы-носителя. В результате залета образуется набор из  $N = l \times m$  результатов измерений ( $m$  – число лучей радиометра,  $l$  – число «линеек» отсчетов) [1].

Координаты центров пятен для каждого луча антенны определяются исходя из положения в пространстве и углового положения луча.

Во всех трех рассмотренных типах сканирования лучом для имитации поступления на фильтр низкой частоты (ФНЧ) радиометра непрерывного сигнала в модели предусмотрено выполнение отсчетов в дополнительные моменты времени (в промежутках между соседними «основными» отсчетами) с дискретностью, определяемой диаметром пятна антенны на земной поверхности и задаваемым коэффициентом перекрытия пятен.

Сигналы на выходе ФНЧ формируются с требуемой дискретностью  $\Delta t$  только в моменты времени, соответствующие отсчетам.

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗЛУЧАЮЩИХ СВОЙСТВ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ**

Блок моделирования излучающих свойств подстилающей поверхности в модели радиотепловой КЭСН имитирует радиотепловое излучение различных участков земной поверхности, воспринимаемое радиометрической аппаратурой КЭСН летательного аппарата при получении текущего изображения.

В ходе исследования зависимости от рассматриваемой задачи использовались два подхода к моделированию земной поверхности. Первый подход связан с применением карты конкретного участка земной поверхности, над которым осуществляется моделируемый пролет ЛА, либо искусственно составляемой карты (ИСК) с конфигурацией объектов ограниченной формы, задаваемой системой уравнений и неравенств.

Карты конкретных участков земной поверхности нами широко использовались при моделировании по той причине, что они отражают широкий спектр элементов ОС для различных регионов (среднеевропейская часть страны, уральский регион, среднеазиатский регион), в которых проводились экспериментальные исследования по изучению характеристик излучения различных покровов, а также осуществлялись летные эксперименты с макетами радиотепловых КЭСН.

Второй подход, позволяющий абстрагироваться от конкретной карты участка земной поверхности и использующий для описания излучения земных покровов некоторое однородное поле с заданными статистическими характеристиками, применяется для получения ряда общих закономерностей, связанных с точностными характеристиками КЭСН.

При использовании первого подхода на основе картографической информации или данных аэрокосмической съемки строится цифровая модель подстилающей поверхности, включающая цифровую карту объектового состава (ЦКОС) и цифровую карту рельефа местности (ЦКРМ).

При моделировании излучательных свойств выбранного участка ЗП, описанного ЦКОС и ЦКРМ (построение радиотеплового аналога участка коррекции), каждый дискретный элемент заменяется точечным излучателем, помещенным в центр соответствующего элемента ЦКОС, индикатриса такого излучателя, как правило, описывается законом Ламберта (а также иными законами, например, для водной поверхности, увлажненных поверхностей и т. д.), ориентация определяется рельефом поверхности, а полная мощность излучения пропорциональна площади соответствующего дискретного элемента. Значения яркостной температуры выбираются из каталога и зависят от вида покрова, к которому принадлежит рассматриваемый элемент, и заданных внешних условий (термодинамической температуры, влажности и т. д.).

Каталог содержит список всех земных покровов, представленных на моделируемом участке поверхности, а также набор значений радиоярких температур для этих покровов, соответствующих различным сезонным и погодным условиям.

Рельеф моделируемого участка местности описывается двумерными сплайн-функциями, построенными с использованием высоты дискретных элементов, содержащихся в ЦМПП. При этом в качестве пространственной ориентации каждого дискретного элемента принимается пространственная ориентация касательной плоскости к поверхности сплайн-функции, проведенной в точке, совпадающей с центром соответствующего дискретного элемента.

С учетом того, что радиометрические КЭСН предлагается использовать в противоположность рельефометрическим системам, прежде всего в равнинных районах, где эффекты, обусловленные рельефом, незначительны, для упрощения анализа основных факторов, определяющих эффективность КЭСН, рельеф поверхности при проведении нами численных экспериментов на модели, как правило, не учитывался, и в качестве излучающей поверхности рассматривалась плоская поверхность, описываемая ЦКОС.

Искусственно задаваемые карты подстилающей поверхности удобно (целесообразно) использовать в тех случаях, когда для описания подстилающих поверхностей привлекаются хорошо разработанные электродинамические модели, например, типа полупространства с однородной диэлектрической проницаемостью и электропроводностью, параметрические модели и т. д.

Использование ИСК с привлечением подобных моделей позволяет, с одной стороны, решать модельные задачи и в случаях, когда недостаточно экспериментальных данных по характеристикам излучения подстилающей поверхности (анализ возможностей использования

поляризованного излучения, оценка эффективности частотных диапазонов, для которых отсутствуют экспериментальные данные и т. д.). С другой стороны, при использовании хорошо работающих моделей появляется возможность проводить более тонкие эксперименты по влиянию на эффективность КЭСН параметров, входящих в модели излучения различных объектов.

### *Моделирование влияния атмосферы на характеристики радиотепловой КЭСН*

Аналізу влияния атмосферы на перенос радиотепловых контрастов земных покровов и учету этого влияния в КЭСН посвящено множество работ. Нами анализ влияния атмосферы на эффективность КЭСН осуществлялся на описываемой модели радиотепловой КЭСН с помощью специально разработанного блока учета влияния атмосферы.

Разработанная модель излучения атмосферы (блок атмосферы) позволяет осуществлять анализ различных видов облачности и осадков на степень искажения радиоярких температур подстилающей поверхности, а также оценивать влияние атмосферы на перенос радиотепловых контрастов между различными объектами.

При моделировании обычной атмосферы использовано представление облака в виде трехслойной системы, каждый слой которой считается сплошным, имеющим водность и градиент температуры, постоянный по объему слоя.

Учет неоднородности свойств облачности вдоль трассы полета в модели осуществляется путем введения в излучение, поступающее в антенну, соответствующим образом формируемых мультипликативных и аддитивных помех.

## ЛИТЕРАТУРА

Моделирование радиотепловой КЭСН с многолучевым радиометром / В.В. Ауров, А.А. Гуревич, Л.П. Деренченко, В.И. Троицкий // Вопросы радиоэлектроники. Серия ОВРЭ. 1992. Вып. 5.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**Троицкий Владимир Иванович**, профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой физики Московского государственного университета геодезии и картографии, электронный адрес: v.troja@yandex.ru.

## DEVELOPMENT OF METHODS FOR MATHEMATICAL MODELING OF THE THERMAL CORRELATION-EXTREME NAVIGATION SYSTEM OF THE AIRCRAFT

**Vladimir I. Troitsky**

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia,  
v.troja@yandex.ru

## ABSTRACT

Reviewed simulation model of correlation-extreme navigation system (CASN) of the aircraft (A/C) using the microwave radiation of the earth's surface, allowing to optimize system performance, ranging from the kind of used signal and the diagram of the radiometer to the expected positional accuracy of CASN. The developed model consists of the simulation of the radiometer; block modelling the radiating properties of the underlying surface, the unit of account of the influence of the atmosphere; block kinematics modeling of the movement of the carrier, the characteristics of the antenna system and method of the review space; the unit for computing the coordinates. These model allows to estimate the information content and the stability of the radiation of the earth surface plot of the correction of the trajectory, the influence of

the atmosphere on thermal radiation transfer earth surface to the observation point; the parameters of the antenna system, the characteristics of the radiometer, affecting the output signal, the kinematics of the movements of the aircraft used by the coordinate determining algorithms.

**Key words:** navigation, modeling, microwave radiation, information, radiation of the earth's covers.

## REFERENCES

**Aurov V.V., Gurevich A.A., Terenchenko L.P., Troitsky V.I.** Modeling of thermal CASN multibeam radiometer. Questions of Radioelectronics, a series OWRE, 1992, vol. 5.