

УДК 535.8, 004.4

М.Ю. Катаев, А.В. Лончин, С.Т. Пенин

Пассивный самолетный микроволновый радиометр. Программа моделирования сигналов

В статье приводится описание программы моделирования сигналов пассивного самолетного радиометра в диапазоне 1–100 ГГц. Программа позволяет получать сигналы для произвольной точки Земли с учетом вариации атмосферных параметров и свойств земной поверхности.

Ключевые слова: пассивный микроволновый радиометр, самолетные методы, моделирование сигналов, учет рельефа и типов поверхности.

Введение

Изучение поверхности Земли может быть произведено следующими способами: пешеходным (наземным), самолетным или космическим [1]. Конечно же, первый вариант получается самым детальным и точным, так как позволяет непосредственно человеку определить оценку искомого фактора. Однако скорость получения информации таким способом и объем данных чрезвычайно малы. Поэтому в настоящее время спутниковые методики завоевали важное место при изучении поверхности Земли. Однако при получении огромных массивов данных по территории Земли спутниковым методам все равно не хватает точности решения различных задач (например, соленость и влажность почвы, определение количества биомассы и др.). Поэтому необходимо реализовывать последовательное решение задачи, связанное сначала с получением космической информации, уточнением ее с помощью уже самолетных методик (но уже обследуя существенно меньшие площади поверхности), и затем уже в известные части поверхности высаживать человека для подтверждения тех или иных результатов.

В данной статье кратко излагается описание программы для самолетных исследований поверхности Земли в микроволновом диапазоне спектра с помощью пассивного радиометра. Нами в работе рассматриваются известные диапазоны: L – 1–2 ГГц, S – 2–4 ГГц, C – 4–8 ГГц, X – 8–12 ГГц, Ku – 12–18 ГГц, K – 18–27 ГГц, Ka – 27–40 ГГц, V – 40–75 ГГц и W – 75–100 ГГц. В этом диапазоне спектра удастся более детально получать информацию о излучении поверхности и атмосферы, используя различные спектральные участки, чем в инфракрасной области спектра [2].

Описание эксперимента

Расположенный на самолете пассивный радиометр измеряет излучение, которое формируется на некотором участке поверхности, попадающем в поле зрения прибора (1).

Самолет пролетает по некоторой траектории полета над заданной территорией и проводит съемку величины излучения, приходящего на антенну радиометра. Как было сказано выше, это излучение зависит от многочисленных факторов, связанных с элементами поверхности (типы почв, растительности) и состоянием воздуха. В целом сигнал формируется за счет многих процессов, связанных с распространением микроволнового излучения в атмосфере. Основные источники излучений, формирующих сигнал, приведены на рисунке 1А [2].

Естественно, что величина сигнала зависит от типов поверхности, которые попадают в поле зрения прибора, рельефа местности и состояния атмосферы [3–5]. Еще одной особенностью, существенно влияющей на величину сигнала, является форма пятна обзора, которая зависит как от рельефа, так и от положения самолета в пространстве (рис. 2А). В зависимости от этого пятно обзора может иметь различные формы, как это показано на рисунке 2Б [5].

Изменение формы пятна, согласно рисунку 2Б, можно рассчитать с учетом всех особенностей полета самолета. Для этого необходимо рассчитать матрицу, которая учитывает эти особенности [6]:

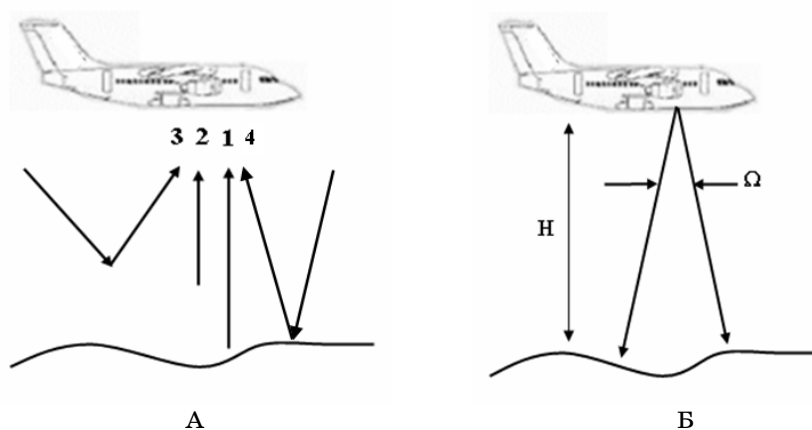


Рис. 1. Формирование сигнала пассивного самолетного радиометра. А – типы излучений, формирующих сигнал (1 – излучение поверхности, 2 – атмосферы, 3 – рассеянное в атмосфере и 4 – отраженное от поверхности) и Б – поле зрения прибора и захватываемая на поверхности область

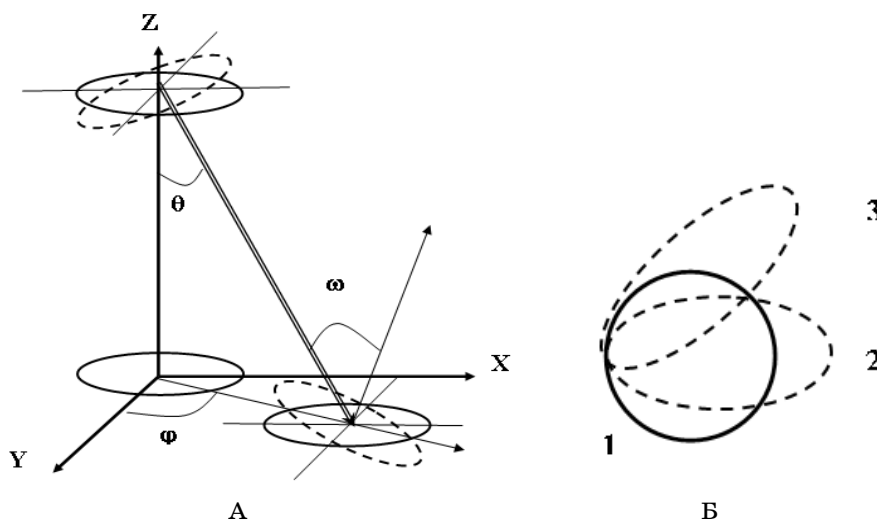


Рис. 2. Изменение формы пятна обзора на поверхности в зависимости от положения самолета и рельефа местности. А – геометрия изменений пятна обзора и Б – изменение круговой формы пятна обзора (1) в зависимости от различных наклонов самолета (2 и 3) при полете

$$M = M1 \cdot M2 \cdot M3 \cdot M4 \cdot M5 \cdot M6,$$

где $M1$ – матрица смещения пятна обзора по оси Y на высоту полета H , $M1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -H & 0 & 1 \end{bmatrix}$;

$M2$ – матрица вращения на угол θ вокруг оси X (крен самолета), $M2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$;

$M3$ – матрица вращения на угол ψ вокруг оси Z (тангаж самолета), $M3 = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$;

$$M4 - \text{матрица смещения по оси } Y \text{ на высоту полета } H, M4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & H & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$M5 - \text{матрица проекции на плоскость } Y=0, M5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & tg\theta/H \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & tg\theta/H \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$M6 - \text{матрица вращения на угол } \mu \text{ вокруг оси } Y \text{ (курс самолета), } M6 = \begin{bmatrix} \cos\mu & 0 & \sin\mu & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\mu & 0 & \cos\mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Анализ литературы позволил выделить основные составляющие сигнала из четырех, показанных на рисунке 1, которые связаны с излучением поверхности и атмосферы (рис. 1А). Уравнение для прохождения неполяризованного излучения в атмосфере может быть представлено в виде двух слагаемых излучения, генерируемого поверхностью Земли и атмосферой [5]:

$$I(\nu) = I_{surf}(\nu) + I_{atm}(\nu) = \varepsilon(\nu)B(\nu, T_{surf})\tau(\nu, H) + \int_{H_{surf}}^H B(\nu, T(h))\alpha_{\Sigma}(\nu, T(h))\tau(\nu, h)dh, \quad (1)$$

здесь ε – коэффициент излучения на частоте ν , B – функция Планка и τ – пропускание атмосферы:

$$\tau(\nu, h) = \exp\left\{-\int_{H_{surf}}^h \alpha_{\Sigma}(\nu, T(h'))dh'\right\} = \exp\left\{-\int_{H_{surf}}^h (\alpha_{gas}(\nu, T(h')) + \alpha_{cont}(\nu, T(h')) + \alpha_{aer}(\nu, T(h'))))dh'\right\}, \quad (2)$$

где α_{Σ} – суммарный коэффициент ослабления, α_{gas} , α_{cont} , α_{aer} – коэффициенты ослабления за счет поглощения газами на данной частоте ν и данной высоте h , континуального поглощения H_2O и ослабления аэрозолями.

Коэффициент ослабления газами зависит от коэффициента поглощения K и профиля концентрации ρ :

$$\alpha_{gas}(\nu, T(h)) = \sum_{j=1}^{Ng} K_j(\nu, T(h))\rho_j(h),$$

здесь Ng – количество газов в воздухе.

Сигнал пассивного радиометра рассчитывается как свертка [3, 4]:

$$S = \int_{\Delta\nu} \int_{\Omega} I(\nu') A1(\nu - \nu') A2(\omega) d\omega d\nu', \quad (3)$$

где $A1$ – спектральная аппаратная функция радиометра для некоторого спектрального разрешения $\Delta\nu$ и $A2$ – угловая аппаратная функция прибора в секторе Ω .

Для моделирования накопления сигнала за заданный промежуток времени используется формула:

$$\hat{S} = \int_{\Delta t} S(t) dt,$$

где Δt – промежуток времени накопления (например, 1 сек.), который связан со скоростью полета самолета и решаемой задачи.

Описание программы

Блок-схема программы приведена на рисунке 3. Для расчета пропускания, по формуле (2), необходимо привлечь соответствующую информацию о аэрозоле на высотнo-частотной

сетке ($z \times v$), где z – высота и v – частота $\{z_i, v_j\}$, метеорологии (температуре и давлении) [7] на пространственно-временной сетке ($t \times L_x \times L_y$), коэффициентах поглощения газов, которые заранее рассчитаны и хранятся в определенном формате и профилях концентрации газов (N_g – количество газов, для которых рассчитаны коэффициенты поглощения). Метеорологическая информация дана в формате NetCDF [8]. Для расчета уравнения прохождения микроволнового излучения в атмосфере необходимо иметь информацию о типах поверхности и коэффициентах излучения [9], а также рельефе (карта превышения высот над уровнем моря). Для решения различных практических задач нами введен модуль «Объект», который рассчитывает вид искомого излучения и определяется конкретной задачей.

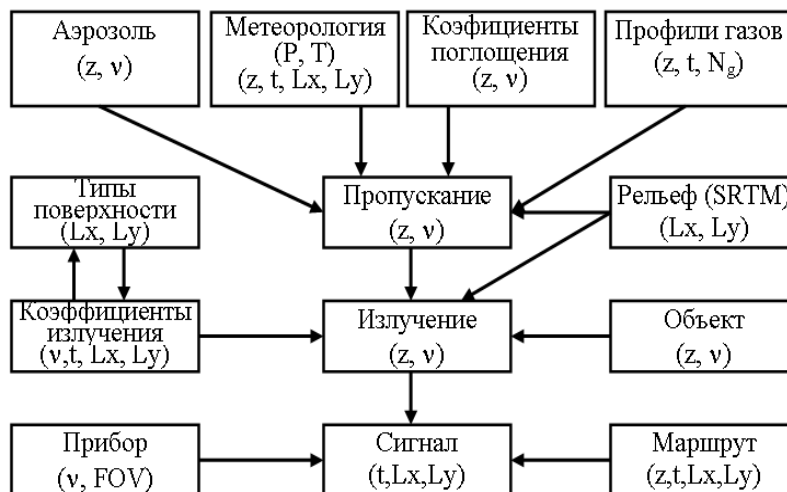


Рис. 3. Блок-схема программы как набор взаимосвязанных расчетных модулей

Для расчета сигнала прибора по выражению (3) необходимо иметь данные о поле зрения прибора и маршруте движения самолета. В качестве типов маршрутов нами в данной версии программы введены такие: прямая, окружность, зигзаг (синусоидальной формы) и маршрут, введенный пользователем.

SRTM (Shuttle radar topographic mission) [10] – осуществленная в феврале 2000 г. с борта космического корабля многоразового использования «Шаттл» радарная интерферометрическая съемка поверхности земного шара [11]. Данные распространяются в файлах, на сетке с размером ячейки 3 угловые секунды (дискретностью высот 1 м и пространственным разрешением 90х90 м). Файлы данных представляют собой матрицу из 3601х3601 значений, которая может быть импортирована в различные программы построения карт и геоинформационные системы. Для правильного вычисления величины сигнала необходимо точно указывать величину и форму площадки поверхности, которая формирует сигнал, как это показано на рисунке 4.

Для простоты примем апертуру приемника радиометра квадратной, тогда расчет величины истинной площадки ($x \times y$) с учетом высоты местности (см. рис. 4) можно провести по формулам:

$$X = H \cdot \operatorname{tg}(\theta), \quad dx = h \cdot \operatorname{tg}(\gamma_1); \quad x = X - dx,$$

$$Y = H \cdot \operatorname{tg}(\theta), \quad dy = h \cdot \operatorname{tg}(\gamma_2); \quad y = Y - dy,$$

здесь γ_1 – угол наклона поверхности, попадающей в пятно обзора, и γ_2 – угол поворота площадки относительно направления на север.

База данных глобальных характеристик земного покрова (CORINE Land Cover (CLC)) разработана Объединенным исследовательским центром Европейской комиссии на основе обработки данных спутников (CORINE Programme – Co-ordination of Information on the Environment) AVHRR и MODIS с пространственным разрешением 0,1 и 1 км. В базе CLC хранятся данные о 50 типах покрова [11].

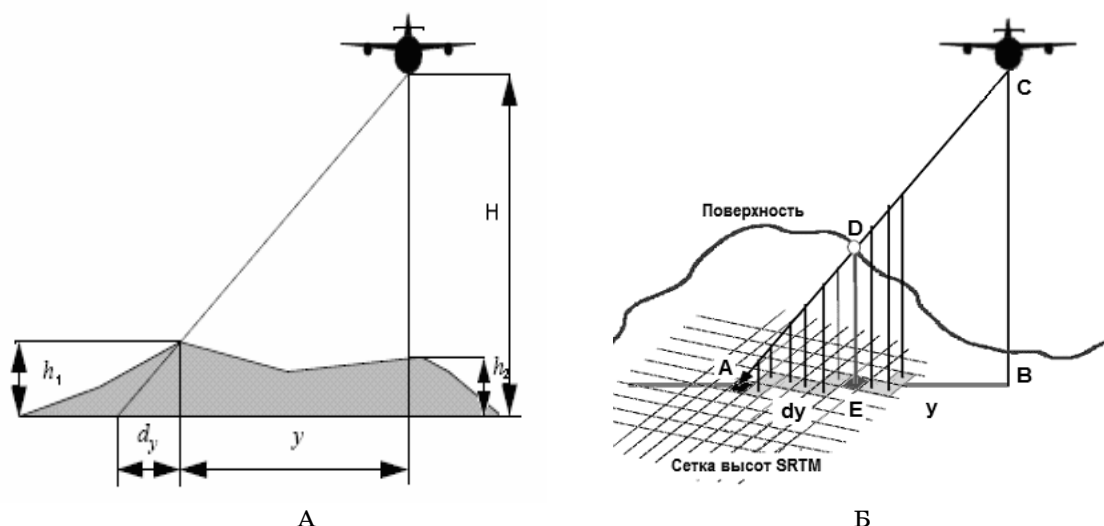


Рис. 4. Схема определения реальной координаты угловой точки окна сканирования. А – геометрия расчетов, Б – учет превышений высот для выбора соответствующей информации из базы SRTM

Коэффициенты поглощения рассчитаны методом Line-By-Line на основе спектроскопических характеристик газов из базы HITRAN [12]. Коэффициенты заранее рассчитаны для высотного диапазона 0–10 км с шагом по высоте 1 км и для всего частотного диапазона, а также трех значений температуры. Таким образом, дальнейшее применение таблиц связано с линейной интерполяцией коэффициентов поглощения на данной высоте и температуры, поступающей из модуля «Метеорология».

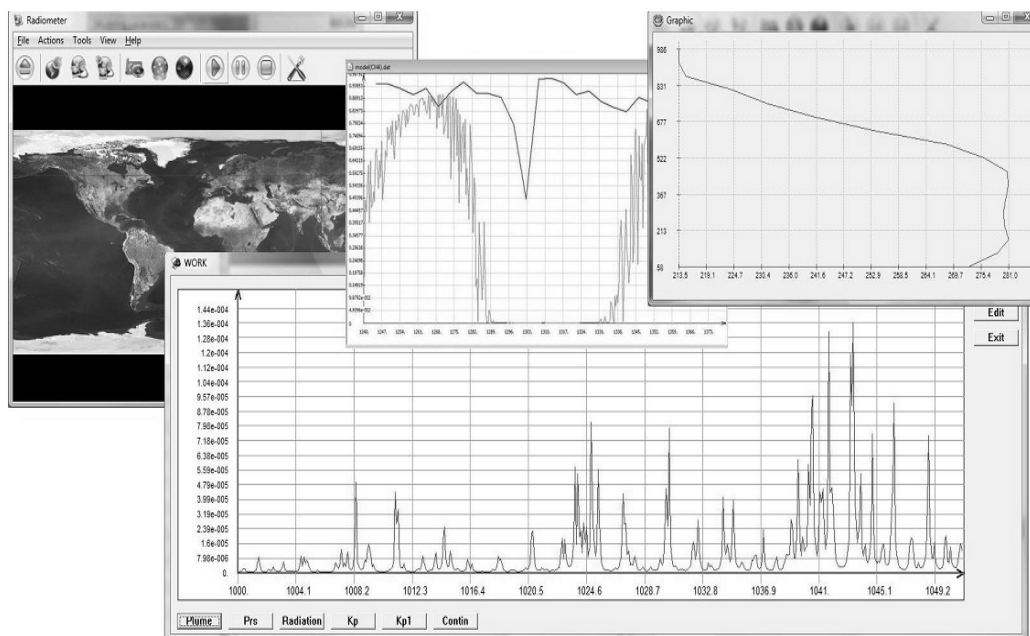


Рис. 5. Внешний вид программы, где приведен в левом верхнем углу интерфейс программы и набор графиков расчетов различных параметров

Результаты моделирования

На основе функциональной блок-схемы и набора данных нами была написана программа на языке C++ (IDE MS Visual Studio 2005). Внешний вид интерфейса основного окна и графическое представление результатов расчетов приведены на рисунке 5. В программе работа

начинается с задания региона (широты и долготы), типа маршрута (высоты, времени полета, количества поворотов, углов), сезона года, времени, набора газов, определяющих сигнал. Для того, чтобы сконцентрировать внимание на анализе результатов расчета, введено автоматическое задание параметров, по некоторым сценариям и пользователь вправе выбрать сценарий полета и измерений, а потом сделать необходимые поправки. Результаты работы представляются как в графическом, так и в табличном видах.

Заключение

В результате проделанной нами работы разработана программа моделирования сигналов пассивного микроволнового радиометра для территории всей планеты с учетом особенностей изменения рельефа, типов поверхности, метеорологических параметров в течение года. Учет этих изменений позволит оценить степень влияния того или иного параметра на измеряемые сигналы и соответственно повысить точность разрабатываемых методик решения обратной задачи и приборных характеристик.

Литература

1. Joint characterization of the vegetation by satellite observations from visible to microwave wavelengths: A sensitivity analysis / C. Prigent, F. Aires, W.B. Rossow, E. Matthews // *Journal of Geophysical Research*. – 2001. – Vol.106, D 14. – P. 14.887–14.907.
2. Matzler C. Radiative transfer models for microwave radiometry // COST action 712, Final report of project 1, European commission. – 2000, EUR 19543. – 106 p. – ISBN 92-828-9842-2.
3. Land cover-based optimal deconvolution of PALS L-band MW brightness temperatures / A.S. Limaye, W.L. Grosson, C.A. Laymon, E.G. Njoku // *Remote sensing of Environmental*. – 2004. – Vol.92. – P. 497–506.
4. Billigs S. Modeling detector response in airborne gamma-ray spectrometry / S. Billigs, J. Hovgaard // *Geophysics*. – 1999. – Vol.64, N.5. – P. 1378–1392.
5. Pulvirenti L. Topographic effects on the surface emissivity of a mountainous area observed by a spaceborne microwave radiometer / L. Pulvirenti, N. Pierdicca, F.S. Marzano // *Sensors*. – 2008. – №8. – P. 1459–1474.
6. Прэтт У. Цифровая обработка изображений : в 2-х кн. / под ред. Д.С. Лебедева. – М. : Мир, 1982. – 620 с.
7. A comparison of the ECMWF, MSC and NCEP global ensemble prediction systems / R. Buizza, P.L. Houtekamer, Z. Toth, G. Pellerin, M. Wei, Y. Zhu // *Monthly weather review*. – 2005. – Vol.133. – P. 1076–1097.
8. Формат хранения научных данных NetCDF [Интернет ресурс]. – Режим доступа : <ftp://ftp.unidata.ucar.edu/pub/netcdf/>, свободный.
9. A global simulation of microwave emission: error structures based on output from ECMWF's operational integrated forecast system / T. Holmes, M. Drush, J.-P. Wigneron, R. de Jeu // *J. Appl. Meteorol.*, 2004. – V. 43. – P. 1282–1294.
10. The shuttle radar topography mission / T.G. Farr, S. Hensley, E. Rodriguez, J. Martin, M. Kobrick // *CEOS SAR Workshop*. – Toulouse 26–29 Oct. 1999 ; Noordwijk, 2000. – P. 361–363.
11. Belward A.S. The IGBP-DIS Global 1-km Land-Cover Data Set DISCover: A Project Overview / A.S. Belward, J.E. Estes, K.D. Kline // *Photogram. Eng. Remote Sens.*, 1999. – Vol.65. – P. 1013–1020.
12. The HITRAN Molecular Spectroscopic Database and HAWKS: 1996 Edition / L.S. Rothman, C.P. Rinsland, A. Goldman, S.T. Massie et al. // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. – 1998. – Vol.60, №5. – P. 665–710.

Катаев Михаил Юрьевич

Доктор техн. наук, профессор кафедры автоматизированных систем управления (АСУ) ТУСУРа

Тел.: (3822) 41-31-57, 41-31-91

Эл. почта: kmy@asu.tusur.ru

Лончин Алексей Владимирович

Аспирант кафедры автоматизированных систем управления (АСУ) ТУСУРа

Пенин Сергей Тимофеевич

Канд. физ.-мат. наук, ст. н. с. Института оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Тел.: (3822) 49-15-46

Эл. почта: penin@iao.ru

M.Yu. Kataev A.V. Lonchin , S.T. Penin

Passive microwave airplane radiometer. The program of the signals modeling

In article the description of the program of signals modeling of the passive aeroplane radiometer in a range of 1–100 GHz is presented. The program allows receiving signals for any point of the Earth in view of a variation of atmospheric parameters and properties of a terrestrial surface.

Keywords: passive microwave radiometer, aeroplane methods, signal modeling, relief and land types.
