

Ошибки измерений компенсационного микроволнового радиометра при исследовании быстропротекающих радиотепловых процессов

А. В. Убайчин, А.В. Щегляков, Г.Г., Т.Абдирасулуулу, Д.В. Щепин

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.
E-mail: anton.v.ubaychin@tusur.ru*

Показаны особенности и проблематика измерений компенсационным радиометром параметров быстропротекающих радиотепловых процессов. Разработана численная модель ошибок измерений компенсационного радиометра. Приведены результаты математического моделирования по оценке влияния аномальных флуктуаций коэффициента передачи, ширины рабочей полосы частот, шумовой температуры антенны и собственных шумов приемника на быстроедействие компенсационного радиометра. Проведена оценка факторов повышения быстрогодействия компенсационного радиометра за счет улучшения технологических параметров приемника и бюджета разработки.

Ключевые слова: быстропротекающие радиотепловые процессы, компенсационный радиометр, математическое моделирование, ошибки измерений, микроволновая радиометрия

Measurement errors of the compensation microwave radiometer in the research of fast radio-thermal processes

A. V. Ubaychin, A.V.Scheglyakov, T.Abdirasuluulu, D.V. Schepin

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

Features and problems of fast radio-thermal processes measurements by a full-power radiometer are described. A numerical model of the errors of the full-power radiometer is developed. The results of mathematical modeling of the effect of anomalous fluctuations, of the operating frequency band, of the antenna noise temperature and the own noise of the receiver on the measurement rate of the full-power radiometer are presented. The factors of increasing the performance of the full-power radiometer by improving the technological parameters of the receiver and the development budget are estimated.

Keywords: fast radio-thermal processes, compensation radiometer, mathematical modeling, measurement errors, microwave radiometry

Введение

Как правило физическая температура исследуемых в дистанционном зондировании объектов изменяется сравнительно медленно – необходим достаточно длительный временной интервал для измерения физической температуры подстилающей поверхности на значимую величину (порядка одного градуса и более) [1]. Уровень собственного шумового электромагнитного излучения, являясь функцией в том числе и физической температуры объекта, изменяется с аналогичной скоростью. В связи с этим принято считать, что при пассивном дистанционном зондировании природных сред средствами микроволновой радиометрии проводится исследование стационарных объектов со сравнительно медленно меняющимися параметрами собственного электромагнитного излучения.

Однако, при исследовании стационарных и квазистационарных объектов существуют ситуации, когда происходит сравнительно быстрое изменение параметров шумового излучения, например, в дистанционном зондировании при пролете спутника или другого носителя над границей раздела сред подстилающей поверхности (вода-суша), наблюдении излучения плазмы, вспышечной активности на Солнце и других высокотемпературных объектов, быстром перемещении микроволнового радиометра при исследовании объектов в ближней зоне антенны (медицинские приложения) или решении задачи повышения быстродействия систем пассивного радиовидения и т.д. В упомянутых выше примерах пассивных исследований, быстрые изменения шумового излучения описываются функциями Хевисайда, кардинального синуса и т.д. [2].

Флуктуационная чувствительность является одним из основных технических параметров микроволновых радиометров и нормируется к одной секунде [3]. Факт нормирования связан с обширной группой факторов, в том числе с постоянной времени интегратора, значение которой выбирается порядка одной секунды [4]. Очевидно, что исследование радиотепловых процессов, длительность или изменение характеристик которых соизмеримы с постоянной времени интегратора микроволнового радиометра, с метрологической точки зрения требует обстоятельной проработки – величина ошибок измерений и их длительность соизмерима с величиной изменения уровня и длительности измеряемого сигнала. Частный случай численного моделирования измерения параметров быстропротекающего радиотеплового процесса компенсационным радиометром показан на рис.1.

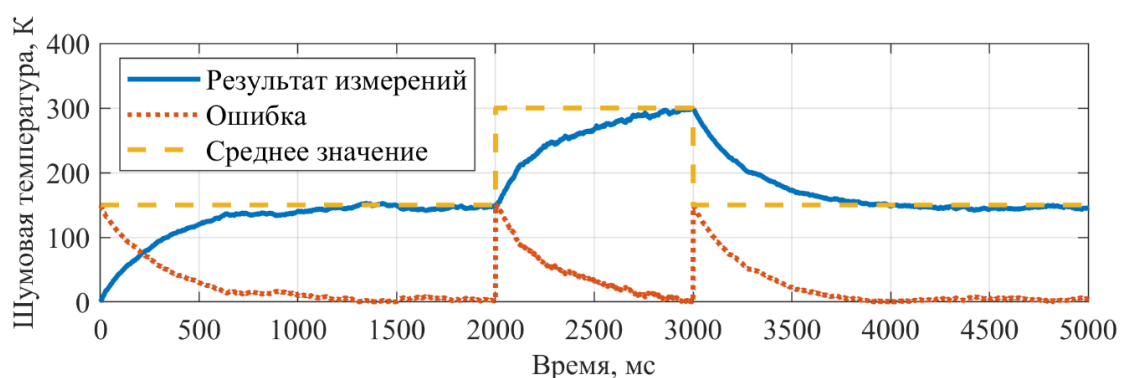


Рис. 1. Результаты численного моделирования измерений компенсационным радиометром быстропротекающего радиотеплового процесса.

Для численного моделирования использованы следующие параметры приемника компенсационного радиометра: постоянная времени интегратора 0,3 с, шумовая температура антенны 150 К, величина изменения шумовой температуры антенны 150 К, длительность изменения шумовой температуры антенны 1 с. В численном моделировании использован идеальный радиометрический приемник без учета аномальных флуктуаций коэффициента передачи.

На рассмотренном на рис.1 примере показано, что абсолютное значение максимальной ошибки измерений достигает 150 К, при изменении шумовой температуры антенны от 150 К до 300 К.

Очевидно, что исследование быстропротекающих радиотепловых процессов приводит к возникновению сравнительно больших ошибок в измерениях. В связи с этим актуальны вопросы оценки этих погрешностей измерений и оценки методов повышения динамических свойств радиометрических систем.

В представленной работе показаны результаты численного и математического моделирования в задаче повышения быстродействия компенсационного микроволнового радиометра.

Математические модели

Для моделирования использованы классические способы описания компенсационных микроволновых радиометров. Математическая модель для описания флуктуационной чувствительности достаточно широко освещена в литературе [5-8]:

$$\Delta T_A = (T_A + T_N) \cdot \sqrt{\frac{1}{\Delta f \cdot \tau} + \left(\frac{\Delta G}{G}\right)^2}, \quad (1)$$

где T_N – уровень собственных шумов приемника;

T_A – шумовая температура антенны;

Δf – ширина рабочей полосы частот;

τ – постоянная времени интегратора;

отношение $\Delta G/G$ – величина приведенных аномальных флуктуаций коэффициента передачи радиометрического приемника, обусловленных шумами вида $1/f$.

Для численного анализа интегратора, выполненного на основе RC-цепи с постоянной времени τ использовано выражение, описывающее его импульсную характеристику [9]

$$h(t) = 1/\tau e^{-t/\tau}. \quad (2)$$

Массивы с результатами численного моделирования сформированы с использованием встроенных функции генератора псевдослучайных последовательностей в среде математического и численного моделирования Matlab.

Результаты моделирования

Оценка выражения (1) по определению флуктуационной чувствительности позволяет сделать вывод о зависимости параметра τ от группы факторов, определяющих уровень флуктуационной чувствительности. К таковым относятся шумовая температура антенны, величина собственных шумов приемника, ширина рабочей полосы частот и величина аномальных флуктуаций коэффициента передачи. На рис.2 показаны результаты математического моделирования зависимости флуктуационной чувствительности от величины постоянной времени интегратора. При моделировании использованы следующие параметры приемника: уровень собственных шумов приемника – 150К, шумовая температура антенны – 300К, ширина рабочей полосы частот – 20 МГц, диапазон аномальных флуктуаций коэффициента передачи – 0...0,01.

Для качественной оценки проведем анализ зависимости флуктуационной чувствительности от величины собственных шумов приемника. Результаты математического моделирования приведены на рис.3

Результаты моделирования, представленные на рис.3 получены путем изменения уровня собственных шумов приемника от 50 К до 300 К. Анализ выражения (1) показывает, что изменение шумовой температуры антенны влияет на постоянную времени интегратора.

На рис.4 показано влияние ширины рабочей полосы частот на флуктуационную чувствительность.

Результаты моделирования, показанные на рис.4, получены для следующих параметров приемника: шумовая температура антенны – 300 К, шумовая температура приемника – 150К, ширина рабочей полосы частот изменялась от 1 мкс до 1 мс.

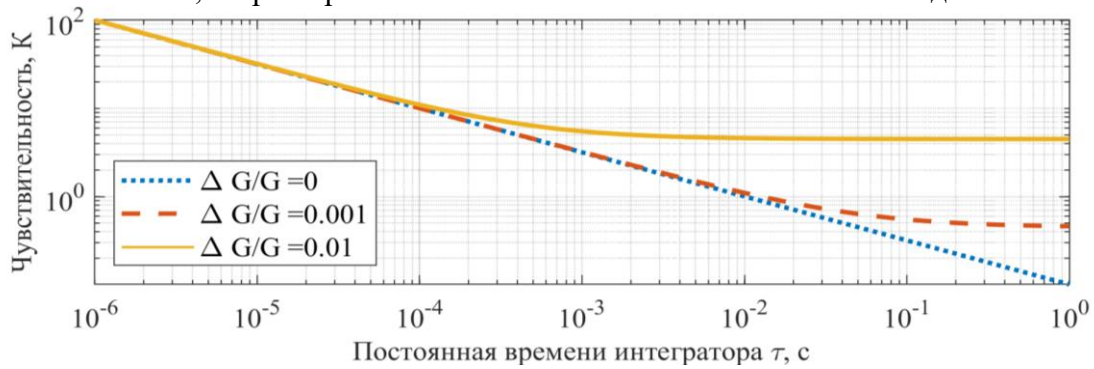


Рис. 2. Зависимость флуктуационной чувствительности от величины постоянной времени.

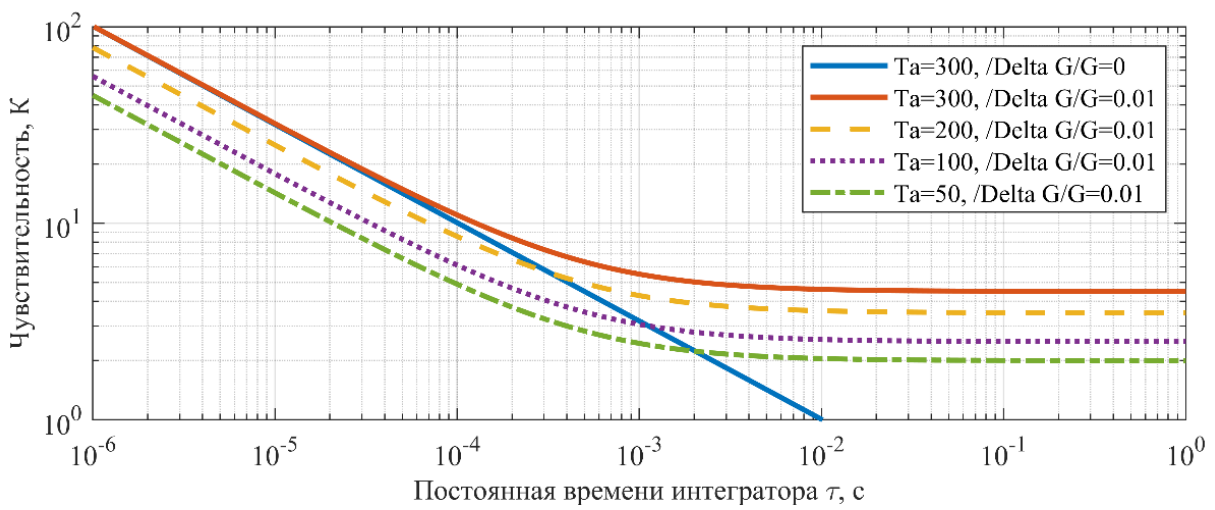


Рис.3. Зависимость флуктуационной чувствительности от величины постоянной времени интегратора при различных шумовых температурах антенны.

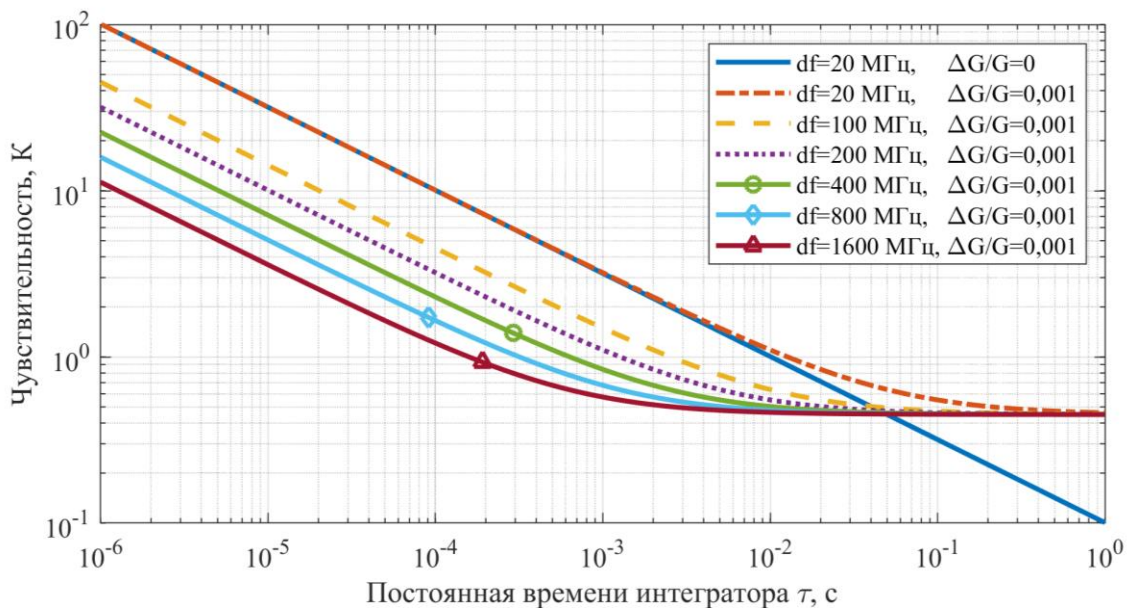


Рис.4. Зависимость флуктуационной чувствительности от ширины рабочей полосы частот антенны

Обсуждение результатов

Быстрые радиотепловые процессы приводят к ошибкам в результатах измерений, сопоставимых с результатами измерений. Этот факт обусловлен импульсной характеристикой используемого интегратора (2), основным параметром которого является постоянная времени. Сравнительно быстрые изменения шумовой температуры (менее трех постоянных времени и сопоставимы величины) приводят к значительным искажениям результатов измерений – величина ошибки может достигать 100%. Уменьшение постоянной времени интегратора для повышения быстродействия приводит к ухудшению флуктуационной чувствительности.

Классическое математическое описание флуктуационной чувствительности компенсационного радиометра и результаты проведенного моделирования показывают, что величина аномальных флуктуаций определяет уровень быстродействия компенсационного радиометра в области сравнительно больших значений постоянной времени. В области малых времен, когда влияние аномальных флуктуаций по сравнению с величиной радиометрического выигрыша сравнительно мало, компенсационный радиометр можно считать идеальным – вклад аномальных флуктуаций по сравнению с радиометрическим выигрышем мал.

В результате уменьшения шумовой температуры антенны быстродействие компенсационного радиометра возрастает в области малых и больших значений постоянной времени интегратора. Аналогичным образом на быстродействие влияет величина собственных шумов приемника.

Увеличение ширины рабочей полосы частот приводит к повышению быстродействия в области малых значений постоянной времени интегратора.

При любых значениях технических параметров радиометрического приемника, в виду влияния аномальных флуктуаций коэффициента передачи, в области больших значений постоянной времени ее увеличение не приводит к значимому улучшению быстродействия компенсационного радиометра.

Выводы

Измерение параметров быстропротекающих (с длительностью порядка трех постоянных времени интегратора и менее) радиотепловых процессов компенсационным радиометром приводит к ошибкам, абсолютное значение которых сопоставимо с величиной результата измерений.

Уменьшение постоянной времени интегратора в задаче повышения быстродействия (снижения ошибок измерений) приводит к ухудшению флуктуационной чувствительности.

В области малых величин постоянной времени интегратора любой компенсационный радиометр является идеальным. Величина аномальных флуктуаций коэффициента передачи определяет порог значения постоянной времени, после превышения которого ухудшение уровня быстродействия не приводит к значимому увеличению флуктуационной чувствительности (флуктуационная чувствительность остается на практически постоянном уровне).

Уменьшение уровня собственных шумов приемника аналогично шумовой температуре антенны приводит к повышению быстродействия во всем диапазоне значений постоянной времени интегратора.

Увеличение ширины рабочей полосы частот приводит к повышению быстродействия в области малых значений постоянной времени. Увеличение ширины рабочей полосы частот в области больших времен не приводит к значимому увеличению быстродействия в виду влияния аномальных флуктуаций коэффициента передачи.

Для повышения быстродействия компенсационного радиометра необходимо снижение уровня собственных шумов приемника, увеличение рабочей полосы частот до сотен мегагерц, и предельное уменьшение уровня флуктуаций коэффициента передачи.

Возможность улучшения параметров приемника определяется существующим уровнем технологических возможностей и бюджетом разработки микроволнового радиометра. Для дальнейшего улучшения быстродействия микроволновых радиометров при сохранении заданного уровня ширины рабочей полосы частот и флуктуационной чувствительности необходима разработка новых методов и подходов радиометрических измерений, позволяющих нивелировать влияние аномальных флуктуаций коэффициента передачи приемника, уровня его собственных шумов и шумовой температуры антенны.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-00168, <https://rscf.ru/project/21-79-00168/>

Литература

1. В. М. Степаненко, И. А. Репина, В. Э. Федосов, С. С. Зилитинкевич, В. Н. Лыкосова Обзор методов параметризации теплообмена в моховом покрове для моделей земной системы // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2020. – Том 56. – № 2. – С. 127–138.
2. Ubaichin A., Surzhikov A. Dynamics of internal thermal processes in dielectric materials and the method of its measurement in microwave hyperspectral mode // Materials Science Forum. – 2019. – Vol. 942. – pp. 151-161.
3. Hersman M.S., Poe G.A. Sensitivity of the total power radiometer with periodic absolute calibration // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1981. – Vol. 29. – No. 1. – pp. 32-40.
4. Kaisti M., Altti M., Poutanen T. Radiometric resolution analysis and a simulation model // Remote Sensing. – 2016. – Vol. 8. – No. 2. – p. 85.
5. Meissner T., Wentz F., Scot J., Vazquez J. Sensitivity of ocean surface salinity measurements from space borne L-band radiometers to ancillary sea surface temperature // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2016. – Vol. 54. – No. 12. – pp. 7105 -7111.
6. Tanner A.B., Riley A.L. Design and performance of a high-stability water vapor radiometer // Radio Science. – 2003. – Vol. 38. – No. 3. – pp. 15-1-15-11.
7. Ubaychin A.V., Abdirasul T., Zhuk G. Microwave radiometer for sensor systems with self-contained power supplies // Sensor review. – 2020 .Vol. – 40. – Is. 3. – P.P: 329-334. DOI: 10.1108/SR-11-2019-0273.
8. Ubaychin A.V. Microwave radiometer based on zero measurement method for onboard remote sensing of natural mediums// Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa. – 2019. –Vol. 16. – Is. 4. – P.P. 9-16. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-9-16.
9. Убайчин А.В., Филатов А.В. Многоприемниковые микроволновые радиометрические системы на основе модифицированного метода нулевых измерений. Томск: Изд. ТУСУР, 2014. 154 с.