

УДК 621.317.089.6

Методика определения метрологических характеристик зондовой установки для измерения параметров рассеяния изделий СВЧ наноэлектроники на подложке

¹ Савин А. А.

¹ *Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
пр. Ленина, 40, Томск, 634050, Российская Федерация
savin@tusur.ru*

Получено: 9 февраля 2019 г.

Отрецензировано: 20 февраля 2019 г.

Принято к публикации: 3 марта 2019 г.

Аннотация: *Представлена методика определения метрологических характеристик зондовой системы измерения параметров рассеяния пассивных и активных устройств на полупроводниковой подложке. Основная идея состоит в оценивании эффективных параметров и определении точности полученных оценок. Реализация идеи базируется на специальной технологии фильтрации при обработке верификационных измерений и сигма-точечном преобразовании при исследовании качества верификационного набора, состоящего из одной линии передачи, которая может быть изготовлена на пластине с устройствами.*

Ключевые слова: *векторный анализатор цепей, зондовая станция, измерения на подложке, линия передачи, верификация, эффективные параметры, сигма-точечное преобразование.*

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Савин А. А. Методика определения метрологических характеристик зондовой установки для измерения параметров рассеяния изделий СВЧ наноэлектроники на подложке // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2019. Т. 2, № 1. С. 60—70.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Савин, А. А. Методика определения метрологических характеристик зондовой установки для измерения параметров рассеяния изделий СВЧ наноэлектроники на подложке / А. А. Савин // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2019. — Т. 2, № 1. — С. 60—70.

Method of metrological characteristics determination of probe system for wafer-level S-parameters measurement of microwave nanoelectronic devices

A. A. Savin¹

¹ Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
40, Lenina Str., Tomsk, 634050, Russian Federation
saasavin@mail.ru

Received: February 9, 2019

Peer-reviewed: February 20, 2019

Accepted: March 3, 2019

Abstract: *The method for determining the metrological characteristics of the probe system for the scattering parameter measurements of passive and active devices on a semiconductor substrate is presented. The main idea is to estimate the residual errors and determine the accuracy of the obtained estimates. The implementation of the idea is based on a special filtration technology by the processing of verification measurements and unscented transformation for the study of the quality of a verification set which consists of a single transmission line that can be made on a substrate with devices.*

Keywords: *vector network analyzer, probe station, on-wafer measurements, transmission line, verification, residual errors, unscented transformation.*

For citation (IEEE): A. A. Savin, "Method of metrological characteristics determination of probe system for on-wafer S-parameters measurement of microwave nanoelectronic devices," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 2, no. 1, pp. 60–70, 2019. (In Russ.). doi: 10.15826/icrt.2019.02.1.06

1. Введение

При разработке радиоэлектронных систем и устройств с помощью современных математических пакетов чрезвычайно важно иметь точную информацию о параметрах используемых полупроводниковых приборов, чипов, монолитных интегральных схем. Кроме этого точные и достоверные СВЧ измерения на подложке позволяют существенно снизить производственные расходы. В этой связи задача обеспечения точности и единства (прослеживаемости) измерений электрических параметров приборов, изготовленных на полупроводниковой подложке, является крайне актуальной.

Система измерения электрических параметров элементов на подложке состоит из стандартных радиоизмерительных приборов и зондовой станции, позволяющей подключить приборы к исследуемому устройству. Параметры рассеяния и импеданс измеряют с помощью векторных анализаторов цепей (ВАЦ). Современные зондовые станции обеспечивают высокую механическую повторяемость точек контакта. Точность позиционирования находится на уровне до 1 мкм при достаточно высокой стабильности усилия прижатия. Калибровочные пластины обеспечивают плоскость калибровки в области чувствительных элементов зондов и заданный импеданс калиброванной системы. Несмотря на достигнутые теоретические и практические результаты, сведения о точности описания существующих калибровочных пластин отсутствуют. Одной из первых отечественных работ с постановкой проблемы разработки и исследования унифицированных средств и методов обеспечения единства измерений параметров изделий на подложках и определения точности измерений является статья [1].

В данной работе рассмотрена методология подтверждения метрологических характеристик калиброванной системы измерения параметров рассеяния устройств на подложке, основанная на модели системы с эффективными параметрами и их разделении во временной области.

2. Описание методики

Основные этапы исследования и подтверждения метрологических характеристик измерительной системы показаны на рис. 1 и по порядку пронумерованы от 1 до 6.

На этапе 1 необходимо задать требуемые параметры линии и определить их статистические свойства (допуски технологии изготовления). Далее следует изготовить линию (этап 2). После изготовления верификационной линии выполняются калибровочные измерения: а) коэффициент отражения (КО) со стороны первого порта линии (второй порт линии работает в режиме холостого хода (XX)) Γ_1 ; б) полная матрица S-параметров при подключении к линии двух зондов; в) КО со стороны второго порта линии (первый порт линии работает в режиме XX) Γ_2 . Минимальное количество манипуляций обеспечивает следующая последовательность действий: а) подключение зонда первого порта ВАЦ; б) подключение зонда второго порта ВАЦ; в) отключение зонда первого порта ВАЦ (см. рис. 2).

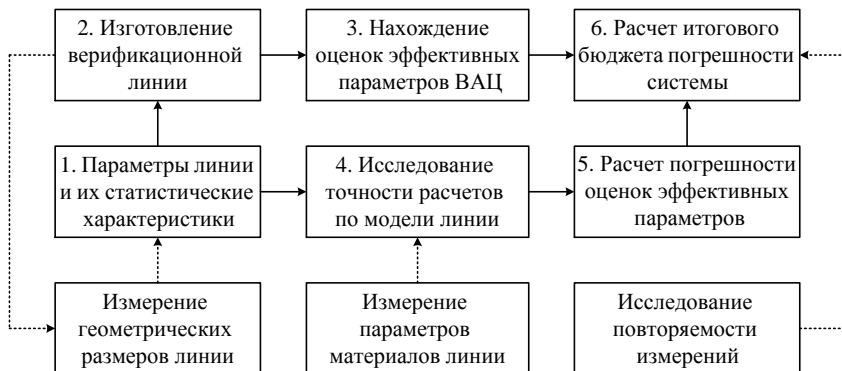


Рис. 1. Этапы исследования и подтверждения метрологических характеристик.

Fig. 1. Stages of the metrological characteristics investigation and confirmation

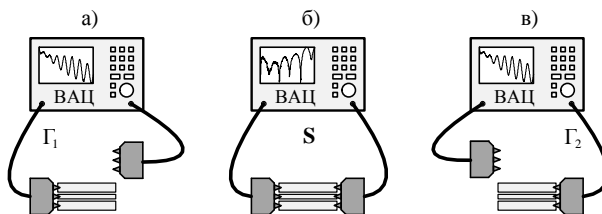


Рис. 2. Последовательность действий на этапе получения калибровочных данных.

Fig. 2. Sequencing of actions at the stage of calibration data obtaining

Нахождение оценок эффективных параметров ВАЦ на этапе 3 выполняется с помощью адаптивного алгоритма, описанного в [2] и использующего технологию фильтрации, разработанную в [3]. Поскольку в алгоритме используется модель линии, то следующим этапом необходимо исследовать точность модели. Этап 4 выполняется при помощи сигма-точечного преобразования, позволяющего перейти от погрешности информации по конструкции линии к погрешности расчета ее электрических характеристик [4]. Затем, используя метод линеаризации, выполняется расчет среднеквадратического отклонения (СКО) оценок эффективных параметров (этап 5). Здесь необходимо знать методическую погрешность алгоритма фильтрации [2], которая получена моделированием с помощью статистических испытаний (метод Монте-Карло). Имея оценки эффективных параметров и их СКО, выполняется расчет итогового бюджета погрешности измерительной системы [5, 6]. При увеличении эффективных параметров используется коэффициент $k=2$ (95 % доверительной вероятности в предположе-

нии гауссовской плотности распределения вероятностей). Отметим, что алгоритм фильтрации [2] позволяет найти векторные оценки эффективных параметров, которые можно использовать для повышения точности измерений (коррекция второго уровня). Данный вопрос рассмотрен в [7].

Помимо основных этапов, перечисленных выше, можно выполнить измерение геометрических размеров линии, повысив точность априорной информации о ее конструкции. Также имеется возможность уточнить параметры материалов линии (метод рассмотрен в работе [8]). Для исследования повторяемости измерений достаточно дважды выполнить процедуру верификации и сравнить полученные оценки эффективных параметров.

3. Результаты расчетов и экспериментальные данные

Для расчета статистических характеристик электрических параметров линии при известных статистических характеристиках параметров конструкции линии методом сигма-точечного преобразования необходимо иметь выражение, определяющее связь этих параметров. Используемая модель копланарной линии аналитически достаточно сложная, громоздкая и рассмотрена в [9]. Конструкция копланарного волновода определена следующими параметрами: w — ширина сигнального проводника; w_g — ширина земляных проводников; t — толщина проводников; s — величина зазора между проводниками; ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость материала подложки; $\tan\delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь; κ — удельная проводимость металла. При выборе средних значений и вариаций этих параметров за основу возьмем данные по калибровочной пластине RM8130 (*Reference Material 8130*) производства NIST (*National Institute of Standards and Technology*, г. Боулдер, шт. Колорадо, США) с подложкой из арсенида галлия GaAs¹. Основными электрическими характеристиками линии, статистические свойства которых необходимо определить, являются характеристический импеданс Z_L и коэффициент передачи (КП) S_{21} .

Рассмотрим результаты вычислений в диапазоне частот от 50 МГц до 110 ГГц. Расчеты выполним для пяти вариантов: 1) с минимальными значениями СКО по всем параметрам линии (0.1 мкм по геометрии; 1 мкм по длине; 0.01 по ϵ_r ; 10^{-6} по $\tan\delta$); 2) с максимальными значениями СКО (1 мкм по геометрии; 10 мкм по длине; 0.1 по ϵ_r ; 10^{-5} по $\tan\delta$); 3) максимальные значения СКО только для w , w_g и s ; 4) максимальные значения СКО только для ϵ_r и $\tan\delta$; 5) максимальное значение СКО априорной информа-

¹ Reference Material 8130. Coplanar waveguide calibration set, NIST, Gaithersburg, MD 20899, USA, 1998.

ции только по длине линии $l=20.245$ мм. Выбор минимальных и максимальных СКО сделан из следующих соображений. Если в качестве априорной информации о конструкции линии использовать только технологические свойства производственного процесса, то вариации параметров относительно заданных значений оказываются примерно на один порядок выше, чем вариации, которые могут обеспечить результаты измерений параметров конструкции и материалов линии. На рис. 3 и рис. 4 приведены зависимости СКО σ_{\bullet} расчета импеданса, КО линии, КП и модуля КП линии для вариантов расчета 1—5 (указаны цифрами на графиках). Считаем, что оценки эффективных параметров ВАЦ формируются относительно импеданса, рассчитываемого по средним значениям параметров верификационной линии. Разброс КО обусловлен отличием реальных параметров конструкции линии от параметров, принимаемых в качестве средних.

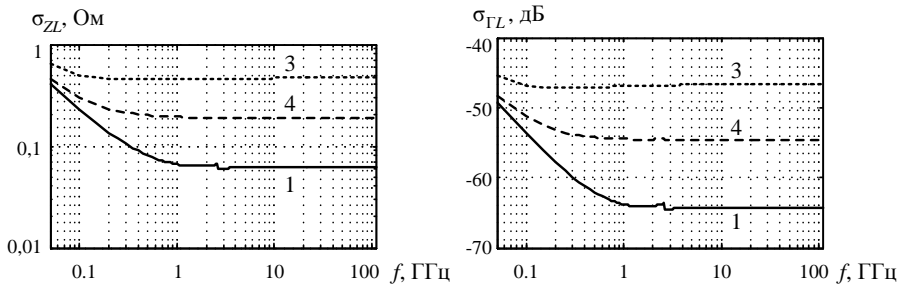


Рис. 3. СКО расчета импеданса (слева) и КО линии (справа).

Fig. 3. Standard deviation of line impedance and of reflection coefficient calculations

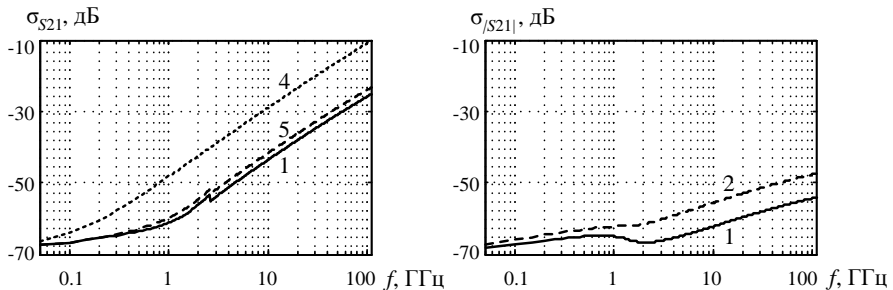


Рис. 4. Зависимость $\sigma_{S_{21}}$ от частоты и $\sigma_{|S_{21}|}$ от частоты для разных вариантов расчета.

Fig. 4. Standard deviation of S_{21} and of $|S_{21}|$ as a function of frequency for different options

Обозначим эффективные (то есть действующие после калибровки первого уровня) параметры портов прибора: D — направленность, M —

согласование, R — трекинг (частотная неравномерность) тракта отражения, T — трекинг тракта передачи. Экспериментальные измерения для исследования эффективных параметров предоставлены сотрудниками рабочей группы 2.23 (Основы измерений параметров рассеяния) физико-технического федерального института РТВ (*Physikalisch-Technische Bundesanstalt*, г. Брауншвейг, Германия) доктором Арз У. и инженером Шуберт Д. Перед верификацией выполнена калибровка *multiline* TRL при помощи опорного материала NIST RM8130. Линия длиной 20.245 мм используется для получения верификационных измерений в диапазоне частот до 70 ГГц. На рис. 5 показаны результаты измерений КО верификационных мер.

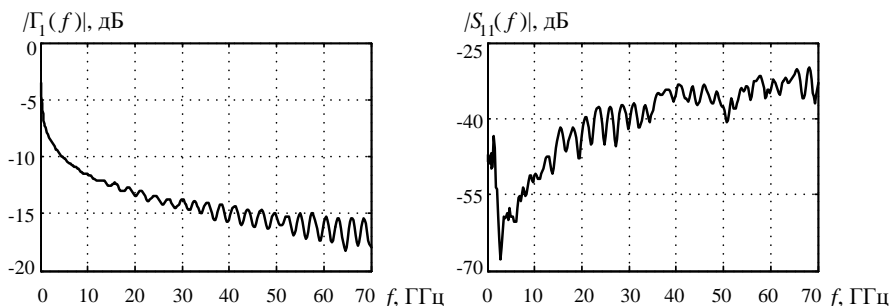


Рис. 5. Результаты измерений КО верификационных мер: слева — результаты измерений линии с открытым портом; справа — результаты измерений линии на проход.

Fig. 5. The measured reflection coefficients of the verification line: left – open stub condition; right – thru condition

Обработка измерений проведена алгоритмом [2]. Основной этап обработки предполагает использование специальной технологии фильтрации во временной области, синтезированной при помощи алгоритма метода наименьших квадратов (МНК). Постобработка полученных оценок выполняется с целью адаптации к неизвестному значению КО открытого порта линии. Для примера на рис. 6 показаны модули оценок эффективных параметров низкого уровня. Тонкой линией показана частотная характеристика модуля эффективной направленности первого порта системы, полученная после преобразования импеданса с Z_L (отлично от 50 Ом) в $Z_0=50$ Ом. При преобразовании импеданса пересчитываются все параметры исходных четырехполюсников погрешности.

Рассмотрим пример расчета СКО оценок эффективных параметров и итоговых значений модулей эффективных параметров прибора. Допустим, в результате верификации и фильтрации получены следующие оценки мо-

дулей эффективных параметров (относительно Z_L): $|D|=-40$ дБ; $|M|=-36$ дБ; $|R|=0.1$ дБ и $|T|=0.05$ дБ. Зададим СКО расчета основных электрических параметров линии для двух наборов: прецизионного № 1 и низкой точности № 2. Значения σ_{S21} и σ_{GL} для обоих типов наборов приведены в табл. 1.

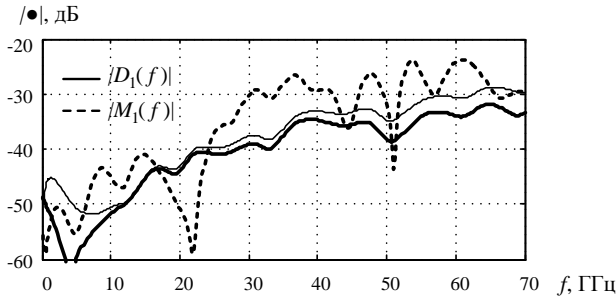


Рис. 6. Модули оценок эффективной направленности D (толстая сплошная линия) и эффективного согласования M (толстая пунктирная линия) первого порта измерительной системы. Тонкой линией показана оценка D после преобразования импеданса в 50 Ом.

Fig. 6. The magnitude of the residual error estimates D (thick solid line) and M (thick dotted line) of the first measurement port. The estimate of D after impedance transformation (from Z_L to 50 Ohms) is shown by a thin solid line

Модуль КП линии или комплексное значение КП линии на частотах ниже 5 ГГц при высокой априорной точности по параметрам конструкции линии можно рассчитать с СКО менее -50 дБ (см. рис. 4). Для анализа остаточной систематической погрешности измерений основное значение имеет точность расчета модуля КП линии, которая влияет на точность оценок модулей эффективных параметров. С ростом частоты СКО расчета КП линии возрастает до -35 дБ и даже более (на частотах выше 40 ГГц). Минимальное и максимальное значения σ_{GL} получены на уровне -64 дБ и -47 дБ, соответственно (см. рис. 3). Увеличение этих значений на 10 дБ в табл. 1 учитывает возможные неоднородности вдоль длины линии. Точность алгоритма МНК задана двумя величинами методической погрешности: оценки низкого (L — *low*) уровня имеют СКО -52 дБ ($\sigma_{МНК,L}$); оценки высокого (H — *high*) уровня имеют СКО -45 дБ ($\sigma_{МНК,H}$). Данные оценки СКО получены в результате моделирования алгоритма в условиях, приближенных к условиям измерений (по разрешению во временной области и свойствам шумов). Результаты расчетов СКО оценки КО открытого порта линии $\sigma_{ГО}$ и СКО оценок эффективных параметров, а также итоговые параметры измерительной системы, характеризующие остаточную систематическую погрешность, представлены в табл. 2. На величину СКО

оценки направленности D влияет погрешность алгоритма фильтрации по параметрам низкого уровня и погрешность КО линии. На значение σ_M кроме этих факторов также оказывает влияние неточность расчета КП и погрешности алгоритма по параметрам высокого уровня. Однако вклад этих дополнительных факторов аддитивный с множителем $|M|$. СКО оценок трекинга отражения R и передачи T зависит от СКО алгоритма фильтрации в части выделения составляющих высокого уровня и СКО расчета КП линии. Отметим, трекинг передачи можно формировать с помощью альтернативного алгоритма, а именно путем деления измерений КП линии на расчетное значение КП линии. В таком случае, вклад в погрешность оценки трекинга передачи T будет вносить шум измерений КП.

Табл. 1. Условия расчета СКО оценок эффективных параметров.

Table 1. Conditions of the residual errors standard deviations calculation

№ набора	СКО расчета параметров линии, дБ		СКО оценок алгоритма, дБ	
	σ_{S21}	σ_{TL}	σ_{MNL}	σ_{MNH}
1	-50	-54	-52	-45
2	-35	-37		

Табл. 2. СКО оценок и итоговые эффективные параметры ВАЦ.

Table 2. Standard deviation of the estimates and the final VNA residual errors

№ набора	СКО оценок, дБ					Итоговые параметры, дБ			
	σ_D	σ_{GO}	σ_M	σ_R	σ_T	$ D_S $	$ M_S $	$ R_S $	$ T_S $
1	-50	-43.8	-50	-41.4	-43.8	-38.5	-35.3	0.18	0.12
2	-37	-34.6	-37	-34.2	-34.6	-30.3	-29.7	0.35	0.32

Для набора № 1 итоговые параметры практически совпадают с оценками после фильтрации, особенно по $|D|$ и $|M|$. Ухудшение точности расчета параметров верификационной линии (либо использование некачественной линии) приводит к необходимости увеличения модулей параметров низкого уровня на 7—10 дБ. Трекинги увеличиваются более чем в 3 раза в логарифмическом масштабе. В линейном масштабе 0.1 дБ соответствует значению 1.012, а 0.35 дБ соответствует значению 1.041 (погрешность 4 %). Чтобы получить оценки эффективных параметров и результирующую точность измерительной системы в $Z_0=50$ Ом необходимо воспользоваться процедурой преобразования импеданс и пересчитать оценки эффективных параметров, не забыв учесть погрешность расчета Z_L . СКО расчета импеданса линии набора № 1 примерно 0.1 Ом; набора № 2 — около 0.5 Ом.

4. Заключение

В работе рассмотрена методика расчета бюджета погрешности при выполнении измерений параметров рассеяния в копланарном волноводе

на подложке. Верификация точности измерений ВАЦ основана на использовании одной верификационной линии и двухэтапной обработки результатов измерений при калибровке второго уровня, включающей совместную фильтрацию оценок и адаптацию к неизвестному значению КО открытого порта линии. Главным преимуществом согласованной линии передачи как эталона является то, что для построения модели любого другого верификационного устройства помимо модели линии требуются дополнительные сложные модели. Путем численной процедуры сигматочечного преобразования могут быть исследованы свойства линии. Представленные результаты позволяют сделать очередной шаг в области развития метрологии векторных измерений на подложке.

Источники финансирования и выражение признательности

Работа выполнена в рамках проекта по государственному заданию Минобрнауки России № 8.7348.2017/8.9.

Список литературы

1. Малай И. М., Семенов В. А., Чирков И. П. Тестирование изделий высокочастотной микроэлектроники на пластине. В кн. : Тезисы докладов X Всероссийской НТК «Метрология в радиоэлектронике», 20—22 июня 2016 г., Менделеево Московской обл. Менделеево : ФГУП «ВНИИФТРИ». 2016. С. 103—106.
2. Savin A. A., Guba V. G., Rumiantsev A., Maxon B. D., Schubert D., Arz U. Adaptive Estimation of Complex Calibration Residual Errors of Wafer-Level S-Parameters Measurement System. В кн. : 84th ARFTG Microwave Measurement Conference, Boulder, USA. 2014. С. 1—4.
3. Savin A. A. A Novel Factor Verification Technique for One-Port Vector Network Analyzer В кн. : Proceedings of the 43rd European Microwave Conference, Nuremberg, Germany. 2013. С. 60—63.
4. Savin A. A., Guba V. G., Bykova O. N. Uncertainty Analysis in Coplanar Waveguide with Unscented Transformation. В кн. : ARFTG 86th Microwave Measurement Conference, Atlanta, Georgia, USA, December 1—4, 2015. С. 1—4.
5. Савин А. А. Губа В. Г., Быкова О. Н. Измерение параметров полупроводниковых приборов на пластине // Измерительная техника. 2016. № 7. С. 56—61.
6. Savin A. A., Guba V. G., Bykova O. N. Measurement of the Parameters of On-wafer Semiconductor Devices // Measurement Techniques. 2016. Т. 59, № 7. С. 765—772.
7. Savin A. A. Second-Order Error Correction of a Pre-calibrated Vector Network Analyzer for Wafer-Level Measurements. В кн. : Proceedings of the 47th European Microwave Conference. 10—12 Oct. 2017, Nuremberg, Germany. 2017, С. 743—746.
8. Savin A. A., Guba V. G., Ladur A. A., Bykova O. N., Shutov E. A., Sheyerman F.I., Walker B. Material Parameters Extraction of Printed Circuits and Semiconductor Substrates Using Wideband Reflection Measurements. В кн. : 91st ARFTG Microwave Measurement Conference, Philadelphia, USA. 2018, С. 1—4.
9. Heinrich W. Quasi-TEM description of MMIC coplanar lines including conductor-loss effects // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1993. Т. 41, № 1. С. 45—52.

Информация об авторах

Савин Александр Александрович, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института радиотехнических систем Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Российская Федерация.

Information about the authors

Aleksandr A. Savin, Senior Researcher of the Research Institute of Radio Engineering Systems of the Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation.