

УДК 621.317.39

**В.П. Куценко (д-р техн. наук, ст. науч. сотр.)¹, К.Л. Шевченко (канд. техн. наук, доц.)²,
А.Ф. Яненко (д-р техн. наук, проф.)³**

¹Донецкий национальный технический университет, г. Красноармейск
кафедра автоматики и телекоммуникаций

²Киевский национальный университет технологий и дизайна, г. Киев
кафедра автоматизации и компьютерных систем

³Национальный технический университет Украины «КПИ», г. Киев
кафедра конструирования и производства радиоаппаратуры
E-mail: donetsk50@mail.ru; autom1@meta.ua; op291@meta.ua

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАДИОТЕПЛОВЫХ СИГНАЛОВ КАК МЕТОД ОЦЕНКИ СОСТАВА И СВОЙСТВ ОБЪЕКТОВ

Предложен новый подход для радиометрической оценки состава и свойств физических и биологических объектов различной структуры за счет спектрального анализа интенсивности их собственных слабых радиотепловых излучений. Рассмотрена функциональная схема устройства, принцип и алгоритм обработки сигналов. Показано, что при данном способе оценки на результаты контроля параметров объектов не влияют аддитивная и мультипликативная погрешности радиометрического устройства.

Ключевые слова: измерения, радиоизлучения, спектральный анализ, состав и свойства объектов, энергетический спектр.

Введение. Радиометрические измерительные приемники широко используются в различных областях науки и техники, в том числе для измерения собственного электромагнитного излучения объектов различной физической природы, в системах пассивной локации, дистанционного измерения температуры, исследования свойств материалов и характеристик атмосферы и т.д. При этом диапазон измерений из дециметровых и сантиметровых волн активно перемещается в миллиметровую область (свыше 30 ГГц). Этот интерес вызван, прежде всего, как исследованием новых конструкционных материалов, так и биологических объектов, в которых метаболические процессы связаны с энергетическим межклеточным обменом КВЧ-диапазона. Для решения этой задачи требуется разработка специальных радиометрических измерительных приемников (РИП) КВЧ-диапазона. Если схемы РИП без преобразования частоты, используемые в основном в дециметровом и сантиметровом диапазонах, являются широкополосными, то в диапазоне миллиметровых волн (КВЧ-диапазон) используются узкополосные системы приема сигналов с преобразованием их частоты. Это обусловлено тем, что на столь высоких частотах при широкополосном усилении очень сложно обеспечить прием и выделение полезного сигнала на фоне более мощных шумов. Отсутствие необходимой элементной базы входных каналов и цепей заставляет специалистов в области КВЧ техники для обеспечения необходимой высокой чувствительности приема разрабатывать схемы в большинстве своем модуляционного супергетеродина типа [1-4].

С помощью этой аппаратуры для оценки состава и свойств физических и биологических объектов можно измерять мощность радиотеплового излучения в определенном диапазоне, т.е. измерять энергетический спектр $P(f)$, характеризующий распределение мощности радиоизлучения по спектру частот. Энергетический спектр измеряют различными способами: фильтровым [5], за счет калибровки радиометрических избирательных приемников по напряжению источника эталонного шума [6], с помощью сравнения КВЧ-сигнала антенны с

КВЧ-шумами калиброванной нагрузки, эквивалентной по сопротивлению и шумам антенне и выделение в узкополосном приемнике разностного сигнала, пропорционального принятому радиоизлучению [7] и др. [8], [9].

Однако эти способы из-за нестабильности крутизны преобразования узкополосного РИП при разной частоте настройки, сложности создания генераторов эталонного шума с равномерной спектральной плотностью излучения в широком диапазоне сверхвысоких частот, невозможности калиброванного ослабления принятого излучения на входе аппликаторной антенны и т.д. не позволяют по значению выходного напряжения достоверно оценивать дисперсию спектра радиоизлучения.

Постановка задачи исследования. Из вышеизложенного следует, что для исследования параметров физических и биологических объектов различной структуры за счет измерения интенсивности энергетического спектра их собственных слабых радиоизлучений требуется новый подход к решению данной проблемы, позволяющий обеспечить повышение информационной способности, чувствительности и точности аппаратуры.

Основная часть. Анализ показывает, что выше перечисленные проблемы можно избежать в предлагаемом методе спектрального анализа слабых радиоизлучений, в котором обеспечивается высокая точность измерения дисперсии слабых радиоизлучений в узкой полосе частот РИП [10], [11]. На рис. 1 представлена функциональная электрическая схема, с помощью которой реализуется предложенный метод, где: X1 – антенна; S1 – автоматический переключатель; A1 – кодоуправляемый аттенюатор; A2 – усилитель высокой частоты; U1 – смеситель; CPU – микроЭВМ; Re – эквивалентная нагрузка; G1 – кодоуправляемый генератор частот; A3 – усилитель промежуточной частоты; U2 – квадратичный детектор; A4 – усилитель низкой частоты; U3 – синхронный детектор; U4 – аналого-цифровой преобразователь; U5 – делитель частоты; O – объект исследования; P – цифровой индикатор.

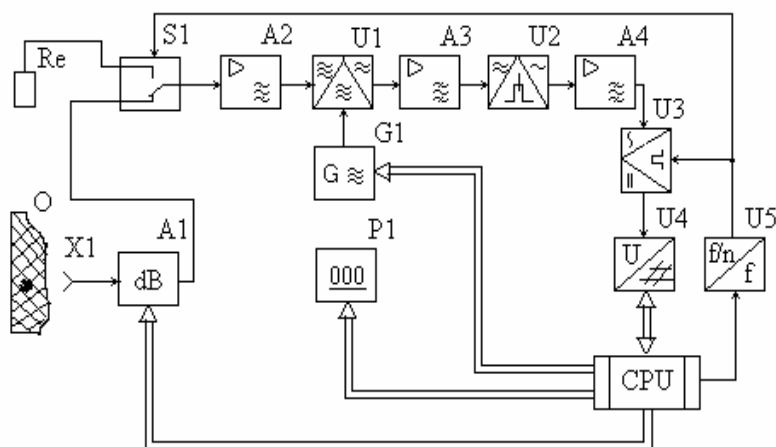


Рисунок 1 – Функциональная схема РИП для оценки состава и свойств объектов

Схема содержит антенну X1 и ее электрический эквивалент RЭ. Антенна через кодоуправляемый аттенюатор A1 соединена с одним из входов КВЧ автоматического переключателя S1, к другому входу которого подключен эквивалент антенны RЭ. Выход переключателя соединен с входом высокочастотного усилителя A2, гетеродинный вход которого соединен с кодоуправляемым генератором частот G1. Преобразованный по частоте в смесителе U1 сигнал поступает на усилитель промежуточной частоты A3 откуда подается на квадратичный детектор U2. После квадратичного детектирования сигнал поступает на усилитель низкой частоты A4 и затем на синхронный детектор U3, который соединен с входом аналого-цифрового преобразователя U4, цифровой выход которого подключен к входу микроЭВМ (CPU). К выходам микроЭВМ подключены цифровой индикатор P1. Управляемые входы

кодоуправляемого аттенюатора А1 и кодоуправляемого генератора частот G1 также подключены через делитель частоты U5 к выходам микроЭВМ.

Метод измерения энергетического спектра радиоизлучений осуществляется по программе, записанной в память микроЭВМ, в следующей последовательности. КВЧ излучение от исследуемого объекта принимается антенной X1. Известно, что собственное излучение многих физических и биологических объектов в диапазоне КВЧ очень слабое и имеет шумовой характер. Принятый шумовой сигнал и собственные шумы антенны между собой некоррелированы. Поэтому дисперсию выходного сигнала антенны можно представить в виде суммы двух дисперсий:

$$\bar{U}_A^2 = \bar{U}_X^2 + \bar{U}_{ш1}^2, \quad (1)$$

где \bar{U}_A^2 – дисперсия выходного сигнала антенны в полосе приема радиоприемного канала; \bar{U}_X^2 – дисперсия принятого радиоизлучения; $\bar{U}_{ш1}^2$ – дисперсия собственных шумов антенны.

Эквивалент антенны Re имеет сопротивление и шумы, равные сопротивлению и шумам антенны X1. Поэтому дисперсию выходного сигнала эквивалента Re выразим через дисперсию сигнала антенны X1:

$$\bar{U}_Э^2 = \bar{U}_{ш1}^2, \quad (2)$$

где $\bar{U}_Э^2$ – дисперсия шумов эквивалента антенны.

При указанном положении автоматического переключателя S1 сигнал от эквивалента Re поступит на вход радиоприемного канала, частота настройки которого задается кодом частоты генератора частот G1. С учетом температурной и временной нестабильности характеристики преобразования и собственных шумов радиоприемного канала его выходное постоянное напряжение можно представить в виде:

$$U_1 = S(1 + \gamma)(\bar{U}_Э^2 + \bar{U}_{ш2}^2) + \Delta U, \quad (3)$$

где S – номинальная крутизна преобразования радиоприемного канала; $\gamma = \Delta S / S$ – относительная погрешность преобразования вследствие изменения чувствительности приемника (мультипликативная погрешность); $\bar{U}_{ш2}^2$ – дисперсия собственных шумов на входе радиоприемного канала; ΔU – абсолютная погрешность преобразования от сдвига нуля радиоприемного канала (аддитивная погрешность).

Выходное напряжение приемника превращается в код N_1 с помощью аналого-цифрового преобразователя U4 и вводится в память микроЭВМ:

$$N_1 = \frac{S(1 + \gamma)(\bar{U}_Э^2 + \bar{U}_{ш2}^2) + \Delta U}{q}, \quad (4)$$

где q – единица младшего разряда аналого-цифрового преобразователя.

По команде микроЭВМ автоматический переключатель S1 переводится в противоположное положение. При этом эквивалент антенны Re отключается, а антенна X1 подключается к входу радиоприемного канала через кодоуправляемый аттенюатор А1. Уровень собственных шумов радиоприемного канала при этом не изменяется благодаря равенству сопротивлений антенны X1 и эквивалента Re.

Выходное напряжение приемника принимает значение:

$$U_2 = S(1 + \gamma) \left[K(\bar{U}_X^2 + \bar{U}_{Ш1}^2) + \bar{U}_{Ш2}^2 \right] + \Delta U, \quad (5)$$

где K – коэффициент передачи по мощности аттенюатора А1.

В микроЭВМ вводится новое значение кода напряжения:

$$N_2 = \frac{S(1 + \gamma) \left[(\bar{U}_X^2 + \bar{U}_{Ш1}^2) + \bar{U}_{Ш2}^2 \right] + \Delta U}{q}. \quad (6)$$

В микроЭВМ сравниваются коды N_1 и N_2 и формируется разностный код, который с учетом равенства (2) принимает значение:

$$\Delta N_1 = N_2 - N_1 = \frac{S(1 + \gamma) \left[K\bar{U}_X^2 - (1 - K)\bar{U}_{Ш1}^2 \right]}{q}. \quad (7)$$

При коэффициенте передачи аттенюатора А1 $K = 1/2$ разностный код будет:

$$\Delta N_2 = 0,5S(1 + \gamma) \left(\bar{U}_X^2 - \bar{U}_{Ш1}^2 \right). \quad (8)$$

Согласно выражению (2) имеем:

$$\Delta N_2 = 0,5S(1 + \gamma) \left(\bar{U}_X^2 - \bar{U}_Э^2 \right). \quad (9)$$

Как видно из соотношения (9), разностный код ΔN_2 не зависит от уровня шумов радиоприемного канала и его аддитивной погрешности ΔU . Тем не менее, разностный код зависит от мультипликативной погрешности γ , которая в радиоприемном канале большая из-за его нестабильности чувствительности. Поэтому по аттестованным шумам $\bar{U}_Э^2$ эквивалента антенны нельзя достоверно оценить дисперсию принятого радиоизлучения \bar{U}_X^2 .

Для повышения точности измерения дисперсии \bar{U}_X^2 необходимо изменить код аттенюатора А1 в направлении уменьшения разностного кода (7). При достижении нулевого значения разностного кода ($\Delta N_1 = 0$) получаем:

$$K_0 \bar{U}_X^2 - (1 - K_0) \bar{U}_{Ш1}^2 = 0, \quad (10)$$

где K_0 – коэффициент передачи аттенюатора, соответствующего нулевому разностному коду.

С учетом выражения (2) окончательно получаем:

$$\bar{U}_X^2 = \frac{1 - K_0}{K_0} \bar{U}_Э^2. \quad (11)$$

В микроЭВМ с учетом частоты настройки приемника и его полосы пропускания промежуточных частот вычисляется текущее значение спектральной плотности энергетического спектра принятого излучения:

$$P(f) = \frac{1 - K_0}{2K_0\Delta f} \bar{U}_\Xi^2, \quad (12)$$

где f – частота настройки радиоприемного канала; $2\Delta f$ – полоса частот спектра радиоизлучения, которая выделяется радиоприемным каналом.

Программным изменением кода настройки генератора частот G1 перестраивается частота настройки приемника и получается соответствующее значение энергетического спектра.

На цифровой индикатор P1 выводятся текущие значения спектральной плотности энергетического спектра и, соответственно, регистрируется вся характеристика спектра в диапазоне частот от f_{\min} до f_{\max} , по которой можно определять состав и свойства объектов исследования.

Предложенное решение позволяет определять состав и свойства объектов исследования за счет измерения и регистрации энергетического спектра слабых радиоизлучений, при этом на результаты оценки не влияют аддитивная (ΔU) и мультипликативная (γ) погрешности радиоприемного канала. Исключается также влияние на результат измерения собственных шумов антенны ($\bar{U}_{ш1}^2$) и радиоприемного канала ($\bar{U}_{ш2}^2$).

Установлено, что при флуктуационном пороге чувствительности РИП ($10^{-22} \dots 10^{-21}$) Вт/Гц и спектральной плотности квадрата шумового напряжения резистивного эквивалента антенны 10^{-17} В²/Гц уверенно регистрируется энергетический спектр собственных радиоизлучений, например, радиотепловых излучений биологических объектов в диапазоне значений $10^{-21} \dots 10^{-19}$ Вт/Гц. Погрешность измерения определяется в основном флуктуациями шумового напряжения эквивалента антенны. В резистивном эквиваленте относительная погрешность не превышает $\pm 10\%$ при времени усреднения результатов измерения в пределах (3...5) с, что осуществляется в аналого-цифровом преобразователе интегрирующего типа. Уменьшение случайных погрешностей достигается путем многократных измерений сигналов антенны и ее эквивалента.

Выводы.

1. Предложенный РИП и метод спектрального анализа радиотепловых сигналов позволяет определять состав и свойства объектов за счет измерения энергетического спектра слабых радиоизлучений.

2. Показано, что на результаты оценки состав и свойства объектов не влияют собственные шумы антенны ($\bar{U}_{ш1}^2$) и радиоприемного канала ($\bar{U}_{ш2}^2$), аддитивная (ΔU) и мультипликативная (γ) погрешности РИП.

3. Установлено, что при флуктуационном пороге чувствительности РИП ($10^{-22} \dots 10^{-21}$) Вт/Гц и спектральной плотности квадрата шумового напряжения резистивного эквивалента антенны 10^{-17} В²/Гц уверенно регистрируется энергетический спектр собственных радиоизлучений. Погрешность измерения определяется в основном флуктуациями шумового напряжения эквивалента антенны.

Список использованной литературы

1. Есепкина Н.А. Радиотелескопы и радиометры / Н.А. Есепкина, Д.В. Корольков, Ю.Н. Парийский. – М.: Наука, 1972. – 416 с.
2. Николаев А.Г. Радиотеплолокация / А.Г. Николаев, С.В. Перцов. – М.: Сов. радио, 1964. – 335 с.
3. Куценко В.П. Методы и средства сверхвысокочастотной радиометрии / В.П. Куценко, Ю.А. Скрипник, Н.Ф. Трегубов, К.Л. Шевченко, А.Ф. Яненко. – Донецьк: ІПШ «Наука і

- освіта», 2011. – 324 с.
4. Измерения на миллиметровых и субмиллиметровых волнах / Р.А. Валитов, В.Н. Скресанов, А.И. Фисун [и др.]; под ред. Р.А. Валитова, Б.И. Макаренко. – М.: Радио и связь, 1984. – 296 с.
 5. Кушнир Ф.В. Электроизмерения: [учебное пособие для ВУЗов] / Ф.В. Кушнир. – Л. Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1988. – 245 с.
 6. Верник С.М. Повышение точности измерений в технике связи / С.М. Верник, Ф.В. Кушнир, В.Б. Рудницкий. – М.: Радио и связь, 1981. – 200 с.
 7. Головки Д.Б. Сверхвысокочастотные методы и средства измерения физических величин / Д.Б. Головки, Ю.О. Скрипник, О.П. Яненко. – К.: Лебедь, 2003. – 328 с.
 8. Куценко В.П. Періодичне порівняння сигналів в НВЧ-радіометрії / В.П. Куценко. – Донецьк: ІПШІ „Наука і освіта”, 2012. – 300 с.
 9. Пат. 70229А. Україна, МПК G 01 S 13/00. Спосіб вимірювання слабких радіовипромінювань / Ю.О. Скрипник; К.Л. Шевченко; І.Ю. Скрипник; В.П. Куценко; Київський національний університет технології та дизайну (Україна). – № 20031213093; заявл. 30.12.2003; опубл. Бюл. № 9 від 15.09.2004.
 10. Пат. 18320U Україна, МПК G 01 S 13/00. Спосіб вимірювання енергетичного спектра слабких радіовимірювань / В.П. Куценко, Ю.О. Скрипник, М.Ф. Трегубенко, К.Л. Шевченко, О.П. Яненко; Київський національний університет технології та дизайну (Україна). – № u200603339; заявл. 28.03.2006; опубл. Бюл. № 11 від 15.11.2006.
 11. Куценко В.П. Радиометрический способ неразрушающего контроля состава и свойств диэлектрических материалов / В.П. Куценко, Ю.А. Скрипник, М.Ф. Трегубов, К.Л. Шевченко, О.П. Яненко // Материалы 16-ой международной конференции “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (КрыМиКо-2006). – Севастополь: “Вебер”, 2006. – С. 762 – 764.

References

1. Esepkina, N.A., Korolkov D.V. and Pariyskiy Yu.N. (1972), *Radioteleskopyi i radiometriyi* [Radio-telescopes and radiometers], Nauka, Moscow, Russia.
2. Nikolaev, A.G. and Pertsov S.V. (1964), *Radioteplotlokatsiya* [Radiowarmlocation], Sov. radio, Moscow, Russia.
3. Kutsenko, V.P., Skripnik Yu.A., Tregubov N.F., Shevchenko K.L. and Yanenko A.F. (2011), *Metody i sredstva sverhvyisokochastotnoj radiometrii* [Methods and means of microwave radiometry], IPShI «Nauka i osvita», Donetsk, Ukraine.
4. Valitov, R.A., Skresanov V.N., Fisun A.I. and drugie (1984), *Izmereniya na millimetrovyih i submillimetrovyih volnah* [Measuring on millimetric and submillimeter waves] in Valitov R.A. and Makarenko B.I., Radio i svyaz, Moscow, Russia.
5. Kushnir, F.V. (1988), *Elektroizmereniya [navch. posibnyk]* [Electromasuring], Energoatomizdat, St. Petersburg, Russia.
6. Vernik, S.M., Kushnir F.V. and Rudnitskiy V.B. (1981), *Povyishenie tochnosti izmereniy v tehnikе svyazi* [An increase of exactness of measuring is in the technique of connection], Radio i svyaz, Moscow, Russia.
7. Golovko, D.B., Skripnik Yu.O. and Yanenko O.P. (2003), *Sverhvyisokochastotnyie metody i sredstva izmereniya fizicheskikh velichin* [Super-high-frequency methods and facilities of measuring of physical sizes], Lebed, Kiev, Ukraine.
8. Kutsenko, V.P. (2012), “*Periodychnе porivnjannja sygnaliv v NVCh-radiometrii*” [Periodic comparison of signals in the microwave radiometry], IPShI «Nauka i osvita», Donetsk, Ukraine.
9. Skripnik, Yu.O., Shevchenko, K.L., Skripnik, I.Yu. and Kutsenko, V.P., Kiyivskiy natsionalniy universitet tehnologiyi ta dizaynu (2004), *Sposib vimiryuvannya slabkih radioviprominyuvan*

[The method of measurement of weak radio emission], State Register of Patents of Ukraine, Kiev, UA, Pat. № 70229A.

10. Kutsenko, V.P., Skripnik, Yu.O., Tregubenko, M.F., Shevchenko, K.L. and Yanenko, O.P. Kiyivskiy natsionalniy universitet tehnologiyi ta dizaynu (2006), *Sposib vimiryuvannya energetichnogo spektra slabkih radiovimiryuvan* [The method of measuring the energy spectrum of weak radio measurements], State Register of Patents of Ukraine, Kiev, UA, Pat. № 18320.
11. Kutsenko V.P., Skripnik Yu.O., Tregubov M.F., Shevchenko K.L. and Yanenko O.P. (2006) "Radyometrycheskyy method of non-destructive inspection composition and properties of materials dyelektrycheskyh", 16th International Conference "Microwave equipment and telecommunication technologies", Sevastopol, Ukraine, 11-16 September 2006, pp. 762-764.

Надійшла до редакції:
18.03.2015

Рецензент:
д-р техн. наук, проф. А.А. Зорі

В.П. Куценко

Донецький національний технічний університет

К.Л. Шевченко

Київський національний університет технологій и дизайну

А.Ф. Яненко

Національний технічний університет України «КПІ»

Спектральний аналіз радіотеплових сигналів як метод оцінки складу і властивостей об'єктів.

Запропоновано новий підхід для радіометричної оцінки складу і властивостей фізичних та біологічних об'єктів різної структури за рахунок спектрального аналізу інтенсивності їх власних слабких радіотеплових випромінювань. Розглянута функціональна схема пристрою, принцип і алгоритм обробки сигналів. Показано, що при даному способі оцінки на результати контролю параметрів об'єктів не впливають адитивна і мультиплікативна похибки радіометричного пристрою.

Ключові слова: *вимірювання, радіовипромінювання, спектральний аналіз, склад і властивості об'єктів, енергетичний спектр.*

V.P. Kutsenko

Donetsk National Technical University

K.L. Shevchenko

Kiev National University of Technology and Design

A.F. Yanenko

National Technical University of Ukraine "KPI"

Spectral analysis of signals as radio thermal method of assessing the composition and properties of objects.

Radiometric measurement receivers are widely used in various fields of science and technology. With this apparatus we can evaluate the composition and physical and biological properties of objects by measuring the energy spectrum in a certain range. However, the measurement methods and apparatus for converting narrowband slope do not allow estimating the variance of the radio spectrum by the value of the output voltage reliably due to instability of measurement receiver when tuning to a different frequency, the complexity of creating the reference noise generator with a uniform spectral density over a wide range of microwave frequencies, impossibility of calibrated attenuation of the radiation received at the input of the antenna and the applicator, etc. From the above it follows that the parameters for the study of physical and biological objects with different structures by measuring the intensity of the energy spectrum of their own weak radio emission requires a new approach to solving this problem, allowing to provide greater information capacity, sensitivity and precision equipment. A new approach is required for radiometric estimation of the composition and properties of the physical and biological objects of different structure due to the spectral analysis of the intensity of their own weak radio thermal radiation. The proposed solution makes it possible

to determine the composition and properties of the objects of study by measuring and recording the energy spectrum of weak radio signals, and the results of the evaluation will not be affected by additive and multiplicative errors of radio receiver channel. The impact of measurement of intrinsic noise of the antenna and receiver channel on the result is also excluded. The proposed solution makes it possible to determine the composition and properties of the objects of study by measuring and recording the energy spectrum of weak radio signals, while on the results of the evaluation will not affect additive and multiplicative errors radio receiver channel. Excludes the impact on the result of measurement of intrinsic noise antenna and receiver channel. The proposed solution makes it possible to determine the composition and properties of the objects of study by measuring and recording the energy spectrum of weak radio signals, while on the results of the evaluation will not affect additive and multiplicative errors radio receiver channel. Excludes the impact on the result of measurement of intrinsic noise antenna and receiver channel.

Keywords: *measurement of radio emission spectral analysis, composition and properties of objects, the energy spectrum.*



Куценко Владимир Петрович, Украина, окончил Таганрогский радиотехнический институт, Заслуженный работник промышленности Украины, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., профессор кафедры автоматизации и телекоммуникаций Донецкого национального технического университета (пл. Шибанкова, 2 г. Красноармейск, 85300, Украина). Основное направление научной деятельности – измерение низкоинтенсивных СВЧ-сигналов, радиометрические исследования состава и свойств объектов, метрология измерения случайных сигналов.



Шевченко Константин Леонидович, Украина, окончил Киевский технологический институт легкой промышленности, канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации и компьютерных систем Киевского национального университета технологий и дизайна (ул. Немировича-Данченко, 2, г. Киев, 01011, Украина). Основное направление научной деятельности – измерение низкоинтенсивных СВЧ-сигналов, радиометрические исследования состава и свойств объектов, метрология измерения случайных сигналов.



Яненко Алексей Филиппович, Украина, окончил Киевский политехнический институт «КПИ», д-р техн. наук, профессор кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры Национального технического университета Украины (пл. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина). Основное направление научной деятельности – измерение низкоинтенсивных СВЧ-сигналов, радиометрические исследования состава и свойств объектов, метрология измерения случайных сигналов.