

А. В. Киселев, А. О. Подкопаев, М. А. Степанов

Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

ОБ ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ ДВУХТОЧЕЧНОЙ ЧАСТИЧНО КОГЕРЕНТНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ТРЕХТОЧЕЧНОЙ НЕКОГЕРЕНТНОЙ

Показана эквивалентность двухточечной геометрической модели, излучающей статистически связанные нормальные случайные процессы, и трехточечной неэквилидистантной геометрической модели, излучающей статистически не связанные нормальные случайные процессы. Двухточечная модель, излучающая статистически связанные сигналы, представлена в виде суперпозиции двух моделей. Одна из них излучает статистически не связанные сигналы, вторая – полностью коррелированные. Таким образом, была получена трехточечная неэквилидистантная геометрическая модель, излучающая статистически не связанные сигналы с одним виртуальным излучателем. Получены аналитические соотношения, позволяющие по параметрам одной модели синтезировать другую. Показано, что для каждой двухточечной модели, излучающей статистически связанные сигналы, можно синтезировать бесконечное множество трехточечных неэквилидистантных моделей, отличающихся друг от друга положением одного из излучателей. Сформулированы рекомендации по выбору положения виртуального излучателя трехточечной неэквилидистантной модели, обеспечивающей наиболее широкий диапазон управления параметрами угловых шумов модели. Полученные результаты могут быть использованы при синтезе двухточечной геометрической модели, излучающей статистически связанные сигналы и обеспечивающей заданную корреляционную функцию угловых шумов.

Ключевые слова: имитация, двухточечная геометрическая модель, трехточечная неэквилидистантная модель.

Для цитирования: Киселев А. В., Подкопаев А. О., Степанов М. А. Об эквивалентности двухточечной частично когерентной геометрической модели и трехточечной некогерентной // Радиопромышленность. 2018. № 1. С. 62–67.

A. V. Kiselev, A. O. Podkopaev, M. A. Stepanov

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

ON THE EQUIVALENCE OF A TWO-POINT PARTIALLY COHERENT GEOMETRIC MODEL AND A THREE-POINT INCOHERENT ONE

The equivalence of a two-point geometric model radiating statistically coupled normal random processes and a three-point non-equidistant geometric model radiating randomly unrelated normal random processes is shown. A two-point model that emits statistically coupled signals is represented as a superposition of two models. One of them emits statistically unrelated signals. The second emits completely correlated ones. Thus, a three-point non-equidistant geometric model was obtained, radiating statistically unrelated signals with one virtual radiator. Analytic relationships are obtained that allow to synthesize one model according to the parameters of the other model. It is shown that for each two-point model that emits statistically coupled signals it is possible to synthesize an infinite set of three-point non-equidistant models differing from each other by the position of one of the radiators. Recommendations are formulated on the choice of the position of the virtual radiator of the three-point non-equidistant model, which provides the widest range of control of the model's angular noise parameters. The obtained results can be used in the synthesis of a two-point geometric model that emits statistically coupled signals and provides a given correlation function of the angular noise.

Keywords: imitation, two-point geometric model, three-point non-equidistant model.

For citation: Kiselev A. V., Podkopaev A. O., Stepanov M. A. On the equivalence of a two-point partially coherent geometric model and a three-point incoherent one. Radiopromyshlennost, 2018, no. 1, pp. 62–67 (In Russian).

Введение

При имитации сигналов, отраженных от распределенных объектов, используется система излучателей (матричный имитатор) и непосредственно имитатор, отвечающий за формирование сигналов с требуемыми параметрами [1]. В простейшем случае матричный имитатор представляет собой двухточечную модель: два излучателя, разнесенные в пространстве. Если система излучателей не разрешается приемной антенной, то два источника излучения для нее сливаются в один, называемый кажущимся центром излучения (КЦИ). Положение КЦИ зависит от комплексных амплитуд сигналов излучателей, поэтому, если в качестве сигналов использовать случайные процессы, то положение КЦИ во времени будет случайным. Это явление называется шумами угловых координат. Шумы угловых координат описываются плотностью распределения вероятности (ПРВ) положения КЦИ и спектрально-корреляционными характеристиками сигналов [2–4]. ПРВ положения КЦИ зависит от двух параметров: математическое ожидание и параметр ширины ПРВ. Спектрально-корреляционные характеристики сигналов определяют скорость изменения положения КЦИ.

Статистическая зависимость сигналов определяется коэффициентом их взаимной корреляции r . При $r = 0$ источники излучают статистически независимые сигналы. Такая модель называется некогерентной. При $|r| = 1$ источники излучают полностью статистически связанные сигналы: одинаковые сигналы ($r = 1$) или сигналы, модули которых равны, но знаки противоположны ($r = -1$). Такая модель называется когерентной. При значении коэффициента корреляции, лежащем в диапазоне $r \in (-1; 0) \cup (0; 1)$, источники излучают частично связанные сигналы. Будем называть такую модель частично когерентной.

Рассмотрим частично когерентную двухточечную модель. Пусть источники излучения располагаются в точках -1 и 1 на оси обобщенных координат oX . СКО сигнала первого излучателя – σ_1 , второго – σ_2 . Конфигурация точек модели представлена на рис. 1. Из [2] известно, что в таком случае параметры ПРВ определяются выражениями

$$m(\gamma, r) = \frac{\gamma^2 - 1}{1 + 2r\gamma + \gamma^2}; \quad (1)$$

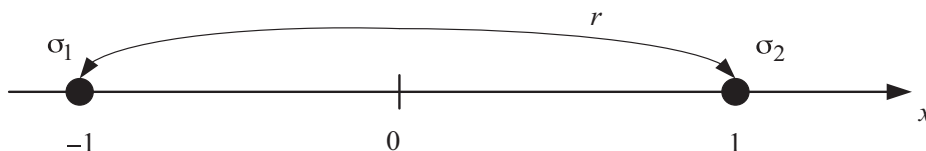


Рисунок 1. Двухточечная модель

$$\mu(\gamma, r) = \frac{1 + 2r\gamma + \gamma^2}{2\gamma\sqrt{1 - r^2}}, \quad (2)$$

где $\gamma = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$ – отношение СКО сигналов излучателей.

Рассматриваемая частично когерентная модель обладает определенными преимуществами по сравнению с двухточечной некогерентной моделью.

В некогерентной двухточечной модели параметры ПРВ угловых шумов оказываются связанными друг с другом. Для обеспечения возможности отдельного управления этими параметрами приходится увеличивать число излучающих точек и переходить к трехточечной неэквидистантной геометрической модели [5]. Частично когерентная модель свободна от этого недостатка и позволяет управлять этими параметрами отдельно в пределах $\mu \in [0; \infty)$ и $m \in [-1; 1]$ [2, 6].

Однако на данный момент математический аппарат для описания спектрально-корреляционных характеристик двухточечной частично когерентной модели не разработан. Вместе с тем существует хорошо проработанный аппарат описания этих характеристик для трехточечной модели с излучателями статистически независимых сигналов [7]. Этим аппаратом можно воспользоваться, если определить эквивалентность рассматриваемой двухточечной частично когерентной модели и трехточечной некогерентной, что и является целью данной работы.

Декомпозиция двухточечной модели

Рассмотрим двухточечную частично когерентную модель. Известно, что коррелированные сигналы можно представить в виде суммы двух компонент [8, 9]. Одна из компонент является общей для двух сигналов, вторая является случайной добавкой. При формировании двух сигналов с заданной величиной коэффициента взаимной корреляции происходит сложение общей и случайной компоненты со своими весами (СКО).

Пусть $s_1(t)$ и $s_2(t)$ – сигналы, подводимые к первому и второму излучателям двухточечной частично когерентной модели. Они являются нормальными случайными процессами с единичной дисперсией и нулевым математическим ожиданием. Коэффициент их взаимной корреляции обозначим как r . СКО первого сигнала – σ_1 , второго – σ_2 . Пусть A_1 и A_2 – СКО зависимых составляющих первого

и второго сигнала соответственно. СКО независимых составляющих первого и второго сигнала обозначим как A_1' и A_2' соответственно. Сигналы $s_0(t)$, $s_1'(t)$ и $s_2'(t)$ являются статистически независимыми нормальными случайными процессами. С учетом введенных обозначений можно записать выражения, определяющие сигналы, излучаемые двухточечной моделью:

$$\begin{cases} \sigma_1 s_1(t) = A_1 s_0(t) + A_1' s_1'(t); \\ \sigma_2 s_2(t) = A_2 s_0(t) + A_2' s_2'(t). \end{cases} \quad (3)$$

В силу статистической независимости сигналов $s_0(t)$, $s_1'(t)$ и $s_2'(t)$ дисперсии сигналов, излучаемых двухточечной моделью, определяются как

$$\begin{cases} \sigma_1^2 = A_1^2 + A_1'^2; \\ \sigma_2^2 = A_2^2 + A_2'^2. \end{cases} \quad (4)$$

Статистическая зависимость сигналов $S_1(t) = \sigma_1 s_1(t)$ и $S_2(t) = \sigma_2 s_2(t)$ определяется коэффициентом их взаимной корреляции:

$$r = \frac{R(\tau)}{\sigma_1 \sigma_2} \Big|_{\tau=0} = \frac{R(0)}{\sigma_1 \sigma_2},$$

где $R(\tau)$ – взаимная корреляционная функция (ВКФ) сигналов $S_1(t)$ и $S_2(t)$.

Определим $R(\tau)$ с учетом (3):

$$\begin{aligned} R(\tau) &= \int_{-\infty}^{\infty} S_1(t) S_2(t-\tau) dt = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} (A_1 s_0(t) + A_1' s_1'(t)) (A_2 s_0(t-\tau) + A_2' s_2'(t-\tau)) dt = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} A_1 A_2 s_0(t) s_0(t-\tau) dt + \int_{-\infty}^{\infty} A_1 A_2' s_0(t) s_2'(t-\tau) dt + \\ &+ \int_{-\infty}^{\infty} A_1' A_2 s_1'(t) s_0(t-\tau) dt + \int_{-\infty}^{\infty} A_1' A_2' s_1'(t) s_2'(t-\tau) dt. \end{aligned}$$

Так как случайные процессы с разными индексами – статистически независимые, выражение для ВКФ сильно упрощается из-за равенства нулю всех интегралов, кроме первого:

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} A_1 A_2 s_0(t) s_0(t-\tau) dt = A_1 A_2 \int_{-\infty}^{\infty} s_0(t) s_0(t-\tau) dt.$$

Поскольку $s_0(t)$ – нормальный случайный процесс, оставшийся интеграл при $\tau = 0$ равен 1 [10].

Тогда выражение для коэффициента взаимной корреляции сигналов, излучаемых двухточечной моделью, примет вид

$$r = \frac{R(0)}{\sigma_1 \sigma_2} = \frac{A_1 A_2}{\sigma_1 \sigma_2} = \frac{A_2^2 z}{\sigma_1^2 \gamma}, \quad (5)$$

где $z = \frac{A_1}{A_2}$.

Анализируя (3), двухточечную частично когерентную модель можно представить в виде суммы

двухточечной когерентной и двухточечной некогерентной моделей. К двухточечной когерентной модели относятся составляющие $A_1 s_0(t)$ и $A_2 s_0(t)$. Эти излучаемые сигналы образуют компактный кажущийся центр излучения, координата которого определяется отношением СКО излучаемых сигналов и может быть рассчитана по выражению $\Delta x = \frac{1-z}{1+z}$.

Сигнал, излучаемый КЦИ: $A_3 s_0(t) = A_1 s_0(t) + A_2 s_0(t)$, где $A_3 = A_1 + A_2$ – СКО суммарного сигнала.

К двухточечной некогерентной модели относятся составляющие $A_1' s_1'(t)$ и $A_2' s_2'(t)$. Расположение точек такой модели совпадает с расположением точек исходной частично когерентной модели. Первая точка излучает сигнал $A_1' s_1'(t)$, вторая – $A_2' s_2'(t)$.

Рассматривая суперпозицию когерентной и некогерентной моделей, получим трехточечную некогерентную геометрическую модель. Третий источник при этом является виртуальным. Схематично структура перехода показана на рис. 2.

Рассмотрим полученную трехточечную некогерентную модель.

Первый излучатель модели имеет координату $x_1 = -1$ и излучает сигнал с СКО A_1' . Второй излучатель располагается в точке $x_2 = 1$ и излучает сигнал с СКО A_2' . Третий излучатель располагается между первыми двумя в точке $x_3 = \Delta x$ и излучает сигнал с СКО A_3 .

Параметры ПРВ положения КЦИ для такой модели зависят как от положений излучателей, так и от их СКО [5]:

$$m = \frac{x_1 \gamma_1^2 + x_2 \gamma_2^2 + x_3}{\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + 1}, \quad (6)$$

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\frac{x_1^2 \gamma_1^2 + x_2^2 \gamma_2^2 + x_3^2}{\gamma_1^2 + \gamma_1^2 + 1} - \left(\frac{x_1 \gamma_1^2 + x_2 \gamma_2^2 + x_3}{\gamma_1^2 + \gamma_1^2 + 1} \right)^2}}. \quad (7)$$

где $\gamma_1 = \frac{A_1'}{A_3}$ и $\gamma_2 = \frac{A_2'}{A_3}$ – нормированные к СКО сигнала третьего излучателя СКО первого и второго сигналов соответственно.

Выражения (6) и (7) упрощаются для заданных координат излучающих точек модели:

$$m = \frac{\gamma_2^2 - \gamma_1^2 + \Delta x}{\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + 1}, \quad (8)$$

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\frac{\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \Delta x^2}{\gamma_1^2 + \gamma_1^2 + 1} - \left(\frac{\gamma_2^2 - \gamma_1^2 + \Delta x}{\gamma_1^2 + \gamma_1^2 + 1} \right)^2}}. \quad (9)$$

Используя (4), преобразуем выражения для нормированных дисперсий к виду

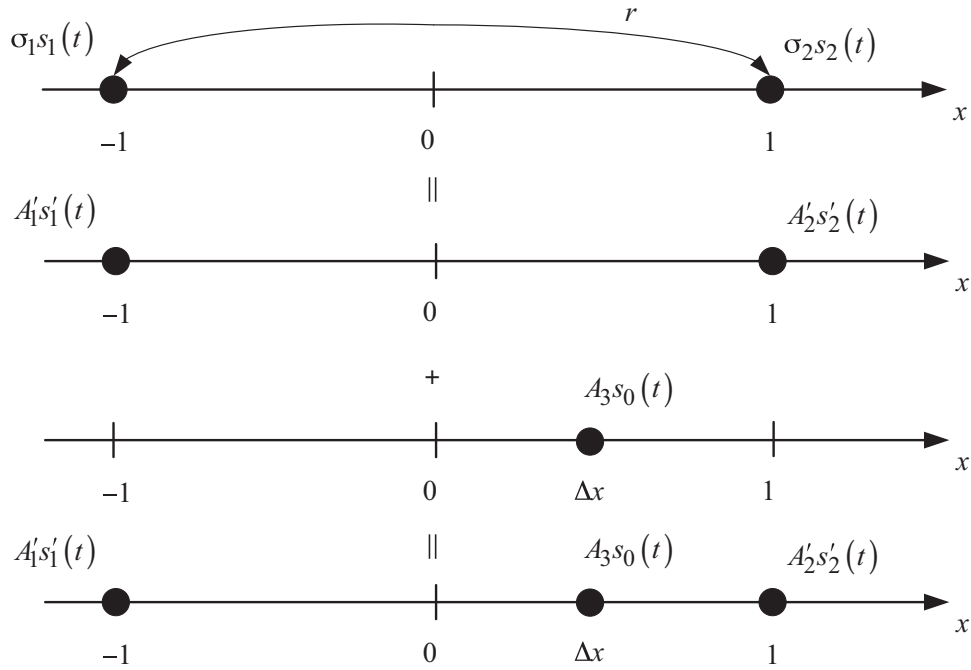


Рисунок 2. Переход от двухточечной частично когерентной модели к трехточечной некогерентной

$$\begin{cases} \gamma_1^2 = \frac{A_1^2}{A_3^2} = \frac{\sigma_1^2 - A_1^2}{(A_1 + A_2)^2} = \frac{\sigma_1^2 - z^2 A_2^2}{A_2^2 (1+z)^2}; \\ \gamma_2^2 = \frac{A_2^2}{A_3^2} = \frac{\sigma_2^2 - A_2^2}{A_2^2 (1+z)^2}. \end{cases} \quad (10)$$

Подставим (10) в (8), и после несложных, но громоздких математических преобразований получим

$$m = \frac{\frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2} - 1}{1 + 2z \frac{A_2^2}{\sigma_1^2} + \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2}} = \frac{\gamma^2 - 1}{1 + 2z \frac{A_2^2}{\sigma_1^2} + \gamma^2}.$$

С учетом (5) полученное выражение для математического ожидания трехточечной неэквидистантной некогерентной модели оказывается тождественно равным (1).

Рассмотрим параметр μ . Для этого подставим (10) в (9), и после преобразований получим

$$\mu = \frac{1 + 2\gamma r + \gamma^2}{\sqrt{4\gamma^2 - (2\gamma r)^2}} = \frac{1 + 2\gamma r + \gamma^2}{2\gamma \sqrt{1 - r^2}}.$$

Полученное выражение тождественно равно (2).

Таким образом, получено, что выражения, определяющие параметры ПРВ для двухточечной частично когерентной модели и трехточечной неэквидистантной некогерентной, совпадают, следовательно, такой переход от двухточечной модели к трехточечной и наоборот возможен и адекватен.

Аналитические соотношения для перехода между рассматриваемыми моделями

Получим аналитические соотношения, позволяющие осуществить переход от двухточечной частично когерентной геометрической модели к некогерентной трехточечной неэквидистантной. Предположим, что излучающие точки частично когерентной двухточечной модели имеют нормированные координаты $x_1 = -1$ и $x_2 = 1$. Исходя из требуемых значений m и μ , используя соотношения (1) и (2), определим параметры сигналов, излучаемых частично когерентной двухточечной моделью (r , σ_1^2 и σ_2^2). Синтез эквивалентной некогерентной геометрической модели можно осуществить, решив систему уравнений

$$\begin{cases} \sigma_1^2 = A_1^2 + A_1'^2; \\ \sigma_2^2 = A_2^2 + A_2'^2; \\ r = \frac{A_1 A_2}{\sigma_1 \sigma_2}; \\ \Delta x = \frac{1 - z}{1 + z}. \end{cases} \quad (11)$$

В системе (11) четыре уравнения и пять неизвестных величин, определяющих параметры некогерентной трехточечной неэквидистантной модели (A_1, A_2, A_1', A_2' и Δx). Это говорит о существовании более чем одного решения данной системы уравнений. Каждое решение системы определяет свою некогерентную трехточечную неэквидистантную геометрическую модель. Эти модели в первую

очередь различаются между собой координатой третьего виртуального излучателя.

С учетом неопределенного положения виртуального излучателя решение системы (11) принимает вид

$$\begin{cases} A_1^2 = \frac{1-\Delta x}{1+\Delta x} r\sigma_1\sigma_2; \\ A_2^2 = \frac{1+\Delta x}{1-\Delta x} r\sigma_1\sigma_2; \\ A_1'^2 = \sigma_1^2 - \frac{1-\Delta x}{1+\Delta x} r\sigma_1\sigma_2; \\ A_2'^2 = \sigma_2^2 - \frac{1+\Delta x}{1-\Delta x} r\sigma_1\sigma_2. \end{cases} \quad (12)$$

В [5] исследованы свойства некогерентных геометрических моделей, а также их возможности по замещению отражений от распределенных объектов. Там же приводятся соотношения, определяющие границы диапазона, в пределах которого могут лежать параметры ПРВ угловых шумов, формируемых моделью. Применительно к используемым обозначениям они могут быть записаны как

$$\begin{cases} \mu \leq \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{-(m-x_2)(m-\Delta x)}}; \\ \frac{1}{\sqrt{-(m-\Delta x)(m-x_1)}}; \end{cases} \\ \mu \geq \frac{1}{\sqrt{-(m-x_2)(m-x_1)}}. \end{cases} \quad (13)$$

Видно, что границы этого диапазона полностью определяются положением излучающих точек. Установка же требуемых параметров ПРВ угловых шумов, лежащих в пределах границ диапазона,

обеспечивается заданием мощностей излучаемых сигналов.

Из (13) видно, что максимальный диапазон регулировки параметра μ ПРВ угловых шумов, формируемых трехточечной неэквидистантной моделью, наблюдается при $m = \Delta x$. Тогда в соотношениях (12) закономерно положить $\Delta x = m$.

Заключение

Выражения, определяющие параметры ПРВ для двухточечной модели, составленной из излучателей частично коррелированных сигналов и трехточечной модели излучателей статистически независимых сигналов с одним виртуальным источником, совпадают, следовательно, такой переход от двухточечной модели к трехточечной и наоборот возможен и адекватен. Доказанная эквивалентность моделей позволит развить математический аппарат синтеза трехточечных неэквидистантных моделей, излучающих статистически не связанные сигналы, с заданными корреляционными свойствами угловых шумов на случай моделей, излучающих статистически связанные сигналы.

Показано, что для каждой двухточечной геометрической модели, излучающей статистически связанные сигналы, можно синтезировать бесконечное множество трехточечных неэквидистантных моделей. Эти модели будут отличаться друг от друга положением виртуального излучателя. Сформулированы рекомендации по выбору местоположения виртуального излучателя, и получены аналитические соотношения, позволяющие по известным параметрам двухточечной частично когерентной модели синтезировать трехточечную некогерентную неэквидистантную модель.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Maples V. N., Eastman G. A. Radar scene simulator: pat. 4660041 USA. 1987.
2. Островитянов Р. В., Басалов Ф. А. Статистическая теория радиолокации протяженных целей. М.: Радио и связь, 1982. 232 с.
3. Справочник по радиолокации / под ред. М. И. Сколника; пер. с англ. под общ. ред. В. С. Вербы. В 2 кн. Кн. 2. М.: Техносфера, 2014. Т. 2. 680 с.
4. Монаков А. А., Мишура Т. П. Радиолокация протяженных целей: измерение дальности, разрешение и синтез сигналов. СПб.: ГУАП, 2012. 137 с.
5. Никулин А. В., Киселев А. В., Тырыкин С. В. Малоточечная модель протяженного отражающего объекта // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2015. № 4. С. 78–88.
6. Монаков А. А., Островитянов Р. В., Храмченко Г. К. Оценка положения энергетического центра протяженного объекта по зависимой выборке // Радиотехника. 1998. № 1. С. 25.
7. Артюшенко В. В., Киселев А. В., Степанов М. А. Моделирование корреляционных характеристик шумов координат распределенных объектов // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2015. № 4. С. 19–27.
8. Быков В. В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике. М.: Советское радио, 1971. 328 с.
9. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. 4-е изд. М.: Наука, 1978. 832 с.
10. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Советское радио, 1966. Т. 1. 728 с.

REFERENCES

1. Maples V. N., Eastman G. A. Radar scene simulator: pat. 4660041 USA. 1987.
2. Ostrovityanov R. V., Basalov F. A. *Statisticheskaja teorija radiolokacii protjazhennyh celej* [Statistical theory of the radar of extended targets]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1982, 232 p. (In Russian).

3. *Spravochnik po radiolokacii* [Handbook on radar]. In: M.I. Skolnik, ed.; Trans. from Eng. In: V.S. Verba, ed. V 2 kn. Kn. 2. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2014, vol. 2, 680 p. (In Russian).
4. Monakov A.A., Mishura T.P. *Radiolokacija protjazhennyh celej: izmerenie dalnosti, razreshenie i sintez signalov* [Radar for extended targets: ranging, resolution and synthesis of signals]. Saint-Petersburg, GUAP, 2012, 137 p. (In Russian).
5. Nikulin A.V., Kiselev A.V., Tyrykin S.V. Malotochechnaja model' protjazhennogo otrazhajushhego obekta [A small-point model of an extended reflecting object]. *Doklady Akademii nauk vysshey shkoly Rossiyskoy Federatsii*, 2015, vol. 4 pp. 78–88 (In Russian).
6. Monakov A.A., Ostrovityanov R.V., Khrumchenko G.K. Ocenka polozhenija jenergeticheskogo centra protjazhennogo obekta po zavisimoi vyborke [Estimation of the position of the energy center of an extended object by a dependent sample]. *Radiotekhnika*, 1998, no. 1, p. 25 (In Russian).
7. Artyushenko V.V., Kiselev A.V., Stepanov M.A. Modelirovanie korrelyacionnyh harakteristik shumov koordinat raspredelennyh obektov [Modeling of correlation characteristics of distributed object angle noises]. *Doklady Akademii nauk vysshey shkoly Rossiyskoy Federatsii*, 2015, no. 4, pp. 19–27 (In Russian).
8. Bykov V.V. *Cifrovoe modelirovanie v statisticheskoj radiotekhnike* [Digital modeling in statistical radio engineering]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1971, 328 p. (In Russian).
9. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike* [Handbook of Mathematics (for scientists and engineers)]. Moscow, Nauka Publ., 1978, 832 p. (In Russian).
10. Levin B.R. *Teoreticheskie osnovy statisticheskoj radiotekhniki* [Theoretical bases of statistical radio engineering]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1966, vol. 1, 728 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Киселев Алексей Васильевич, д.т.н., профессор, зав. кафедрой радиоприемных и радиопередающих устройств, Новосибирский государственный технический университет, 630073, Новосибирск, пр-т Карла Маркса, д.20, тел.: 8 (383) 346-15-46, e-mail: nil_rtu@ngs.ru.

Подкопаев Артемий Олегович, магистрант, кафедра радиоприемных и радиопередающих устройств, Новосибирский государственный технический университет, 630073, Новосибирск, пр-т Карла Маркса, д.20, тел.: 8 (383) 346-15-46.

Степанов Максим Андреевич, к.т.н., доцент, кафедра радиоприемных и радиопередающих устройств, Новосибирский государственный технический университет, 630073, Новосибирск, пр-т Карла Маркса, д.20, тел.: 8 (383) 346-15-46.

AUTHORS

Kiselev Aleksey, PhD, professor, head of Department of Radio Receiving and Transmitting Devices, Novosibirsk State Technical University, 20, prospekt Karla Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, tel.: +7 (383) 346-15-46, e-mail: nil_ngs@ngs.ru.

Podkopaev Artemiy, graduate student, Department of Radio Receiving and Transmitting Devices, Novosibirsk State Technical University, tel.: +7 (383) 346-15-46.

Stepanov Maksim, PhD, associate professor, Department of Radio Receiving and Transmitting Devices, Novosibirsk State Technical University, 20, prospekt Karla Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, tel.: +7 (383) 346-15-46.