ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ
2015 октябрь–декабрь № 4 (29)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.396.96

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШУМОВ КООРДИНАТ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

В.В. Артюшенко, А.В. Киселев, М.А. Степанов
Новосибирский государственный технический университет

Рассмотрен вопрос имитации отражений от распределенных объектов, включая моделирование шумов координат. Необходимость имитации шумов координат распределенных объектов возникает, например, при полунатурном моделировании систем радиолокационного определения координат и скоростей движения целей на сравнительно малых дальностях. Достоверное моделирование шумов координат должно включать воспроизведение не только плотности распределения вероятностей шумов координат, но и их корреляционной функции. Доказано, что при разделимости пространственных и временной переменных в функциях распределения по объему объекта плотности автокорреляции и взаимной корреляции квадратурных составляющих сигналов элементарных отражателей имитация может быть значительно упрощена. В этих условиях достоверное моделирование шумов координат сводится к обеспечению требуемых параметров плотности распределения вероятностей (математического ожидания отклонения кажущегося центра излучения и «эффективной» ширины распределения) и возбуждения излучателей геометрической модели сигналами с корреляционными функциями, пропорциональными корреляционным функциям эхосигнала от реального распределенного объекта. Полученные результаты могут быть использованы для синтеза математических моделей, применяемых при разработке программно-аппаратных комплексов полунатурного моделирования электромагнитных полей, отраженных от распределенных объектов (например, поверхности земли, атмосферных образований, поверхности моря и др.).

Ключевые слова: распределенный объект, полунатурное моделирование, шумы координат, геометрическая модель.

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-4-19-27

Введение

Неотъемлемым элементом полунатурного моделирования радиоэлектронных систем является имитация отражений от распределенных объектов [1]. Распределенный объект (например, участок земной поверхности) можно рассматривать как совокупность большого числа простейших отражающих элементов, случайным образом расположенных в пространстве. В результате фазовый фронт отраженной электромагнитной волны флуктуирует во времени случайным образом. Вектор противоположный градиенту фазового фронта в точке приема указывает на положение кажущегося центра излучения (КЦИ) распределенного объекта. Поэтому положение КЦИ в текущий момент времени может рассматриваться как случайный процесс (часто это явление называют шумами координат (ШК) распределенного объекта).

Статистические характеристики ШК рассматривались многими отечественными и зарубежными учеными [2–6]. Например, глубокий анализ и систематизация полученных результатов приведены в работе [2].

Традиционно считается, что для описания ШК достаточно использовать плотность распределения вероятностей (ПРВ) и корреляционную функцию мгновенного значения положения КЦИ [2, 3].

ПРВ описывается выражением [2]:

$$W\left(\Delta\gamma\right)=\frac{\mu_\gamma}{2\left(1+\mu_\gamma^2\Delta\gamma^2\right)^{3/2}}, \tag{1}$$

где $\Delta\gamma=\gamma-m_\gamma$ – отклонения КЦИ по некоторой обобщенной координате γ (т.е. любой из трех: x, y, z) от математического ожидания m_γ; μ_γ – параметр, определяющий эффективную «ширину» распределения [2]. Таким образом, ПРВ (1) определяется двумя параметрами – m_γ, μ_γ, которые могут быть определены через функцию $F_r\left(x,y,z\right)$, описывающую распределение по объему объекта плотности интенсивности сигналов элементарных отражателей:

$$m_\gamma=\iiint\limits_{x\,y\,z}\gamma F_r\left(x,y,z\right)dxdydz\Big/\sigma_H^2,\ \ \mu_\gamma=\sigma_H/\sigma_B, \tag{2}$$

где

$$\sigma_H^2=\iiint\limits_{x\,y\,z}F_r\left(x,y,z\right)dxdydz,\ \ \sigma_B^2=\iiint\limits_{x\,y\,z}\left(\gamma-m_\gamma\right)^2F_r\left(x,y,z\right)dxdydz.$$

Корреляционная функция ШК [2]:

$$B_\gamma\left(\tau\right)=\frac{a_1(\tau)a_3(\tau)\cos(\eta_1(\tau)-\eta_3(\tau))-a_2^2(\tau)\cos(2(\eta_1(\tau)-\eta_2(\tau)))}{\mu_\gamma^2a_1^2(\tau)}\times \tag{3}$$

$$\times\ln\left(1\Big/\sqrt{1-a_1^2(\tau)}\right)+\frac{a_2^2(\tau)\cos(2(\eta_1(\tau)-\eta_2(\tau)))}{\mu_\gamma^2\left(1-a_1^2(\tau)\right)},$$

где

$$a_1(\tau)=\sqrt{r_H^2(\tau)+s_H^2(\tau)};\ \ a_2(\tau)=\sqrt{r_{BH}^2(\tau)+s_{BH}^2(\tau)};$$

$$a_3(\tau)=\sqrt{r_B^2(\tau)+s_B^2(\tau)};\ \ \eta_1(\tau)=arctg\left(s_H/r_H\right);$$

$$\eta_3(\tau)=arctg\left(s_B/r_B\right);\ \ \eta_2(\tau)=arctg\left(s_{BH}/r_{BH}\right);$$

$$r_H(\tau)=\frac{1}{\sigma_H^2}\iiint\limits_{x\,y\,z}F_r(x,y,z,\tau)\,dxdydz; \tag{4}$$

$$s_H(\tau)=\frac{1}{\sigma_H^2}\iiint\limits_{x\,y\,z}F_s(x,y,z,\tau)\,dxdydz; \tag{5}$$

$$r_B(\tau)=\frac{1}{\sigma_B^2}\iiint\limits_{x\,y\,z}(\gamma-m_\gamma)^2F_r(x,y,z,\tau)\,dxdydz; \tag{6}$$

$$s_B(\tau)=\frac{1}{\sigma_B^2}\iiint\limits_{x\,y\,z}(\gamma-m_\gamma)^2F_s(x,\ y,\ z,\ \tau)\,dxdydz; \tag{7}$$

$$r_{BH}(\tau) = \frac{1}{\sigma_B \sigma_H} \int\limits_x \int\limits_y \int\limits_z (\gamma - m_\gamma) F_r(x, y, z, \tau) dxdydz \; ; \tag{8}$$

$$s_{BH}(\tau) = \frac{1}{\sigma_B \sigma_H} \int\limits_x \int\limits_y \int\limits_z (\gamma - m_\gamma) F_s(x, y, z, \tau) dxdydz \; , \tag{9}$$

$F_r(x, y, z, \tau)$, $F_s(x, y, z, \tau)$ – соответственно функции распределения по объему плотности автокорреляции и взаимной корреляции квадратурных составляющих сигналов элементарных отражателей ($F_r(x, y, z, 0) = F_r(x, y, z)$, а $F_s(x, y, z, 0) = 0$). Данные функции определяют автокорреляционную и взаимно корреляционную функцию квадратурных составляющих сигнала, отраженного от элементарного отражателя, находящегося в точке с координатами (x, y, z).

Функции $r_H(\tau)$, $s_H(\tau)$, $r_B(\tau)$, $s_B(\tau)$, $r_{BH}(\tau)$, $s_{BH}(\tau)$, определяемые выражениями (4)–(9), являются коэффициентами корреляции и зависят от физической структуры распределенного объекта и характера его движения [2].

Особой интерес и перспективу для имитации ШК при полунатурном моделировании представляют так называемые геометрические модели [7–11]. При этом объект замещается набором независимых точечных излучателей, расположенных в пространстве в соответствии с геометрической конфигурацией объекта. Однако на практике невозможно реализовать замещение объекта многоточечной структурой, поэтому приходится ограничиваться несколькими точечными излучателями. В частности, довольно широко описана двухточечная модель, состоящая из двух излучателей, к которым подводятся некоррелированные узкополосные случайные процессы [2, 4, 7–8]. Изменяя мощность сигналов излучателей и расстояние между ними, можно обеспечить флуктуации КЦИ в соответствии с распределением (1). Разработана также трехточечная геометрическая модель с неэквидистантным расположением излучателей, позволяющая независимо управлять параметрами m_γ и μ_γ [7]. В целом вопрос моделирования ШК с точностью до функции распределения освещен достаточно полно. Вместе с тем моделированию корреляционных характеристик ШК уделено крайне мало внимания.

Ниже рассмотрено моделирование корреляционных характеристик ШК в случае, когда функции $F_r(x, y, z, \tau)$ и $F_s(x, y, z, \tau)$ допускают разделимость пространственной и временной переменных. Доказано, что при этом достаточно обеспечить требуемые параметры распределения (1) и подводить к излучателям модели сигналы с корреляционными функциями, с точностью до постоянного множителя совпадающие с корреляционными функциями эхосигнала от замещаемого объекта.

1. Постановка задачи

Рассмотрим геометрическую модель объекта, содержащую N излучающих точек, некоторым образом расположенных в пространстве (см. рисунок).

Очевидно, что достоверная имитация шумов координат реального распределенного объекта достигается при равенстве параметров распределения (1) и корреляционной функции (3) для модели (см. рисунок) и объекта. По сути, необходимо обеспечить равенство параметров m_γ, μ_γ, $r_H(\tau)$, $s_H(\tau)$, $r_B(\tau)$, $s_B(\tau)$, $r_{BH}(\tau)$, $s_{BH}(\tau)$ для модели и объекта. Тогда условия достоверной имитации ШК можно записать в виде:

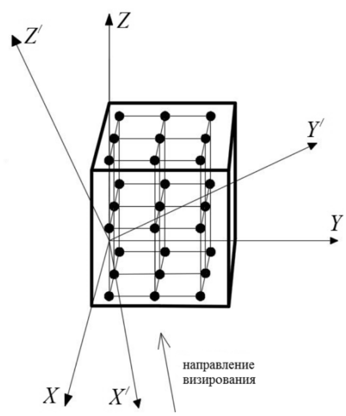
$$m_{\gamma\Sigma} = m_{\gamma\infty}\,;\ \mu_{\gamma\Sigma} = \mu_{\gamma\infty}\,; \tag{10}$$

$$\sum_{i=1}^{N} R_i(\tau) = \sigma_{H\infty}^2 r_{H\infty}(\tau)\,;\ \sum_{i=1}^{N} S_i(\tau) = \sigma_{H\infty}^2 s_{H\infty}(\tau)\,;$$

$$\sum_{i=1}^{N}(\gamma_i - m_\gamma)R_i(\tau) = \sigma_{B\infty}\sigma_{H\infty} r_{BH\infty}(\tau)\,;\ \sum_{i=1}^{N}(\gamma_i - m_\gamma)S_i(\tau) = \sigma_{B\infty}\sigma_{H\infty} s_{BH\infty}(\tau)\,;$$

$$\sum_{i=1}^{N}(\gamma_i - m_\gamma)^2 R_i(\tau) = \sigma_{B\infty}^2 r_{B\infty}(\tau)\,;\ \sum_{i=1}^{N}(\gamma_i - m_\gamma)^2 S_i(\tau) = \sigma_{B\infty}^2 s_{B\infty}(\tau)\,,$$

где $R_i(\tau)$ и $S_i(\tau)$ – соответственно автокорреляционные и взаимно корреляционные функции квадратур сигнала, поступающего на i-й излучатель геометрической модели; индексы «Σ» и «∞» здесь и далее означают принадлежность параметра к модели или объекту соответственно.



N-точечная модель трехмерного отражающего объекта

The N-point model of a three-dimensional reflective object

Пусть визирование объекта ведется вдоль оси X' системы координат $X'Y'Z'$. В этой системе координат имеем $F_{r\infty}(x',\, y',\, z',\, \tau)$ и $F_{s\infty}(x',\, y',\, z',\, \tau)$, пересчитанные из $F_{r\infty}(x,\, y,\, z,\, \tau)$ и $F_{s\infty}(x,\, y,\, z,\, \tau)$. Предположим, что эти функции допускают разделение пространственных и временной переменных:

$$F_{r\infty}(x',y',z',\tau) = F_{r\infty}(x',\ y',\ z')r_\infty(\tau)\,, \tag{11}$$

$$F_{s\infty}(x',\ y',\ z',\ \tau) = F_{s\infty}(x',\ y',\ z')s_\infty(\tau)\,,$$

где $r_\infty(\tau)$ – коэффициент корреляции одноименных квадратурных компонент комплексной огибающей сигнала, отраженного от объекта; $s_\infty(\tau)$ – коэффициент корреляции разноименных квадратурных компонент комплексной огибающей сигнала, отраженного от объекта.

Докажем, что при выполнении условий (11) достоверное моделирование корреляционных характеристик ШК обеспечивается, если получены требуемые параметры распределения (1), а к излучателям модели подведены сигналы с корреляционными функциями, с точностью до постоянного множителя совпадающими с корреляционными функциями эхосигнала от замещаемого объекта.

2. Доказательство

Предположим, что для модели (см. рисунок) выполняется следующее:

$$m_{\gamma\Sigma} = m_{\gamma\infty}\,,\ \mu_{\gamma\Sigma} = \mu_{\gamma\infty}\,.$$

При разделимости переменных в функциях $F_{r\infty}(x',\, y',\, z',\, \tau)$ и $F_{s\infty}(x',\, y',\, z',\, \tau)$ выражения для коэффициентов (4)–(9) приобретают вид

$$r_{H\infty}(\tau) = r_\infty(\tau)\frac{1}{\sigma_{H\infty}^2}\underbrace{\int\limits_{x'}\int\limits_{y'}\int\limits_{z'} F_{r\infty}\left(x',y',z'\right)dx'dy'dz'}_{\sigma_{H\infty}^2}\,; \tag{12}$$

$$s_{H\infty}(\tau) = s_{\infty}(\tau)\frac{1}{\sigma^2_{H\infty}} \underbrace{\int\limits_{x'}\int\limits_{y'}\int\limits_{z'} F_{r\infty}\left(x', y', z'\right) dx'dy'dz'}_{\sigma^2_{H\infty}}; \tag{13}$$

$$r_{B\infty}(\tau) = r_{\infty}(\tau)\frac{1}{\sigma^2_{B\infty}} \underbrace{\int\limits_{x'}\int\limits_{y'}\int\limits_{z'} \left(x' - m_{x'}\right)^2 F_{r\infty}\left(x', y', z'\right) dx'dy'dz'}_{\sigma^2_{B\infty}}; \tag{14}$$

$$s_{B\infty}(\tau) = s_{\infty}(\tau)\frac{1}{\sigma^2_{B\infty}} \underbrace{\int\limits_{x'}\int\limits_{y'}\int\limits_{z'} \left(x' - m_{x'}\right)^2 F_{r\infty}\left(x',\ y',\ z'\right) dx'dy'dz'}_{\sigma^2_{B\infty}}; \tag{15}$$

$$r_{BH\infty}(\tau) = \frac{r_{\infty}(\tau)}{\sigma_{B\infty}\sigma_{H\infty}} \underbrace{\int\limits_{x'}\int\limits_{y'}\int\limits_{z'} \left(x' - m_{x'}\right) F_{r\infty}\left(x',\ y',\ z'\right) dx'dy'dz'}_{=0} = 0; \tag{16}$$

$$s_{BH\infty}(\tau) = \frac{s_{\infty}(\tau)}{\sigma_{B\infty}\sigma_{H\infty}} \underbrace{\int\limits_{x'}\int\limits_{y'}\int\limits_{z'} \left(x' - m_{x'}\right) F_{s\infty}(x', y', z')\, dx'dy'dz'}_{=0} = 0. \tag{17}$$

Равенство нулю отмеченных множителей в выражениях (16) – (17) вытекает из определения параметра m_{γ} (2).

Сокращая в выражениях (12)–(17) одноименные параметры, получим:

$$r_{H\infty}(\tau) = r_{\infty}(\tau);\ s_{H\infty}(\tau) = s_{\infty}(\tau); \tag{18}$$

$$r_{B\infty}(\tau) = r_{\infty}(\tau);\ s_{B\infty}(\tau) = s_{\infty}(\tau); r_{BH\infty}(\tau) = s_{BH\infty}(\tau) = 0.$$

Перепишем условия адекватного моделирования шумов координат (10), касающиеся спектрально-корреляционных характеристик, с учетом (18):

$$\sum_{i=1}^{N} R_i(\tau) = \sigma^2_{H\infty} r_{\infty}(\tau),\ \sum_{i=1}^{N} S_i(\tau) = \sigma^2_{H\infty} s_{\infty}(\tau), \tag{19}$$

$$\sum_{i=1}^{N} (\gamma_i - m_{\gamma\infty}) R_i(\tau) = 0,\ \sum_{i=1}^{N} (\gamma_i - m_{\gamma\infty}) S_i(\tau) = 0,$$

$$\sum_{i=1}^{N} (\gamma_i - m_{\gamma\infty})^2 R_i(\tau) = \sigma^2_{B\infty} r_{\infty}(\tau),\ \sum_{i=1}^{N} (\gamma_i - m_{\gamma\infty})^2 S_i(\tau) = \sigma^2_{B\infty} s_{\infty}(\tau).$$

Пусть к излучателям модели (см. рисунок) подводятся сигналы с корреляционными функциями квадратурных составляющих вида

$$R_i(\tau) = \sigma_i^2 r_{\infty}(\tau),\ S_i(\tau) = \sigma_i^2 s_{\infty}(\tau). \tag{20}$$

При этом мощности сигналов, подводимых к излучателям, выбраны таким образом, что

$$\sum_{i=1}^{N} \sigma_i^2 = \sigma^2_{H\infty}.$$

В этом случае условия адекватного моделирования ШК (19) можно записать в виде:

$$\sum_{i=1}^{N}\sigma_i^2 r_\infty(\tau)=\sigma_{H\infty}^2 r_\infty(\tau),\ \sum_{i=1}^{N}\sigma_i^2 s_\infty(\tau)=\sigma_{H\infty}^2 s_\infty(\tau), \tag{21}$$

$$\sum_{i=1}^{N}(\gamma_i-m_{\gamma\infty})\sigma_i^2 r_\infty(\tau)=0,\ \sum_{i=1}^{N}(\gamma_i-m_{\gamma\infty})\sigma_i^2 s_\infty(\tau)=0,$$

$$\sum_{i=1}^{N}(\gamma_i-m_{\gamma\infty})^2\sigma_i^2 r_\infty(\tau)=\sigma_{B\infty}^2 r_\infty(\tau),\ \sum_{i=1}^{N}(\gamma_i-m_{\gamma\infty})^2\sigma_i^2 s_\infty(\tau)=\sigma_{B\infty}^2 s_\infty(\tau).$$

Сокращая в полученных выражениях (21) $r_\infty(\tau)$ и $s_\infty(\tau)$ и учитывая, что $r_\infty(\tau)\neq 0$, $s_\infty(\tau)\neq 0$, получаем:

$$\sum_{i=1}^{N}\sigma_i^2=\sigma_{H\infty}^2, \tag{22}$$

$$\sum_{i=1}^{N}(\gamma_i-m_{\gamma\infty})\sigma_i^2=0,$$

$$\sum_{i=1}^{N}(\gamma_i-m_{\gamma\infty})^2\sigma_i^2=\sigma_{B\infty}^2.$$

Полученные уравнения (22) содержат только мощности сигналов и координаты излучателей. По сути, они определяют условия, при выполнении которых обеспечивается равенство параметров распределения ШК m_γ и μ_γ для модели и объекта, т.е. достоверное моделирование ПРВ ШК. При этом моделирование корреляционных характеристик ШК обеспечивается за счет того, что к излучающим точкам модели подводятся сигналы с автокорреляционной и взаимно корреляционной функциями квадратурных составляющих вида (20).

Предлагаемый подход к имитации отражений от распределенных объектов не зависит от типа зондирующего сигнала и может быть применен, в частности, при моделировании отражения от земной поверхности широкополосного зондирующего сигнала. При этом сигналы, подаваемые на излучатели, представляют собой излученный зондирующий сигнал с наложенными на него доплеровскими флуктуациями.

Заключение

Таким образом, при разделимости пространственной и временной переменных в функциях $F_r(x, y, z, \tau)$ и $F_s(x, y, z, \tau)$ распределенного объекта достоверная имитация характеристик ШК сводится к обеспечению равенства параметров ПРВ для модели и объекта. При этом на излучатели геометрической модели необходимо подавать сигналы с корреляционными функциями, пропорциональными корреляционным функциям эхосигнала от замещаемого объекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вопросы реализации имитатора входных сигналов систем ближней радиолокации для полунатурного моделирования помех от подстилающей поверхности / К.А. Антонов, В.О. Григорьев, В.Б. Сучков, М.Г. Фабричный // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение. – 2006. – № 4. – С. 45–59.
2. **Островитянов Р.В., Басалов Ф.А.** Статистическая теория радиолокации протяженных целей. – М.: Радио и связь, 1982. – 232 с.
3. **Skolnik M.I.** Radar handbook. – 3rd ed. – New York: McGraw Hill, 2008. – 1352 p.
4. **Островитянов Р.В., Басалов Ф.А.** Статистические характеристики больших выбросов углового шума // Радиотехника и электроника. – 1974. – Т. 19, № 2. – С. 431–432.
5. **Делано Р.** Теория «мерцания» цели и угловые ошибки при радиолокационном сопровождении // Вопросы радиолокационной техники. – 1954. – № 1. – С. 108–119.
6. **Губонин Н.С.** Флюктуации фазового фронта волны, отраженной от сложной цели // Радиотехника и электроника. – 1965. – Т. 11, № 5. – С. 844–852.
7. **Никулин А.В., Степанов М.А.** Замещение распределенного объекта трехточечной геометрической моделью // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Радиолокационная техника (РЛТ). – 2014. – № 2. – С. 77–85.
8. **Киселев А.В., Никулин А.В., Тырыкин С.В.** Малоточечная модель протяженного отражающего объекта // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2014. – № 4 (25). – С. 79–89. – doi: 10.17212/1727-2769-2014-4-79-89.
9. **Артюшенко В.В., Киселев А.В.** Геометрическая модель двумерных отражающих объектов // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Общетехническая (ОТ). – 2015. – № 3. – С. 44–51.
10. **Artyushenko V.V., Kiselev A.V.** The geometric model of two-dimensional reflective objects // Proceedings of 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM–2015), Altai, Erlagol, 29 June – 3 July 2015. – Novosibirsk: NSTU Publ.: IEEE, 2015. – P. 107–109. – doi: 10.1109.EDM.2015.7184500.
11. **Артюшенко В.В., Киселев А.В., Степанов М.А.** Задание отражающих свойств распределенных объектов в терминах шумов координат // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2015. – № 3 (28). – С. 18–29. – doi: 10.17212/1727-2769-2015-3-18-29.

MODELING OF CORRELATION CHARACTERISTICS OF DISTRIBUTED OBJECT ANGLE NOISES

Artyushenko V.V., Kiselev A.V., Stepanov M.A.
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

The simulation of reflections from distributed objects including modeling of angle noises is considered. The simulation of distributed object angle noises is implemented, for instance, for a semi- realistic simulation of radar systems for determining coordinates and velocities of target motion at relatively small ranges. A reliable simulation should include the reproduction of not only the density of angle noise probability distribution but also its correlation function. It is proved that with the separability of spatial and time variables in distribution functions by the volume of the object autocorrelation function and cross-correlation of signal quadrature components of elementary reflectors, the simulation can be significantly simplified. Under these conditions the validated simulation of angle noises is to ensure the required parameters of the probability distribution density (mathematical expectations of the apparent radiation center deviation and an “effective” distribution width) and the excitation of geometric model radiators by signals with correlation functions proportional to the correlation functions of the echo from a real distributed object. These results can be used for the synthesis of mathematical models used for developing hardware-software systems for the semi-realistic simulation of electromagnetic fields reflected from distributed objects e.g. the ground surface, atmospheric inhomogeneities, the sea surface, etc.

Keywords: Surface-distributed object; semi-realistic simulation; angle noise; geometric model.

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-4-19-27

REFERENCES

1. Antonov K.A., Grigor'ev V.O., Suchkov V.B., Fabrichnyi M.G. Voprosy realizatsii imitatora vkhodnykh signalov sistem blizhnei radiolokatsii dlya polunaturnogo modelirovaniya pomekh ot podstilayushchei poverkhnosti [Problems of implementation of the input signal imitator of short-range radar systems for quasi full-scale modeling of underlying surface interference]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya "Priborostroenie" – Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series "Insrtument Engineering"*, 2006, no. 4, pp. 45–59.
2. Ostrovityanov R.V., Basalov F.A. *Statisticheskaya teoriya radiolokatsii protyazhennykh tselei* [Statistical theory of extended objectives radar]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1982. 232 p.
3. Skolnik M.I. *Radar handbook*. 3rd ed. New York, McGraw Hill, 2008. 1352 p.
4. Ostrovityanov R.V., Basalov F.A. Statisticheskie kharakteristiki bol'shikh vybrosov uglovogo shuma [Statistical characteristics of large overshoot of angle noise]. *Radiotekhnika i elektronika – Journal of Communications Technology and Electronics*, 1974, vol. 19, no. 2, pp. 431–432. (In Russian)
5. Delano R. Teoriya "mertsaniya" tseli i uglovye oshibki pri radiolokatsionnom soprovozhdenii [Theory of glitter and angular errors during the radar tracking]. *Voprosy radiolokatsionnoi tekhniki – Problems of radar engineering*, 1954, no. 1 (19), pp. 108–119. (In Russian)
6. Gubonin N.S. Flyuktuatsii fazovogo fronta volny, otrazhennoi ot slozhnoi tseli [Fluctuations of phase front of a wave reflected from complex target]. *Radiotekhnika i elektronika – Journal of Communications Technology and Electronics*, 1965, vol. 11, no. 5, pp. 844–852. (In Russian)
7. Nikulin A.V., Stepanov M.A. Zameshchenie raspredelennogo ob"ekta trekhtochechnoi geometricheskoi model'iu [The substitution of a distributed radar object for a three-point model]. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Radiolokatsionnaia tekhnika (RLT) – Problems of electronics. A radar technology series (RLT)*, 2014, no. 2, pp. 77–85.
8. Kiselev A.V., Nikulin A.V., Tyrykin S.V. Malotochechnaya model' protyazhennogo otrazhayushchego ob"ekta [Model of an extended reflecting object consisting of a small number of points]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2014, no. 4 (25), pp. 79–89. doi: 10.17212/1727-2769-2014-4-79-89
9. Artyushenko V.V., Kiselev A.V. Geometricheskaya model' dvumernykh otrazhayushchikh ob"ektov [The geometric model of two-dimensional reflective objects]. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Obshchetekhnicheskaya (OT) – Problems of electronics. General Engineering series*, 2015, no. 3, pp. 44–51.
10. Artyushenko V.V., Kiselev A.V. The geometric model of two-dimensional reflective objects. *Proceedings of 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM–2015)*, Altai, Erlagol, 29 June – 3 July 2015. Novosibirsk, NSTU Publ., IEEE, 2015, pp. 107–109. doi: 10.1109.EDM.2015.7184500
11. Artyushenko V.V., Kiselev A.V., Stepanov M.A. Zadanie otrazhayushchikh svoistv raspredelennykh ob"ektov v terminakh shumov koordinat [Definition of reflective properties of distributed objects in terms of angle noise]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2015, no. 3 (28), pp. 18–29. doi: 10.17212/1727-2769-2015-3-18-29

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Артюшенко Вадим Валерьевич – родился в 1992 году, аспирант кафедры радиоприемных и радиопередающих устройств Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: имитация радиотехнических сигналов. Опубликовано 7 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Email: artushenkomail@mail.ru).

Artyushenko Vadim Valeryevich (b. 1992) – a postgraduate student at the Department of Radio receiving and Radio transmitting Devices, Novosibirsk

State Technical University. His research interests are currently focused on radio signal simulation. He is author of 7 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation, Email: artushenkomail@mail.ru).

Киселев Алексей Васильевич – родился в 1958 году, д-р техн. наук, профессор кафедры радиоприемных и радиопередающих устройств Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: имитационное моделирование сложной радиоэлектронной обстановки, радиолокация, радиосвязь. Имеет более 150 публикаций. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, E-mail: nil_rtu@ngs.ru).

Kiselev Alexey Vasilevich (b. 1958) – Doctor of Science (Eng.), a professor at the Department of Radio receiving and Radio transmitting Devices, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on simulation of complex electronic environment, radar detecting and ranging, and radio communication. He is author more 150 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation, Email: nil_rtu@ngs.ru).

Степанов Максим Андреевич – родился в 1982 году, канд. техн. наук, доцент кафедры радиоприемных и радиопередающих устройств Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: имитационное моделирование сложной радиоэлектронной обстановки, радиолокация, радиосвязь. Опубликовано более 30 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Email: m.stepanov@corp.nstu.ru).

Stepanov Maksim Andreevich (b. 1982) – Candidate of Science (Eng.), Associate Professor at the Department of Radio receiving and Radio transmitting Devices in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on simulation of complex electronic environment, radar detecting and ranging, and radio communication. He is author more 30 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Email: m.stepanov@corp.nstu.ru).

Статья поступила 09 октября 2015 г.
Received October 09, 2015

To Reference:

Artyushenko V.V., Kiselev A.V., Stepanov M.A. Modelirovanie korrelyatsionnykh kharakteristik shumov koordinat raspredelennykh ob"ektov [Modeling of correlation characteristics of distributed object angle noises]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2015, no. 4 (29), pp. 19–27. doi: