



УДК 621.396.96

А. В. Васильева, Н. Н. Калмыков, С. А. Мельников, В. В. Соловьёв

Модель коррелированных сигналов для имитатора скорости корреляционного радиолокационного измерителя

Одной из функций корреляционного радиолокационного измерителя (КРИ) высоты и составляющих вектора скорости является измерение составляющих вектора скорости, основанное на сравнении корреляционных характеристик сигналов, принятых на пространственно разнесенные антенны. Контрольно-проверочная аппаратура КРИ содержит упрощенный имитатор скорости, формирующий транспортные задержки сигналов в соответствии со значениями продольной и поперечной составляющих вектора скорости. Рассмотрена модель коррелированных сигналов, позволяющая имитировать отраженный сигнал, который дает возможность проводить измерение параметров, как по транспортным задержкам, так и по разности максимумов взаимно корреляционных функций (ВКФ).

Ключевые слова: корреляционный радиолокационный измеритель, имитатор скорости, модель коррелированных сигналов

В простейшем случае на имитатор скорости КРИ возложена задача формирования только транспортных задержек сигналов, по которым традиционно определяются параметры продольной V_x и поперечной V_z составляющих вектора скорости. Рассматриваемый имитатор скорости, помимо вышеуказанных корреляционных характеристик, позволяет:

- формировать сигналы с гауссовским распределением амплитуд колебаний, ВКФ которых по форме близки к реальным;
- изменять ширину взаимно корреляционных функций, имитируя тем самым пролет над различными подстилающими поверхностями;
- устанавливать заданные значения максимумов ВКФ, используемые для измерения параметра V_z амплитудным методом.

Цель данной статьи — освещение результатов разработки модели коррелированных сигналов для имитатора скорости, обладающие вышеуказанными характеристиками.

В работе [1] рассмотрены теоретические основы построения имитационной модели сигнала в приемных каналах корреляционного измерителя скорости в общем, а в частности имитатора скорости КРИ. В данной статье предложена практическая реализация модели коррелированных сигналов для имитатора скорости.

Наиболее общая модель земной поверхности — суперпозиция мелкомасштабной и

крупномасштабной непрерывной шероховатой поверхности и объектов, которые могут быть представлены совокупностью дискретных независимых отражателей.

Радиолокационный сигнал, отраженный поверхностью, является случайным процессом, свойства которого изменяются как в пространстве, так и во времени. В отличие от собственного шума приемника этот процесс коррелированный по пространству. При движении летательного аппарата (ЛА) над неоднородной поверхностью процесс в первом приближении можно описать релеевским распределением с корреляцией по времени в зависимости от типа подстилающей поверхности. Такие параметры релеевского процесса, как математическое ожидание и вид корреляционной функции, изменяются по времени в соответствии с высотой ЛА и типом подстилающей поверхности.

Из алгоритма работы КРИ следует, что имитатор должен формировать три сверхвысокочастотных сигнала, поступающих на приемные антенны КРИ. Сигнал, поступающий на такие антенны, можно представить в виде высокочастотного сигнала, модулированного низкочастотным сигналом со случайной амплитудой и фазой.

Формирование моделирующего случайного сигнала происходит согласно алгоритму:

- генерируются шесть случайных процессов $x_1 \dots x_6$ с равномерным распределением;
- на основе полученных равномерных процессов формируются случайные процессы с распределением Гаусса x'_1, \dots, x'_6 (два из них

© Васильева А. В., Калмыков Н. Н., Мельников С. А., Соловьёв В. В., 2016



будут использованы для формирования двух квадратурных составляющих полезного сигнала, остальные четыре случайных процесса – для внесения заданной степени декорреляции сигналов, поступающих на разные антенны);

- полученные случайные процессы пропускаются через фильтр с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтр), после чего получают отсчеты с корреляционной функцией заданного вида.

Согласно [2], максимум ВКФ опишем следующим выражением:

$$\rho = \exp\left(\frac{-2\pi\Delta^2(\tau V)^2}{\lambda^2}\right).$$

Здесь Δ – эффективная ширина диаграммы направленности антенны (ДНА);

τV – разнос приемных антенн в поперечном направлении;

$\tau = \Delta\tau x$ (где $\Delta\tau = N_{\text{уср}}/f$ – шаг дискретизации, x – количество отсчетов);

$N_{\text{уср}}$ – количество усреднений отсчетов;

f – частота дискретизации случайного процесса;

V – модуль вектора скорости;

λ – длина волны излучаемого сигнала.

С изменением диаграммы обратного рассеяния (ДОР) пришлось бы пересчитывать коэффициенты фильтра, для чего потребовался бы запас разрядности для этих коэффициентов. Вместо этого предлагается изменять период дискретизации.

Для Δ , равной $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$, выбираем $N_{\text{уср}}$, равное 512, 256, 171, 128, 85, 64 соответственно. Значения $N_{\text{уср}}$ подобраны таким образом, чтобы произведение Δ на $N_{\text{уср}}$ было постоянным. ВКФ принимает вид, изображенный на рис. 1.

По данным рис. 1, ВКФ практически не меняется от эффективной ширины ДНА, что позволяет имитировать изменение типа подстилающей поверхности.

Как было сказано ранее, для получения случайного сигнала с заданными корреляционными свойствами необходимо выполнить КИХ-фильтрацию над случайным нормальным процессом. Для этого необходимо синтезировать дискретный формирующий фильтр, преобразующий дискретный белый шум в коррелированный дискретный случайный процесс с заданными корреляционно-спектральными характеристиками [3].

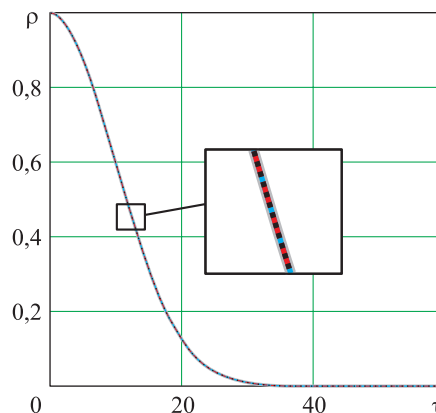


Рис. 1. Изменение ВКФ в зависимости от Δ и $N_{\text{уср}}$; ρ – корреляционная функция

лированный дискретный случайный процесс с заданными корреляционно-спектральными характеристиками [3].

Для нахождения весовых коэффициентов формирующего фильтра используем разложение функции спектральной плотности в ряд Фурье. Спектральную плотность для полученной корреляционной функции находим по формуле

$$G(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \rho(\tau)e^{-j\omega\tau} d\tau = \frac{\lambda}{\Delta V \sqrt{2}} \exp\left(-\frac{\omega^2 \lambda^2}{8\pi\Delta^2 V^2}\right),$$

где ω – угловая частота.

Весовые коэффициенты находим как коэффициенты Фурье в разложении в ряд по косинусам функции спектральной плотности моделируемого процесса, возведенной в степень 0,5:

$$c_k = \frac{1}{\omega_c} \int_0^{\omega_c} \sqrt{G(\omega)} \cos\left(\frac{k\pi\omega}{\omega_c}\right) d\omega,$$

где $\omega_c = \pi/\Delta\tau$.

Для упрощения аппаратной реализации фильтрации в имитаторе приведем весовые коэффициенты к следующему виду:

$$c_k = \left[\frac{256 \cdot 6c_k}{S_c} + 0,5 \right]_{\text{ц.ч.}},$$

где k – индекс коэффициентов;

S_c – сумма весовых коэффициентов формирующего фильтра. Индекс ц.ч. обозначает целую часть.

На рис. 2 показана зависимость весовых коэффициентов формирующего фильтра

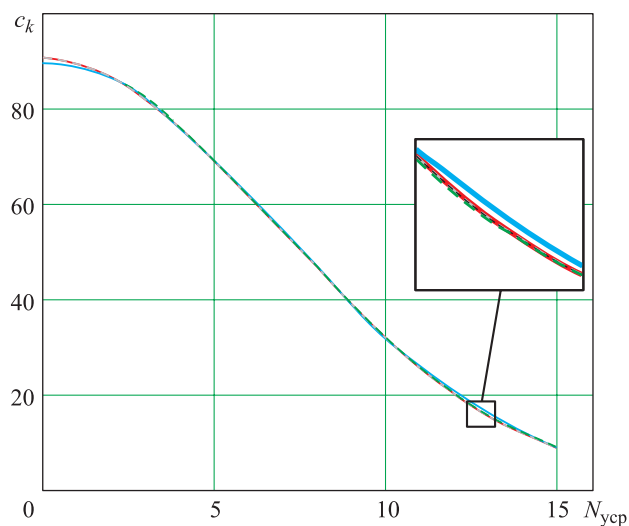


Рис. 2. Зависимость весовых коэффициентов c_k формирующего фильтра от количества усреднений отсчетов $N_{\text{ср}}$

от количества усреднений отсчетов $N_{\text{ср}}$ (при $N_{\text{ср}} > 16$ график будет асимптотически стремиться к нулю).

Весовые коэффициенты практически не зависят от значений ширины ДОР и значения прореживания (см. рис. 2).

Для формирования коррелированных отсчетов в имитаторе используется формирующий фильтр 31-го порядка [4], поэтому рассчитываем 16 весовых коэффициентов. Коэффициенты c_1, \dots, c_{15} являются симметричными коэффициентам c_{16}, \dots, c_{30} .

Функциональная схема имитатора коррелированных сигналов в приемных каналах КРИ представлена на рис. 3.

Генераторы случайных последовательностей (ГСП) в паре с преобразователями в гауссовский сигнал (ПГС) выдают шесть нормально распределенных случайных процессов. Формирователи коррелированных сигналов (ФКС) ограничивают ширину спектра с помощью формирующего фильтра, обеспечивая заданную ширину ВКФ. Данные с выхода фильтра поступают в буферную память, на которой реализуется цифровая линия задержки. С ее помощью задаются транспортные задержки сигналов, соответствующие значениям продольной V_x и поперечной V_z составляющих вектора скорости. При умножении на коэффициенты корреляции сигнальных процессов и коэффициенты декорреляции шумовых процессов формируются законы модуляции,

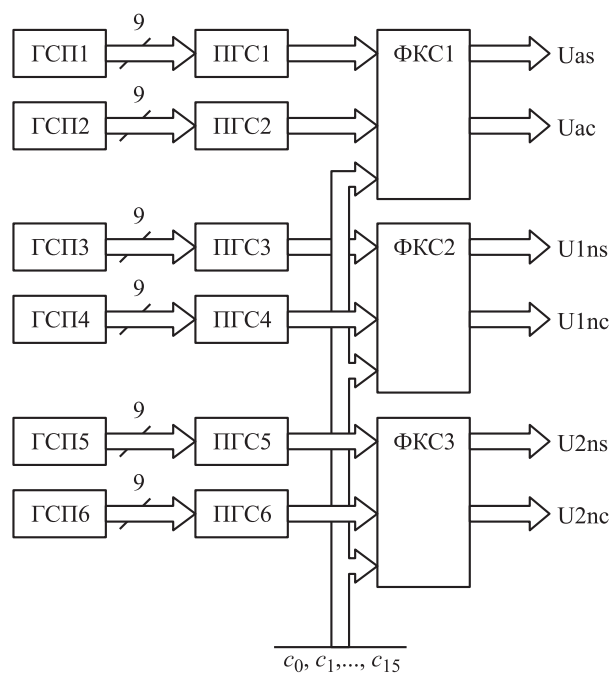


Рис. 3. Функциональная схема имитатора коррелированных сигналов

ВКФ которых будут иметь требуемые значения максимумов. Полученные законы применяются для модуляции сигналов, поступающих в приемные каналы КРИ по амплитуде и фазе с помощью цифровых управляемых аттенюаторов и фазовращателей.

Ниже приведем процедуры, необходимые для получения трех случайных сигналов, используемых для модулирования сигналов в трех приемных каналах КРИ (см. рис. 3).

1. Сформировать шесть равномерных случайных процессов; для этого используем мультипликативный алгоритм:

$$x_{i+1} = \text{остаток от деления} \left[(4353x_i + 125), 2^{24} \right].$$

Для оптимизации разрядности рассмотренной выше последовательности случайных чисел (диапазон $0 \dots 2^{24}$) приведем ее к диапазону $0 \dots 2^9$:

$$x'_i = \text{остаток от деления} \left[(x_i / 2^{12})_{\text{ц.ч.}}, 2^9 \right].$$

На рис. 4 представлены отсчеты процесса, сформированного данным алгоритмом, и распределение случайного процесса.

2. На основе равномерных случайных процессов получить случайные процессы с гауссовским распределением. Для формирования случайного процесса с нормальным зако-

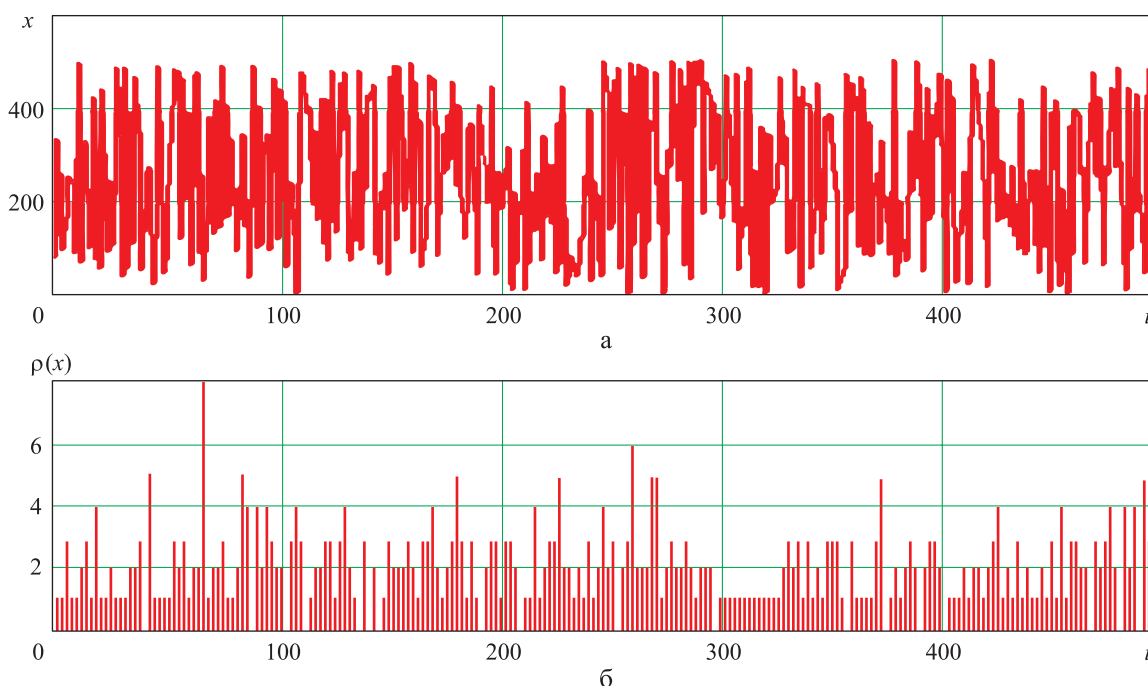


Рис. 4. Отсчеты равномерного случайного процесса (а) и его распределение (б)

ном распределения можно использовать центральную предельную теорему вероятностей одинаково распределенных случайных величин: если каждая из K независимых одинаково распределенных случайных величин имеет математическое ожидание $m(x)$ и среднее

квадратическое отклонение $\sqrt{D(x)}$, то сумма $y_i = \sum_{i=1}^K x_i$ асимптотически нормальна с математическим ожиданием $m(y) = Km(x)$. На рис. 5 представлены график полученного случайного процесса и его распределение.

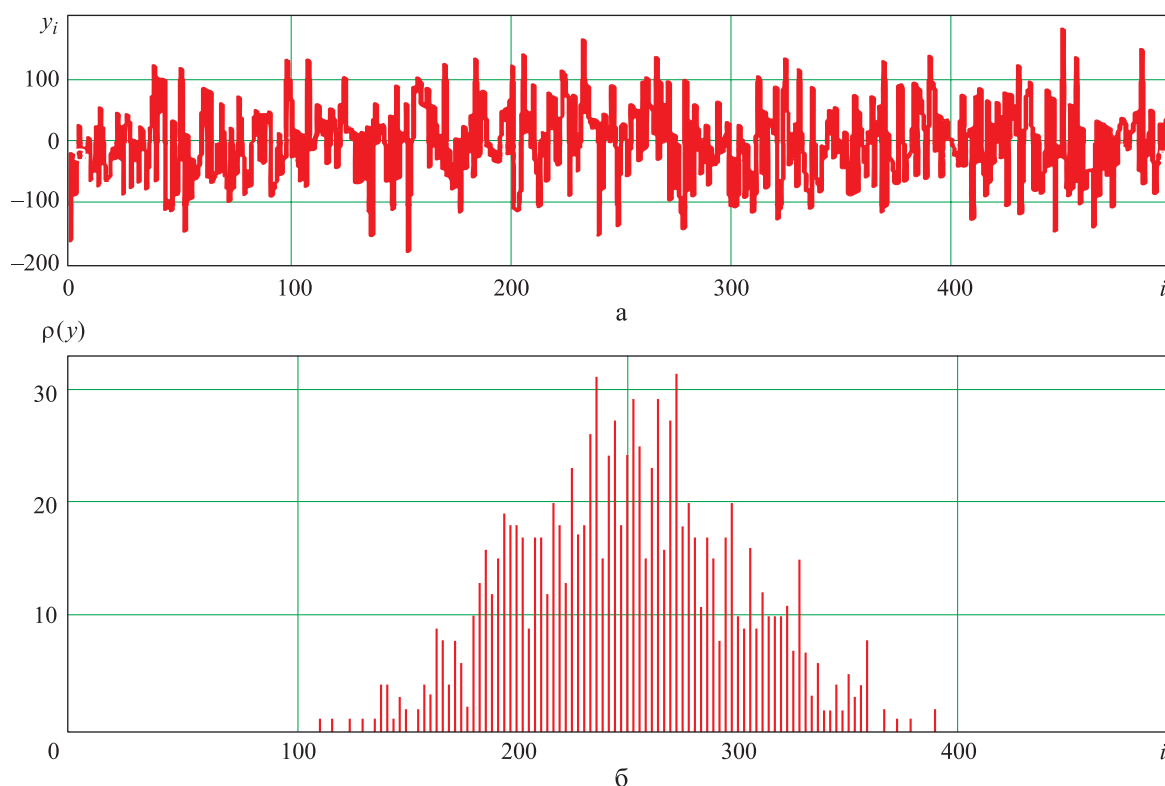


Рис. 5. Случайный процесс с гауссовским распределением (а) и распределение случайного процесса (б)

3. Сформировать отсчеты коррелированных процессов с помощью формирующего фильтра, используя рассчитанные весовые коэффициенты. Для этого применим описанный выше формирующий фильтр. Результаты отображены на рис. 6.

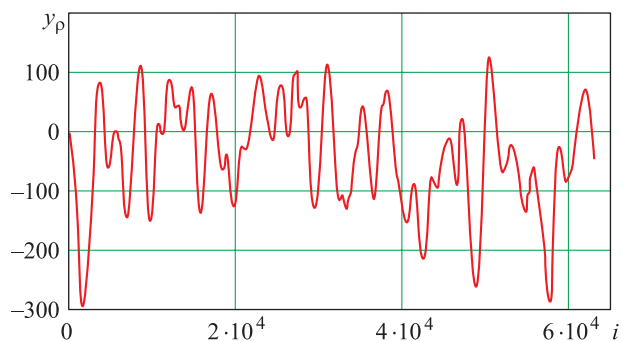


Рис. 6. Случайный процесс с заданной корреляционной функцией

4. Из полученных коррелированных процессов сформировать последовательности отсчетов с заданными транспортными задержками. Для выделения составляющих трех сигналов для приемных антенн КРИ из полученных шести случайных процессов U_1, \dots, U_6 воспользуемся формулами:

- для первой антенны

$$U \sin_i = k_1 U_{1i} + \sqrt{1 - k_1^2} U_{3i},$$

$$U \cos_i = k_1 U_{2i} + \sqrt{1 - k_1^2} U_{4i};$$

- для второй антенны

$$U \sin_i = U_{1i+N_1},$$

$$U \cos_i = U_{2i+N_1};$$

- для третьей антенны

$$U \sin_i = k_3 U_{1i+N_1+N_2} + \sqrt{1 - k_3^2} U_{5i},$$

$$U \cos_i = k_3 U_{2i+N_1+N_2} + \sqrt{1 - k_3^2} U_{6i},$$

где k_1, k_3 – коэффициенты декорреляции сигналов первой и третьей антенны соответственно относительно второй антенны;

N_1, N_2 – транспортные задержки, пересчитанные в отсчеты.

Коэффициенты k_1, k_3 вычислим с помощью формул [2]:

$$k_1 = \exp\left(-\frac{2\pi\Delta^2 X_0^2 \sin^2(\beta - \alpha)}{\lambda^2 \cos^2(\beta)}\right);$$

$$k_3 = \exp\left(-\frac{2\pi\Delta^2 X_0^2 \sin^2(\beta + \alpha)}{\lambda^2 \cos^2(\beta)}\right),$$

где X_0 – половина разнosa приемных антенн в продольном направлении;

β – угол сноса;

α – угол, характеризующий антенную систему.

На рис. 7 приведены проекции расположения трех приемных антенн КРИ на оси в связанной системе координат.

Пример реализации квадратурных составляющих модулирующих сигналов представлен на рис. 8.

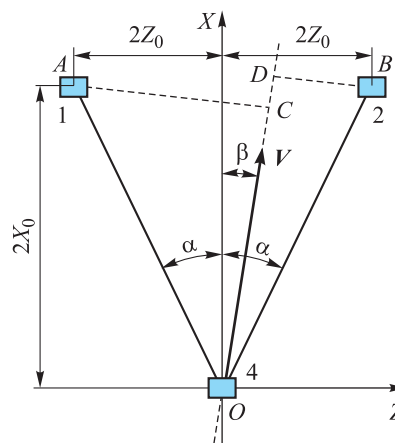


Рис. 7. Проекция расположения трех приемных антенн (обозначены цифрами) КРИ: A, B – центры антенн; Z_0 – половина разнosa приемных антенн в поперечном направлении; AC – нормаль первой приемной антенны к вектору путевой скорости

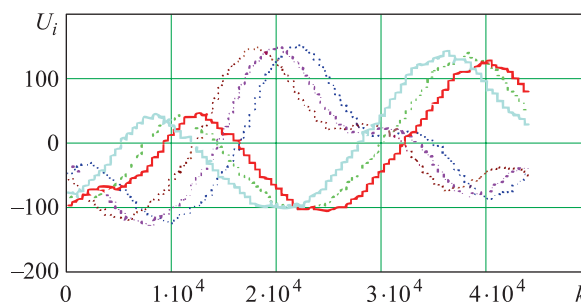


Рис. 8. Составляющие модулирующего сигнала; U_i – модулирующий сигнал



Таким образом, разработанная модель коррелированных сигналов для имитатора скорости КРИ позволяет имитировать отраженный сигнал при полете над заданным типом подстилающей поверхности, который обеспечивает измерение поперечной составляющей скорости V_z как по транспортным задержкам, так и по разности максимумов ВКФ.

Список литературы

1. *Важенин В. Г., Вербицкий В. И., Дядьков Н. А., Калмыков Н. Н., Мельников С. А.* Имитационная модель сигнала в приемных каналах корреляционного измерителя скорости // Сб. тр. III Всерос. НТК «Радиолокация и радиосвязь». М.: Институт радиотехники

и электроники им. В. А. Котельникова РАН, 2009. 959–963 с.

2. *Боркус М. Н., Чёрный А. Е.* Корреляционные измерители путевой скорости и угла сноса летательных аппаратов. М.: Советское радио, 1973. 169 с.

3. *Вентцель Е. С.* Теория вероятностей. М.: Наука, 1964. 576 с.

4. *Сколник М.* Основы радиолокации. Справочник по радиолокации. В 4 т. Т. 1 / пер. К. Н. Трофимова. М.: Советское Радио, 1976. 456 с.

Поступила 23.11.16

Васильева Анна Валерьевна – инженер-конструктор первой категории АО «УПКБ «Деталь», г. Каменск-Уральский.

Область научных интересов: радиолокация.

Калмыков Николай Николаевич – начальник НИО-300 АО «УПКБ «Деталь», г. Каменск-Уральский.

Область научных интересов: радиолокация.

Мельников Сергей Андреевич – ведущий конструктор отдела 310 АО «УПКБ «Деталь», г. Каменск-Уральский.

Область научных интересов: радиолокация.

Соловьёв Виталий Валерьевич – начальник отдела 310 АО «УПКБ «Деталь», г. Каменск-Уральский.

Область научных интересов: радиолокация.

Correlated signal model for a velocity simulator of a correlation radar meter

One of the functions of a correlation radar meter for measuring altitude and velocity vector components is measuring the velocity vector components based on comparing correlation properties of the signals received by spatially separated antennae. The CRM test and control equipment contains a simplified velocity simulator forming signal transport delays according to the values of axial and transverse velocity vector components. We consider a correlated signal model allowing us to imitate a reflected signal that makes it possible to measure parameter values by means of transport delays and the difference in cross-correlation function maximum values.

Keywords: correlation radar meter, velocity simulator, correlated signal model.

Vasileva Anna Valerevna – first class designer engineer, Joint-stock company “Ural design bureau “Detal”, Kamensk-Uralski.

Science research interests: radiolocation.

Kalmykov Nikolay Nikolaevich – Head of Research and Development Department 300, Joint-stock company “Ural design bureau “Detal”, Kamensk-Uralski.

Science research interests: radiolocation.

Melnikov Sergey Andreevich – Lead Designer, Department 310, Joint-stock company “Ural design bureau “Detal”, Kamensk-Uralski.

Science research interests: radiolocation.

Solovyev Vitaliy Valerevich – Head of Department 310, Joint-stock company “Ural design bureau “Detal”, Kamensk-Uralski.

Science research interests: radiolocation.