

При этом

$$\begin{aligned} b_1 &= \frac{a_1}{4}; \quad b_2 = \frac{1}{32}(8a_2 - 3a_1^2) - \frac{c_1}{2}; \quad c_2 = \frac{7}{1024}a_1^4 + \frac{3}{64}a_1^2a_2 - \frac{3}{16}a_2^2 + \frac{1}{2}a_4 + \frac{c_1^2}{4} - \frac{d_1}{2}; \\ d_2 &= -\frac{1}{4096}a_1^8 + \frac{1}{256}a_1^4a_2^2 - \frac{1}{64}a_2^4 - \frac{1}{4}a_4^2 - \frac{1}{64}a_4a_1^4 + \frac{1}{8}a_4a_2^2 + a_8 + \frac{1}{4}d_1^2; \end{aligned} \quad (16)$$

параметры  $c_1$  и  $d_1$  остаются свободными.

Доказательство аналогично доказательству теоремы 1.

Следствие. Выполнение условий (12)–(15) является достаточным для разрешимости уравнения  $P_8(z) = 0$  в квадратных радикалах.

Рассмотрим конкретный числовой пример. Пусть

$$P_8(z) = z^8 + 8z^7 - 20z^6 - 232z^5 + 5z^4 + 1716z^3 + 1342z^2 - 1452z + 100.$$

Условия (12)–(15) выполнены. Для простоты выберем  $c_1 = d_1 = 0$ . Поочередно решая соответствующие квадратные уравнения, коэффициенты которых находятся по формулам (16), получаем 8 различных корней исходного полинома.

$$\begin{aligned} z_{1,2} &= -1 \pm \frac{\sqrt{48 - 2\sqrt{418 - 2\sqrt{689}}}}{2}; \quad z_{3,4} = -1 \pm \frac{\sqrt{48 - 2\sqrt{418 + 2\sqrt{689}}}}{2}; \\ z_{5,6} &= -1 \pm \frac{\sqrt{48 + 2\sqrt{418 - 2\sqrt{689}}}}{2}; \quad z_{7,8} = -1 \pm \frac{\sqrt{48 + 2\sqrt{418 + 2\sqrt{689}}}}{2}. \end{aligned}$$

Исследование выполнено в рамках договора БРФФИ № Ф21М-118 на выполнение научно-исследовательской работы «Разработка новых методов нахождения корней алгебраических уравнений в символьном виде».

**Заключение.** Таким образом, в работе получены необходимые и достаточные условия представимости произвольного полинома восьмой степени комплексного аргумента в виде тройной композиции некоторого квадратичного полинома, а также в виде композиции трех произвольных квадратичных полиномов. Во обоих случаях получены формулы прямого перехода от коэффициентов исходного полинома к коэффициентам полиномов, составляющих композицию.

1. Kozen, D. Polynomial Decomposition Algorithms / D. Kozen, S. Landau // Journal of Symbolic Computation. – 1989. – Vol. 7, № 5. – P. 445–456.

2. Перминова, М.Ю. Алгоритм декомпозиции полиномов, основанный на разбиениях / М.Ю. Перминова, В.В. Кручинин, Д.В. Кручинин // Доклады ТУСУРа. – 2015. – № 4(38). – С. 102–107.

3. Трубников, Ю.В. Об условиях представимости полиномов четвертой и шестой степени в виде суперпозиции полиномов второй и третьей степени / Ю.В. Трубников, В.В. Юргелас // Веснік Віцебскага дзяржаўнага ўніверсітэта. – 2019. – № 1(102). – С. 17–24. – Режим доступа: <https://rep.vsu.by/handle/123456789/18080>. – Дата доступа: 01.09.2022.

## АППРОКСИМАЦИЯ ПЛОТНОСТИ ВЕРОЯТНОСТИ ПРЕДПОРОГОВОЙ СТАТИСТИКИ АДАПТИВНОГО ОБНАРУЖИТЕЛЯ ПРОТЯЖЕННОЙ ПО ДАЛЬНОСТИ КОРРЕЛИРОВАННОЙ ОТВЕТНОЙ ШУМОВОЙ ПОМЕХИ

**Чигирь И.В.,**

*преподаватель кафедры автоматики, радиолокации  
и приема-передающих устройств УО «ВА РБ», г. Минск, Республика Беларусь  
Научный руководитель – Горшков С.А., канд. техн. наук, доцент*

Ключевые слова. Ответная шумовая помеха, импульсно-доплеровская радиолокационная станция точного измерения координат.

Keywords. Response noise interference, Pulsed Doppler radar.

Знание закона распределения (далее – ЗР) принятого сигнала на выходе устройства обработки необходимо для корректного решения задачи синтеза устройства принятия решения об обнаружении. На выходе устройства обработки с учетом квадратичного

детектирования ЗР считается экспоненциальным. В свою очередь протяженная по дальности коррелированная ОШП в устройстве обработке занимает определенные элементы разрешения по дальности и скорости [1] и логарифм отношения правдоподобия для обнаружения такого шумоподобного сигнала [2, 3], соответствующего  $i$ -му элементу частоты и  $j$ -ому элементу дальности, протяженностью  $\Delta i$  по частоте и  $\Delta j$  по дальности описывается выражением

$$\ln \Lambda(\mathbf{f}|i, j, \Delta i, \Delta j) = Z(\mathbf{f}|i, j, \Delta i, \Delta j) = s_{i,j}^{\Delta i, \Delta j} - \Delta i \cdot \Delta j \left( 1 + \ln \left[ \frac{s_{i,j}^{\Delta i, \Delta j}}{\Delta i \cdot \Delta j} \right] \right), \quad (1)$$

где

$$s_{i,j}^{\Delta i, \Delta j} = \frac{1}{2\sigma_0^2} \sum_{n=i}^{(i+\Delta i-1)} \sum_{k=j}^{(j+\Delta j-1)} z_{n,k} - \quad (2)$$

нормированный к мощности шума результат некогерентного накопления элементов матрицы  $z$  в прямоугольном окне протяженностью  $\Delta i$  по частоте и  $\Delta j$  по дальности;  $z$  – матрица D-V, представляющая собой результат накопления принятого сигнала по элементам дальности и скорости с учетом квадратичного детектирования;  $\bar{\sigma}_0^2$  – средняя мощность шума на выходе когерентной части устройства обработки оцениваемая по результатам наблюдения выборки.

Величина  $s_{i,j}^{\Delta i, \Delta j}$  согласно (2) имеет  $\chi^2$ -распределение, при этом ЗР  $Z(\mathbf{f}|i, j, \Delta i, \Delta j)$  в виду выполнения нелинейной операции согласно (1) отличен от  $\chi^2$ -распределения. Целью данной работы является определение ЗР случайной величины  $Z(\mathbf{f}|i, j, \Delta i, \Delta j)$ , полученной согласно (1).

**Материал и методы.** Для рассматриваемых условий плотность вероятности случайной величины  $Z(\mathbf{f}|i, j, \Delta i, \Delta j)$ , полученной согласно (1), описывается следующим соотношением [3]:

$$p_0(z) = p_0(h_1(z)) \cdot \left| \frac{\partial}{\partial z} h_1(z) \right| + p_0(h_2(z)) \cdot \left| \frac{\partial}{\partial z} h_2(z) \right|, \quad (3)$$

где

$$h_1(z) = -\Delta i \cdot \Delta j \cdot W_0 \left[ -\exp \left( -\frac{z + \Delta i \cdot \Delta j}{\Delta i \cdot \Delta j} \right) \right] - \quad (4)$$

обратная функция выражению (2),

$$h_2(z) = -\Delta i \cdot \Delta j \cdot W_{-1} \left[ -\exp \left( -\frac{z + \Delta i \cdot \Delta j}{\Delta i \cdot \Delta j} \right) \right] - \quad (5)$$

обратная функция выражению (2);  $W[x]$  – функция Ламберта, являющаяся решением нелинейного уравнения  $y = x \exp(x)$  с двумя действительными ветвями – основной  $W_0[x]$  и дополнительной  $W_{-1}[x]$  (рисунок 1).

$$\frac{\partial}{\partial z} h_{1,2}(z) = \frac{W_{0,-1} \left[ -\exp \left( -\frac{z + \Delta i \cdot \Delta j}{\Delta i \cdot \Delta j} \right) \right]}{1 + W_{0,-1} \left[ -\exp \left( -\frac{z + \Delta i \cdot \Delta j}{\Delta i \cdot \Delta j} \right) \right]} - \quad (6)$$

производная обратной функции, выражаемая через функцию Ламберта.

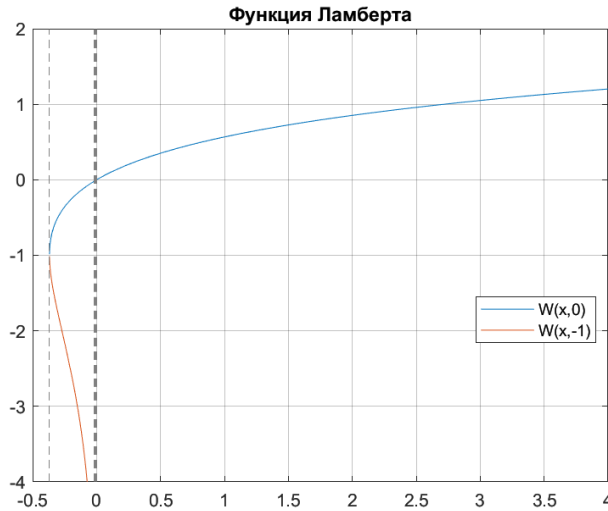


Рисунок 1 – Вид функции Ламберта

Полученные выражения уточняют полученные в [3] выражения, при этом выражение (4) существенно упрощено.

**Результаты и их обсуждение.** Для проверки точности аналитического описания искомой плотности вероятности было проведено математическое моделирование. Схема математического моделирования представлена на рисунке 2. На выходе генератора белого гауссовского шума (БГШ) формировался белый (квазибелый) шум с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией. Выходное колебание поступало на квадратичный детектор (КД), а далее на устройство формирования матрицы D-V. В матричном коммутаторе осуществлялась коммутация отсчетов согласно заданных параметров  $i, j, \Delta i, \Delta j$ , которые поступали на сумматор ( $\Sigma$ ). Результат суммирования нормировался к уровню шумов (при расчетах он считался единичным) и далее поступал на делитель и далее последовательно на устройство логарифмирования, сумматор, смеситель для реализации алгоритма (1).

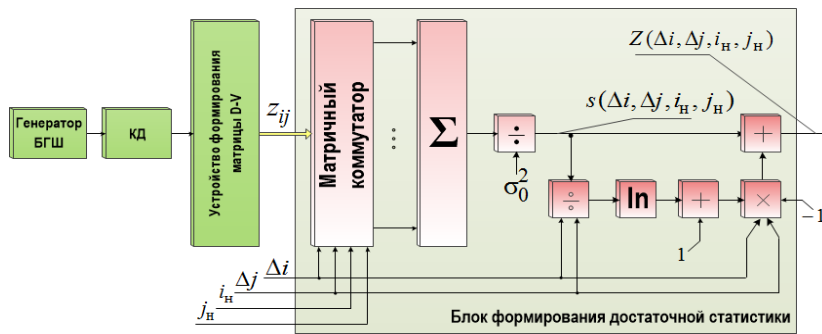


Рисунок 2 – Структурная схема моделирующего комплекса

Точность аналитического описания оценивалась с помощью нормированной гистограммы, отсчеты которой – суммарная вероятность попадания моделируемых значений в каждый из анализируемых интервалов. При расчетах использовано число интервалов 125, количество отсчетов  $N = 2000$ , уровень значимости 0,05.

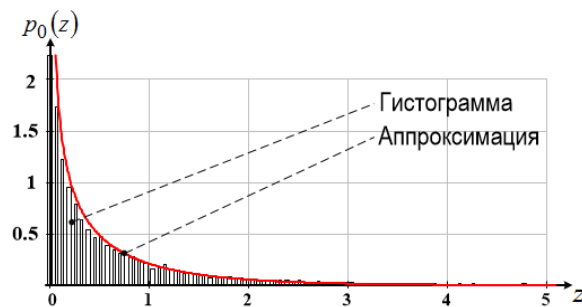


Рисунок 3 – Плотность вероятности предпороговой статистики  $p_0(z)$ , полученная согласно алгоритма (1)

**Заключение.** Получено аналитическое выражение ЗР случайной величины, путем преобразования экспоненциально распределенных случайных величин согласно алгоритму (1). Плотность распределения вероятности выражается через функцию Ламберта и зависит от протяженности ОШП по элементам дальности и по элементам скорости. Таким образом, порог обнаружения, обеспечивающий заданную условную вероятность ложной тревоги, может выбираться с использованием полученной аппроксимации.

1. Чигирь, И.В. Анализ воздействия комбинированной имитирующей и маскирующей помехи на системы сопровождения по дальности и скорости радиолокаторов точного измерения координат / И.В. Чигирь, С.А. Горшков, Н.К. Кузьмичев // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2018. – № 1 (58). – С. 71–81.

2. Теоретические основы радиолокации: учеб. пособие / В.Б. Алмазов [и др.]. – Харьков: ХВУ, 1996. – Ч. 2. – 466 с.

3. Горшков, С.А. Плотность вероятности предпороговой статистики адаптивного обнаружителя гауссовских быстро флуктуирующих сигналов неизвестной интенсивности на фоне гауссовской некоррелированной помехи / С.А. Горшков, М.В. Крикливый // 3-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ-2008. Сб. науч. тр. Т. 1. Междун. конф. «Современные и перспективные системы радиолокации, радиоастрономии и спутниковой навигации». – Ч. 1. – Харьков АНПРЭ, ХНУРЭ, 2008. – С. 156–159.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ МАЛОРАЗМЕРНОГО БПЛА DJI PHANTOM 4 PRO

**Чигряй В.Г.,**

*слушатель магистратуры кафедры автоматики, радиолокации  
и прямо-передающих устройств УО «ВА РБ», г. Минск, Республика Беларусь  
Научный руководитель – Храменков А.С., канд. техн. наук, доцент*

Ключевые слова. Эффективная отражающая поверхность, беспилотный пилотируемый летательный аппарат.

Keywords. Radar Cross Section (RCS), Unmanned Aerial Vehicle (UAV).

Повышение эффективности боевого применения малоразмерных беспилотных пилотируемых летательных аппаратов (БПЛА) требует непрерывного развития средств противодействия им [1]. Эффективное противодействие возможно при своевременном решении задачи радиолокационного обнаружения БПЛА. Одним из важнейших параметров, определяющих дальность обнаружения, является эффективная отражающая поверхность (ЭОП) цели [2]. Задача измерения ЭОП является сложной практической задачей. Это обусловлено необходимостью учета множества различных факторов [2]. В связи с этим, получение достоверных значений ЭОП малоразмерных БПЛА предполагает использование различных методов измерения.

Целью работы является получение количественной оценки отражательных свойств малоразмерного БПЛА DJI Phantom 4 PRO.

**Материал и методы.** Важной практической задачей является оценивание зависимости ЭОП от угла ориентации относительно радиолокатора на цель. Данная зависимость представляет собой диаграмму обратного вторичного излучения (ДОВИ) и