

Исследование эффективности работы алгоритма CFAR в задачах обнаружения воздушных целей при работе в сетях ISAC 6G

Исследуется эффективность работы алгоритма постоянства ложных тревог CFAR. Изучается возможность применения в сетях ISAC 6G методов классической радиолокации. Работа алгоритма CFAR рассматривается в локальной зоне (по сравнению с классической радиолокацией) географической протяженности (до 35 км дальности). Рассмотрена конфигурация радиолокатора непрерывного излучения с частотной модуляцией, работающего в миллиметровом диапазоне 30...300 ГГц, зондирование выполняется импульсами с линейной частотной модуляцией. Приводится сравнительный анализ двух моделей алгоритма CFAR (по среднему значению и порядковой статистике), формулируется вывод о качестве и быстродействии их работы. Сформирована проблема оценки вычислительной сложности алгоритма CFAR в системах реального времени. Проведен численный эксперимент с моделированием в среде MATLAB, позволяющий обосновать пути снижения вычислительной сложности при использовании алгоритма CFAR. Показано, что оптимальным вариантом для условий применения ISAC сетей является OS-CFAR. Предложена методика снижения вычислительной сложности алгоритма OS-CFAR с помощью аппроксимации решения факториального уравнения. Показано, что скорость получения аппроксимированного решения выше, чем скорость решения факториального уравнения в символьном виде.

Е.П. САУЛЕНКО,
аспирант,

Г.А. ФОКИН,
д-р техн. наук

(СПбГУТ, Санкт-Петербург)
evgeniisaulenko@gmail.com

ISAC, OS-CFAR, радиолокация, факториальные уравнения

Ужесточение требований к современным и перспективным информационно-телекоммуникационным системам [1] обусловлено совокупностью актуальных тенденций развития радиосвязи – масштабированием транспортных сетей связи, внедрением технологий умного города, развертыванием автономных систем связи и интернета вещей, интеграцией воздушного сегмента на базе беспилотных летательных аппаратов [2–4], а также тенденцией к совмещению задач связи, радиолокации и радионавигации с использованием единого радиointерфейса [5]. Такие перспективные интегрированные сети радиосвязи и зондирования радиотехническими средствами получили название ISAC-сети (Integrated Sensing and Communication) [5]. Одним из самых перспективных применений данной технологии является обнаружение воздушных целей. Актуальность этой задачи обусловлена возрастающими рисками, связанными с использованием малых беспилотных летательных аппаратов и недостаточной эффективностью традиционных методов их обнаружения [6]. Реализация концепции ISAC на базе инфраструктуры 5G/6G открывает путь к созданию универсального, экономичного и высокоэффективного радара со сплошным покрытием для решения актуальных задач по обнаружению и отслеживанию воздушных целей [7, 8]. В Российской Федерации объединение задач связи и радиолокации в одном интерфейсе планируется в рамках проекта «Небосвод» для организации воздушного движения беспилотных летательных аппаратов [9].

По состоянию на 2025 г. разработка стандартов 6G координируется Международным союзом электросвязи (ITU-R) в рамках концепции IMT-2030, определенной в рекомендации ITU-R M.2160-0.

Ввиду незавершенности формирования требований к конфигурации сетей шестого поколения вопрос о применимости существующих методов и алгоритмов обнаружения цели (в их исходной или модифицированной форме) в контексте ISAC-сетей остается недостаточно изученным [10–12]. Проблема выбора сигнальной базы, используемой в ISAC-сетях, в настоящее время не имеет однозначного решения.

В работе [13] предлагается использовать зондирующие сигналы, основанные на технологии OCDM (Orthogonal Chirp Division Multiplexing). Данная технология представляет собой модификацию традиционной OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов), в которой в качестве сигнальной базы используются импульсы с линейной частотной модуляцией при сохранении ортогональности поднесущих. Такой подход позволяет ис-

пользовать средства классической радиолокации в сетях 6G для ISAC-сетей и сетей связи беспилотных летательных аппаратов.

В традиционных радарх и системах ISAC процесс обнаружения цели начинается с обработки принятого сигнала. Например, используются радиолокаторы непрерывного излучения с частотной модуляцией FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave), которые измеряют дальность до цели и ее радиальную скорость [14].

Наиболее часто используемый диапазон волн, применяемый в радиолокационной технике в данный момент, – 30...300 ГГц (миллиметровый диапазон). Возможность построения ISAC-сети с использованием радиолокатора в миллиметровом диапазоне рассмотрена в работе [14].

В настоящей работе исследуется работа алгоритма постоянства ложных тревог Constant False Alarm Rate (CFAR) для обнаружения воздушных целей применительно к сетям 6G ISAC.

В классических радиолокационных системах после выполнения фильтрации, компенсации доплеровского сдвига и обработки сигналов с помощью быстрого преобразования Фурье [15] формируется двумерное представление отраженного сигнала в координатах дальности и частоты, которое далее преобразуется в координаты скорости (рис. 1). Полученная структура известна как RDM (Range – Doppler Matrix). Каждая ячейка данной матрицы характеризуется значением мощности отраженного сигнала P_0 .

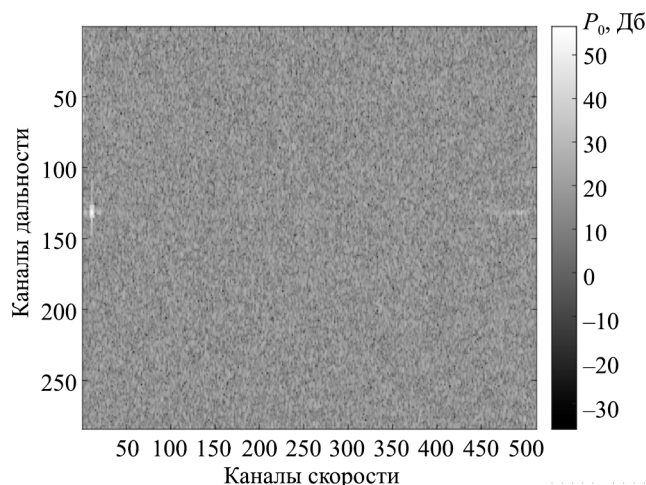


Рис. 1

Существует множество техник обнаружения цели в сигнальной картине, в частности алгоритм постоянной вероятности ложных тревог CFAR. Классическое описание и анализ алгоритма постоянной вероятности ложных тревог были представлены в работе [16]. Суть данной процедуры заключается в следующем (рис. 2).

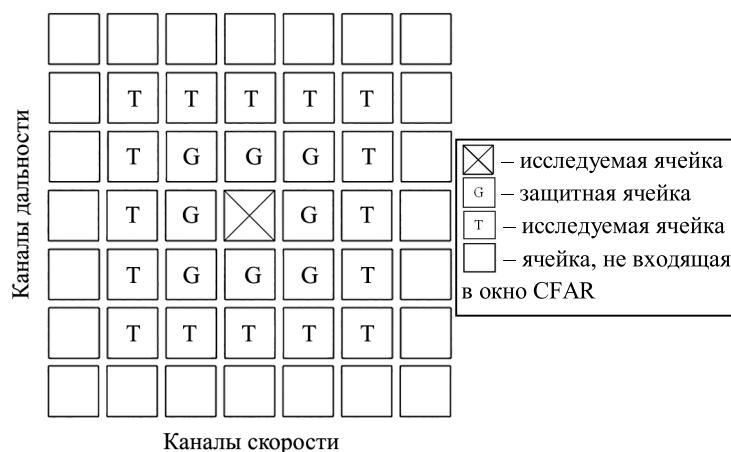


Рис. 2

Вокруг точки, проверяемой на присутствие цели (CUT-ячейка (Cell Under Test)), выстраиваются два диапазона – защитный (Guard Cells) и тренировочный (Training Cells). Значения, относящиеся к защитному диапазону, не учитываются, поскольку могут быть обусловлены эффектами растекания мощности цели по координатам дальности и скорости. На основе значений, принадлежащих тренировочному диапазону, осуществляется оценка порога принятия решения, определяющего наличие или отсутствие цели в проверяемой точке.

Пример практического применения CFAR в контексте совместного использования спектра радаром и системой связи рассматривается в работе [17]. В системе на основе OFDM и OCDM (как в современных сетях 5G) CFAR применяется после этапа обработки сигнала.

На основании изученных работ [1–17] можно определить этапы реализации алгоритма связи и радиолокации с использованием единого радиointерфейса.

1. Отправляется широкополосный OFDM/OCDM-сигнал.
2. Принимается отраженный OFDM/OCDM-сигнал, содержащий как связные, так и радиолокационные данные.
3. С помощью цифровой обработки связные и радиолокационные данные разделяются.
4. Для радиолокационных данных выполняется двумерное быстрое преобразование Фурье (по дальности и скорости).
5. Окно алгоритма CFAR скользит по полученному изображению в координатах дальность – скорость, независимо обрабатывая каждую ячейку для принятия решения о наличии или отсутствии в ней цели.
6. Координаты целей используются для навигации и радиолокации, а остальные данные – для высокоскоростной связи.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что базовые технологии классических радиолокационных систем актуальны в современных и перспективных сетях. Также неизменным остается и принцип принятия решения о наличии цели относительно некоторого порога.

Далее рассмотрена применимость некоторых существующих методик вычисления данного порога с помощью различных вариаций алгоритма CFAR.

В качестве наиболее перспективного решения поставленной задачи рассматривается использование импульсов с линейной частотной модуляцией, которые широко применяются в современных радиолокационных системах [18] и могут быть использованы в ISAC-сетях, в том числе с применением OCDM-технологий. OCDM-технология основана на модификации традиционной OFDM-технологии, в которой в качестве сигнальной базы используются импульсы с линейной частотной модуляцией, что позволяет применять единый информационный сигнал для задач радиолокации [19]. Перспективность данного выбора обусловлена тем, что применение указанного типа сигнала обеспечивает требуемые характеристики пик-фактора и функции неопределенности, достижение которых затруднено при использовании широко распространенных OFDM-сигналов. OFDM-сигналы характеризуются высокими значениями пик-фактора, что требует применения линейных усилителей мощности с пониженной энергоэффективностью. В отличие от них, импульсы с линейной частотной модуляцией имеют низкий пик-фактор, что обеспечивает более высокую энергоэффективность. Это, в свою очередь, позволяет применять нелинейные усилители с высоким КПД без значительных искажений, повышая общую энергоэффективность системы, что является критически важным для мобильных устройств и конфигурации гибридных сетей ISAC [20]. Кроме того, применение импульсов с линейной частотной модуляцией в качестве сигналов позволяет получить высокое разрешение по дальности при относительно невысокой пиковой мощности, а автокорреляционные свойства импульса с линейной частотной модуляцией (узкий основной лепесток автокорреляционной функции) делают зондирующий сигнал устойчивым к межсимвольной интерференции и доплеровскому сдвигу, что критично для движущихся целей в условиях построения будущих сетей 6G при сложной сигнально-шумовой обстановке, например в городской среде [21]. Также импульсы с линейной частотной модуляцией характеризуются хорошими спектральными свойствами, обеспечи-

вающими возможность мультиплексирования и реализации многолучевого зондирования [22]. Изменение частоты $f(t)$ внутри импульсов с линейной частотной модуляцией происходит по линейному закону:

$$f(t) = f_0 + \mu t;$$

$$-\frac{\tau_c}{2} \leq t \leq \frac{\tau_c}{2},$$

где f_0 – начальная частота сигнала; $\mu = \frac{f_{\max} - f_0}{\tau_c}$ – девиация частоты, f_{\max} – максимальное значение частоты сигнала; τ_c – длительность сигнала.

Сигнал с линейной частотной модуляцией описывается следующим выражением [23]:

$$s(t) = S_0 \cos \left(\varphi_0 + 2\pi \left(f_0 t + \frac{\mu t^2}{2} \right) \right),$$

в комплексной форме:

$$s(t) = S_0 e^{j \left(\varphi_0 + 2\pi \left(f_0 t + \frac{\mu t^2}{2} \right) \right)}.$$

Принятие решения о наличии цели в ячейке координат дальность – скорость осуществляется сравнением мощности сигнала в каждой ячейке с заданным пороговым уровнем. Если мощность выше, то в ячейке присутствует цель, при мощности ниже порогового значения принимается решение об отсутствии цели в ячейке. В общем виде порог S рассчитывается как некое опорное значение Z , умноженное на масштабирующий коэффициент T :

$$S = TZ.$$

При низких значениях данного порога будет получено множество ложных тревог (шум или помеха ошибочно принимается за цель). При повышенных значениях может возникнуть ситуация ложной отбраковки (отбрасываются истинные слабые цели) [24].

Существуют две вариации алгоритма CFAR, различающиеся по способу расчета границы принятия решения. Наиболее простым с точки зрения вычислений является CA-CFAR (Cell Averaging), где граничным значением является среднее значение мощности сигнала, относящееся к тренировочному диапазону окна CFAR, взятое с коэффициентом, обеспечивающим постоянство вероятности ложной тревоги. Недостатком этой модели является снижение эффективности обнаружения в ситуации с попаданием в окно CFAR нескольких целей одновременно [25].

Качество работы алгоритма CA-CFAR является неудовлетворительным по следующим причинам. Вероятность правильного обнаружения может снижаться до 50 % [25] при наличии группированных целей, так как при близком расположении целей из-за неустойчивости среднего значения к выбросам завышается порог, и происходит ложная отбраковка слабых целей. Также из-за неустойчивости среднего значения к выбросам алгоритм CA-CFAR некачественно определяет цели в ситуации неоднородного фонового шума (в городской среде или в условиях сильных помех от других устройств).

Этого недостатка лишен более устойчивый алгоритм порядковой статистики OS-CFAR (Ordered Statistics), в котором происходит сортировка массива тренировочных ячеек. В качестве граничного значения принимается мощность k -й ячейки упорядоченного массива, умноженная на коэффициент, обеспечивающий постоянный уровень ложной тревоги. Как правило, выбирается перцентиль 50 (медианное значение) или 75 [16].

Несмотря на высокую степень устойчивости, алгоритм OS-CFAR имеет определенные недостатки [26]. В частности, в условиях идеально однородного шума OS-CFAR демонстрирует несколько меньшую вероятность правильного обнаружения по сравнению с CA-CFAR. Это обусловлено отбрасыванием части

информации из тренировочных ячеек, значения которых превышают выбранный k -й элемент. Некорректный выбор этого элемента может привести к ухудшению работы алгоритма. При слишком малом значении k повышается чувствительность к шуму и возрастает вероятность ложной тревоги, тогда как чрезмерно большое значение k может привести к ложной отбраковке истинных целей.

Главным недостатком алгоритма OS-CFAR является вычислительная сложность. С вычислительной точки зрения операция сортировки массива характеризуется существенно большей ресурсоемкостью по сравнению с операцией вычисления среднего значения. Вычисление коэффициента, обеспечивающего заданный уровень постоянства ложной тревоги, также является более сложной процедурой в сравнении с CA-CFAR. При больших размерах окна алгоритма CFAR это может приводить к увеличению вычислительной нагрузки на процессор, а в системах реального времени вызывать задержки при выполнении расчетов.

В случае OS-CFAR коэффициент T выражается из следующей факториальной формулы для вероятности ложной тревоги P_{fa} [16]:

$$P_{fa} = k \binom{N}{k} \int_0^{\infty} e^{-(T+N+1-k)y} (1-e^{-y})^{k-1} dy.$$

Отсюда

$$P_{fa} = k \binom{N}{k} \frac{(k-1)!(T+N-k)!}{(T+N)!}. \quad (1)$$

Здесь: k – порядковый номер элемента в отсортированном массиве, принимаемого за граничный; N – общее число элементов массива.

Далее решается проблема упрощения вычислений данного коэффициента.

Как уже было отмечено, преимуществом OS-CFAR является его устойчивость к появлению групповых целей, а также к значительной неоднородности фона. Основными недостатками техники OS-CFAR являются существенные вычислительные затраты, связанные с сортировкой массива, а также повышенная сложность расчета коэффициента, обеспечивающего поддержание постоянной вероятности ложной тревоги.

В среде программирования MATLAB максимальное значение, для которого возможно вычисление факториала, ограничено числом 171, что приблизительно соответствует окну 13×13 ячеек и может оказаться недостаточным при высоком разрешении радара.

Данное ограничение может быть устранено использованием метода символьных вычислений, однако такой подход не всегда реализуем на практике. В связи с этим предлагается аппроксимировать решение факториального уравнения относительно T для различных значений N с фиксированным значением $k = 0,75N$ для некоторого набора наиболее характерных значений P_{fa} . В перспективе возможна реализация аппроксимирующей поверхности, при которой независимой переменной будет не только N , но и P_{fa} .

Для проведения исследования выбраны следующие исходные данные: массив для количества тренировочных ячеек N принимает значения от 8 до 500 с шагом 1 (всего 493 значения). Значение порядкового номера граничного элемента k задается неизменным для каждого N и составляет $0,75N$. Массив для вероятности ложной тревоги P_{fa} принимает набор наиболее характерных значений от 10^{-1} до 10^{-12} с шагом в один порядок (всего 12 значений).

Перепишем уравнение (1), раскрыв число сочетаний $\binom{N}{k}$, а также перейдем в членах, содержащих T , от факториала к гамма-функции, чтобы значения коэффициента T могли принимать дробные значения:

$$P_{fa} = k \frac{N!}{(N-k)!k!} \frac{(k-1)!(T+N-k)!}{(T+N)!};$$

$$P_{fa} = \frac{N!}{(N-k)!} \frac{\Gamma(T+N-k+1)}{\Gamma(T+N+1)}. \quad (2)$$

Будем решать уравнение (2) в среде MATLAB в символьном виде с помощью функции `vpasolve` относительно T . Массивом результатов (решений уравнения – коэффициентов для OS-CFAR) является матрица из 12×493 элементов (всего 5916 значений). Расчет производился на персональном компьютере с процессором Intel Core i3-1215U, 1,2 ГГц, с объемом оперативной памяти – 8 Гб. Время, затраченное на расчет, – 185 с.

Далее представлены графики зависимости значения коэффициента OS-CFAR от вероятности ложной тревоги для фиксированного N от количества тренировочных ячеек для фиксированного P_{fa} .

При ограниченном наборе N и P_{fa} можно подобрать аппроксимирующую функцию, чтобы заменить ею вычислительно сложное факториальное уравнение. Для этого можно пользоваться полиномиальными (в том числе линейной) и экспоненциальными функциями [27].

График семейства кривых коэффициента OS-CFAR от вероятности ложной тревоги для фиксированного N приведен на рис. 3.

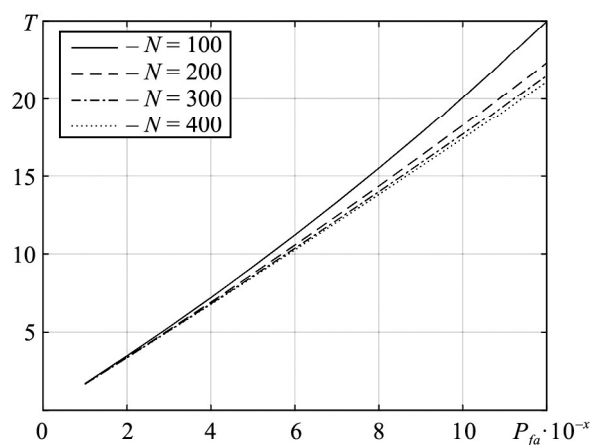


Рис. 3

Из анализа рис. 3 следует, что с увеличением числа тренировочных ячеек зависимость коэффициента OS-CFAR от вероятности ложной тревоги стремится к линейной форме. При фиксированном $N = 300$ в данной работе применяется линеаризация выражением вида $y(x) = kx + b$. Параметры аппроксимации подбирались для 95 % доверительного диапазона. Коэффициенты приведены в табл. 1.

Таблица 1

| Коэффициент | Значение | Нижняя граница доверительного диапазона | Верхняя граница доверительного диапазона |
|-------------|----------|---|--|
| k | 1,8009 | 1,7782 | 1,8236 |
| b | -0,3157 | -0,4827 | -0,1487 |

График аппроксимации зависимости коэффициента OS-CFAR от вероятности ложной тревоги для числа тренировочных ячеек $N = 300$ приведен на рис. 4. Как видим (см. рис. 4), линейная аппроксимация совпадает с точным решением. Посчитаны следующие метрики: сумма квадратов ошибок SSE – 0,1483 (Sum of Squared Errors); число степеней свободы ошибки DFE – 10 (Degrees of Freedom for Error); среднеквадратическая ошибка RMSE – 0,1218 (Root Mean Square Error); коэффициент регрессии R^2 – 0,9997.

По результатам проведенного численного эксперимента можно сделать вывод о том, что зависимость коэффициента масштабирования OS-CFAR от вероятности ложной тревоги является монотонно возрастающей и мало отличается от линейной. С увеличением тренировочных ячеек наблюдаемая зависимость приближается к линейной. Данная зависимость может быть аппроксимирована прямой.

Зависимость коэффициента масштабирования OS-CFAR от числа тренировочных ячеек (2) является убывающей при заданной вероятности ложной тревоги. Вид данной зависимости более сложный, чем

зависимости от различных уровней вероятности ложной тревоги. Для ее аппроксимации необходимо воспользоваться полиномом высшего порядка или рассмотреть экспоненциальную аппроксимацию.

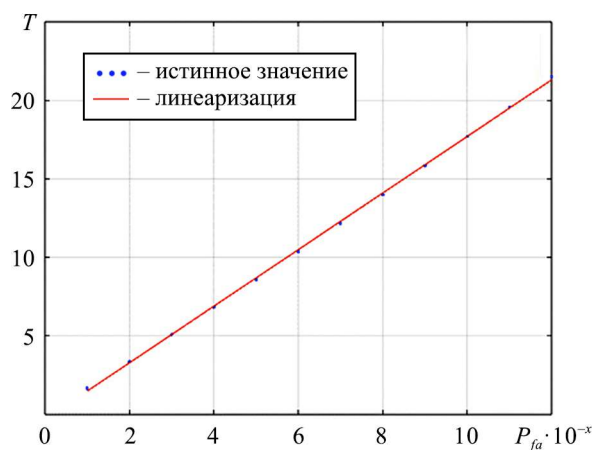


Рис. 4

График семейства кривых зависимости коэффициента OS-CFAR от количества тренировочных ячеек для фиксированного P_{fa} приведен на рис. 5.

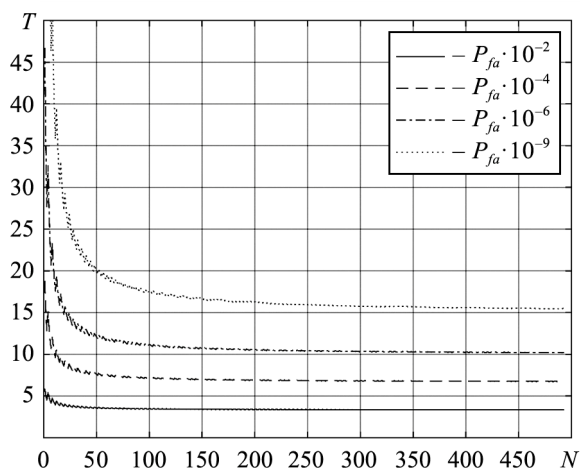


Рис. 5

Проанализировав график (см. рис. 5), можно сделать вывод о том, что коэффициент T возрастает с уменьшением вероятности ложной тревоги. При этом сама зависимость имеет затухающий характер, переходя в неизменное значение при больших N .

Для зависимости коэффициента OS-CFAR от числа тренировочных ячеек при заданной вероятности ложной тревоги $P_{fa} = 10^{-6}$ была выполнена стандартизированная нормализация (z-оценка), позволяющая оценить отклонение каждого значения от среднего в единицах стандартного отклонения. Нормализованная величина распределена по нормальному закону. Нормализация выполняется по формуле [28]

$$z = \frac{x - \bar{X}}{S_x}, \quad (3)$$

где x — нормализуемая величина; \bar{X} — среднее значение; S_x — среднее квадратическое отклонение. Для данного случая выражение (3) приобретает вид

$$z = \frac{x - 254}{142,5}.$$

Аппроксимация производилась полиномом седьмого порядка вида $y(x) = a_1x^7 + a_2x^6 + a_3x^5 + a_4x^4 + a_5x^3 + a_6x^2 + a_7x + a_8$. Параметры аппроксимации подбирались с учетом 95 %-го доверительного диапазона (табл. 2).

Таблица 2

| Коэффициент | Значение | Нижняя граница доверительного диапазона | Верхняя граница доверительного диапазона |
|-------------|----------|---|--|
| a_1 | -1,4061 | -1,6290 | -1,1832 |
| a_2 | 1,4135 | 1,2202 | 1,6068 |
| a_3 | 5,3848 | 4,2939 | 6,4757 |
| a_4 | -4,3594 | -5,1619 | -3,5569 |
| a_5 | -5,9434 | -7,5180 | -4,3688 |
| a_6 | 3,5089 | 2,6298 | 4,3880 |
| a_7 | 1,2472 | 0,5927 | 1,9018 |
| a_8 | 10,0753 | 9,8573 | 10,2932 |

График аппроксимации полиномом седьмой степени приведен на рис. 6.

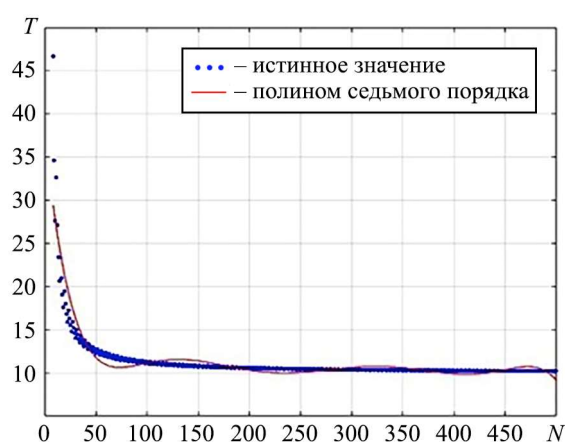


Рис. 6

Как видим (см. рис. 6), полиномиальная аппроксимация наиболее близка к истинному значению для больших N , а для малых (меньше 50–100) расходится с точным значением, отклонение составляет около 2 единиц.

Приведем характеристику качества аппроксимации полиномом седьмой степени: SSE – 614,8423; R^2 – 0,8488; DFE – 485; RMSE – 1,1259.

Для данного случая также хорошо подходит экспоненциальная аппроксимация в виде суммы двух экспонент вида $y(x) = ae^{bx} + ce^{dx}$ (рис. 7).

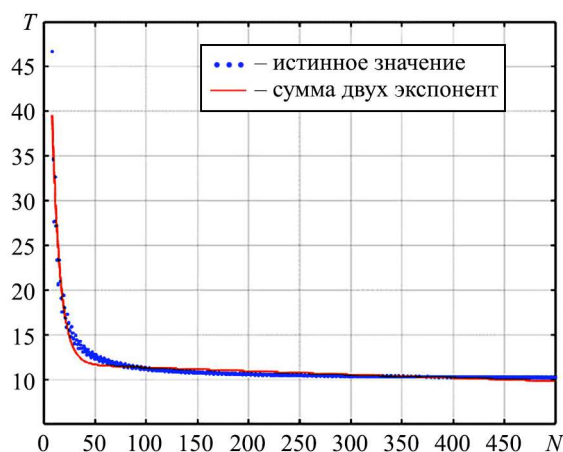


Рис. 7

Согласно графику (см. рис. 7) точность аппроксимации суммой экспонент выше, чем у полинома седьмой степени.

Параметры экспоненциальной аппроксимации подбирались для 95 %-го доверительного диапазона (табл. 3).

Таблица 3

| Коэффициент | Значение | Нижняя граница доверительного диапазона | Верхняя граница доверительного диапазона |
|-------------|----------|---|--|
| <i>a</i> | 78,3512 | 72,9368 | 83,7656 |
| <i>b</i> | -0,1295 | -0,1355 | -0,1235 |
| <i>c</i> | 11,7360 | 11,5966 | 11,8754 |
| <i>d</i> | -0,0004 | -0,0004 | -0,0003 |

Приведем характеристику качества аппроксимации суммой двух экспонент: SSE – 199,1070; R^2 – 0,9510; DFE – 489; RMSE – 0,6381.

По результатам численного эксперимента установлено, что зависимость коэффициента масштабирования OS-CFAR от числа тренировочных ячеек является убывающей при заданной вероятности ложной тревоги и может быть аппроксимирована полиномом седьмой степени с некоторой потерей точности при количестве тренировочных ячеек 100–150 шт. Повышение точности возможно заменой аппроксимирующего выражения на сумму двух экспонент, однако такой подход увеличивает вычислительную сложность.

Алгоритм OS-CFAR представляет собой компромиссное решение между вычислительной эффективностью и устойчивостью. Его способность обеспечивать надежное обнаружение цели в условиях сложной, неоднородной и многопользовательской среды обуславливает его значимость, а в ряде случаев – необходимость применения в современных и перспективных системах ISAC и UAV. По мере перехода к массовому внедрению сетей 6G и автономных систем роль интеллектуальных алгоритмов обнаружения, к которым относится OS-CFAR, будет возрастать, способствуя повышению безопасности и эффективности взаимодействия между устройствами.

Зависимость коэффициента для OS-CFAR от произвольного уровня ложной тревоги хорошо аппроксимируется линейной функцией для фиксированного числа тренировочных ячеек.

Зависимость коэффициента от числа тренировочных ячеек для фиксированного уровня ложной тревоги хорошо аппроксимируется суммой двух экспонент или с упрощением вычислений, но снижением точности – полиномом седьмой степени.

Время, затраченное на расчет полного массива, составляет не более 5 с вместо 185 с. Это позволяет значительно снизить объем вычислений и время расчета коэффициента OS-CFAR, что является критичным для радиолокационных станций в сетях связи 6G, для ISAC и UAV-сетей с обработкой данных в режиме реального времени, в частности, с применением программируемых логических интегральных схем.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации, соглашение № 071-03-2025-005 «Прикладные научные исследования в области разработки методов мониторинга и идентификация типов трафика для эффективного использования сетевого ресурса в гибридных сетях связи» (регистрационный номер ПТНИ – 1024062100008-4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Network 2030. A Blueprint of Technology, Applications and Market Drivers Towards the Year 2030 and Beyond [Electronical Resource]. URL: https://www.researchgate.net/publication/334655833_Network_2030_A_Blueprint_of_Technology_Applications_and_Market_Drivers_Towards_the_Year_2030_and_Beyond (дата обращения: 19.10.2025).
2. Tataria H. et al. 6G Wireless Systems: Vision, Requirements, Challenges, Insights, and Opportunities [Electronical Resource]. URL: <https://arxiv.org/pdf/2008.03213> (дата обращения: 19.10.2025).
3. Abdulwahab Hussain Ali Al-odhari, Fokin G., Kireev A. Positioning of the Radio Source Based on Time Difference of Arrival Method Using Unmanned Aerial Vehicles // Proc. of the Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, March 14–15, 2018, Moscow, Russia. P. 1–5.

4. Fokin G., Al-Odhari Abdulwahab Hussain Ali. Algorithm for Positioning in Non-Line-of-Sight Conditions Using Unmanned Aerial Vehicles // Lecture Notes in Computer Science. 2018. Vol. 11118. P. 496–508.
5. Liu Fan et al. Integrated Sensing and Communications: Towards Dual-Functional Wireless Networks for 6G and Beyond // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2022. Vol. 40. Iss. 6. P. 1728–1767.
6. Grossi E. et al. Opportunistic Radar in IEEE 802.11ad Vehicular Networks // Proc. of the IEEE 85th Vehicular Technology Conference, June 4–7, 2017, Sydney, Australia. P. 1–5.
7. Sneh A. et al. IEEE 802.11ad Based Joint Radar Communication Transceiver: Design, Prototype and Performance Analysis [Electronical Resource]. URL: <https://arxiv.org/abs/2209.04235> (дата обращения: 19.10.2025).
8. Wymeersch H. et al. Joint Communication and Sensing for 6G – A Cross-Layer Perspective // Proc. of the IEEE 4th International Symposium on Joint Communications & Sensing, March 19–21, 2024, Leuven, Belgium. P. 1–6.
9. «Небосвод» – цифровая платформа организации полетов БВС [Электронный ресурс]. URL: <https://pt.2035.university/project/nebosvod-cifrova-a-platforma-organizacii-poletov-bvs-v-vozdušnom-prostranstve-v-tom-cisle-v-gorodskih-aglomeracii> (дата обращения: 19.10.2025).
10. Пафилов Е.А. и др. Пространственно-временные характеристики сигналов радиолокационных станций с синтезированной апертурой с учетом отражения от целей и местных предметов // Изв. вузов. Авиационная техника. 2025. № 1. С. 175–184.
11. Тимошенко А.В. и др. Алгоритм оценки технического состояния радиолокационных станций мониторинга на основе кластеризации многомерных неравномерных временных рядов // Изв. вузов. Авиационная техника. 2022. № 4. С. 194–200.
12. Шевцов В.А. и др. Алгоритм определения критически важных элементов бортовых радиолокационных комплексов по результатам оперативного анализа временных рядов диагностической информации // Изв. вузов. Авиационная техника. 2022. № 2. С. 162–168.
13. Ziwei Wan et al. Orthogonal Chirp Division Multiplexing Waveform Design for 6G mm Wave UAV Integrated Sensing and Communication // Proc. of the International Wireless Communications and Mobile Computing, May 27–31, 2024, Ayia Napa, Cyprus. P. 622–627.
14. Castilla A. et al. Novel Approach to Dual-Channel Estimation in Integrated Sensing and Communications for 6G // Proc. of the IEEE 35th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Sept. 2–5, 2024, Valencia, Spain. P. 1–6.
15. Savaux V. Flexible Communication System for 6G Based on Orthogonal Chirp Division Multiplexing [Electronical Resource]. URL: <https://hal.science/hal-03886249/document> (дата обращения: 19.10.2025).
16. Rohling H. Radar CFAR Thresholding in Clutter and Multiple Target Situations // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1983. Vol. AES-19. Iss. 4. P. 608–621.
17. Sturm C., Wiesbeck W. Waveform Design and Signal Processing Aspects for Fusion of Wireless Communications and Radar Sensing // Proc. of the IEEE. Vol. 99. Iss. 7. P. 1236–1259.
18. Cherniak D., Levantino S. Chirp Generators for Millimeter-Wave FMCW Radars // Special Topics in Information Technology / Eds. B. Pernicet et al. Springer, 2020. P. 33–47.
19. Bomfin R., Chafii M., Fettweis G. Low-Complexity Iterative Receiver for Orthogonal Chirp Division Multiplexing [Electronical Resource]. URL: <https://arxiv.org/abs/1903.08070> (дата обращения: 19.10.2025).
20. Wenxing Zhou et al. Integrated Sensing and Communication Waveform Design: A Survey IEEE Open Journal of the Communications Society. 2022. Vol. 3. P. 1930–1949.
21. Yinsheng Liu et al. Waveform Design for 5G Networks: Analysis and Comparison // IEEE Access. 2017. Vol. 5. P. 19282–19292.
22. Martone A.F., Charlish A. Cognitive Radar for Waveform Diversity Utilization // Proc. of the IEEE Radar Conference, May 7–14, 2021, Atlanta, USA. P. 1–6.
23. Бакулев П.А. Радиолокационные системы. М.: Радиотехника, 2007. 376 с.
24. Kronauge M., Rohling H. Fast Two-Dimensional CFAR Procedure // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2013. Vol. 49. Iss. 3. P. 1817–1823.
25. Hezarkhani A., Kashaninia A. Performance Analysis of a CA-CFAR Detector in the Interfering Target and Homogeneous Background // Proc. of the International Conference on Electronics, Communications and Control, Sept. 9–11, 2011, Ningbo, China. P. 1568–1572.
26. Kanawade V. et al. Comparison of CFAR Algorithms in Real Time Target Detection and Tracking Using Millimeter Wave Radar // Proc. of the IEEE International Conference on Interdisciplinary Approaches in Technology and Management for Social Innovation, March 6–8, 2025, Gwalior, India. Vol. 3. P. 1–5.
27. Mortici C. Some Ideas to Improve Certain Approximation Formulae of the Factorial // Bulletin of the Transilvania University of Brasov. 2010. Vol. 3. № 52. P. 47–52.
28. Мелник М. Основы прикладной статистики. М.: Энергоатомиздат, 1983. 416 с.

Поступила в редакцию 19.11.25

После доработки 2.12.25

Принята к публикации 5.12.25

A Study of the Efficiency of the CFAR Algorithm for Aerial Targets Detection in ISAC 6G Networks

E.P. SAULENKO AND G.A. FOKIN

Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications, Saint Petersburg

The aim of this work is to study the efficiency of the CFAR algorithm. The possibility of using classical radar methods in ISAC 6G networks is being studied. The CFAR algorithm operates within a closely-localized (compared to classical radar) geographical zone (up to 35 kilometers). The configuration of a continuous-wave radar with frequency modulation operating in the millimeter-wave range of 30 – 300 GHz is considered; probing is performed by pulses with linear frequency modulation. A comparative analysis of two models of the CFAR algorithm (based on the average value – Cell Averaging and median value – Ordered Statistics) is provided, a conclusion about the quality and speed of their work is drawn. The problem of estimating the computational complexity of the CFAR algorithm in real-time systems is stated. A numerical experiment with modeling in the MATLAB environment is conducted, allowing us to justify ways to reduce the computational complexity of the CFAR algorithm. It is shown that the OS-CFAR algorithm is the optimal option for ISAC networks. A method for reducing the computational complexity of the OS-CFAR algorithm using an approximated solution of the factorial equation is proposed. It is shown that the speed of obtaining an approximated solution is higher than the speed of solving the factorial equation in symbolic form.

ISAC, OS-CFAR, radar, factorial equations