

УДК 621.396.96

## АЛГОРИТМЫ CFAR В НЕСТАЦИОНАРНЫХ УСЛОВИЯХ: CA-CFAR, GO/SO-CFAR И OS-CFAR

Шин Тант Аунг, магистрант

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

С.Ю. Седышев, – к.т.н., доцент

**Аннотация.** В статье рассматриваются алгоритмы постоянной ложной тревоги (CFAR), применяемые в радиолокационных системах для обнаружения целей в условиях нестационарного фона. Проводится сравнительный анализ классического алгоритма CA-CFAR, его модификаций (GO-CFAR и SO-CFAR), а также алгоритма OS-CFAR, основанного на ранжировке ячеек. Особое внимание уделено их характеристикам обнаружения в присутствии помех, неоднородностей и множественных целей.

**Ключевые слова.** алгоритмы CFAR, нестационарный радиолокационный фон, адаптивное обнаружение целей, CA-CFAR, GO-CFAR, SO-CFAR, OS-CFAR, вероятность ложной тревоги (PFA), вероятность обнаружения (Pd), мешающие цели, клаттерные помехи, адаптивная обработка радиолокационных сигналов, сравнительный анализ алгоритмов, устойчивость к помехам, ранжировка ячеек оценки, параметры обнаружения в сложных условиях.

### Введение

Современные радиолокационные системы сталкиваются с проблемой обнаружения целей на фоне нестационарных помех, таких как остатки подавления пассивных и активных помех. Алгоритмы CFAR (Constant False Alarm Rate) предназначены для адаптивного определения порога обнаружения, поддерживая постоянной заданную вероятность ложных тревог (PFA).

Описание базового алгоритма CA-CFAR и его особенностей были сделаны в статье [[ссылка на твою статью](#)]

Основные задачи статьи:

- Анализ эффективности CA-CFAR в условиях нестационарного радиолокационного фона (РЛФ).
- Описание характеристик обнаружения GO-CFAR и SO-CFAR.
- Сравнение характеристик обнаружения при различном распределении помех.

### Основные алгоритмы CFAR и их особенности

В радиолокационных системах алгоритмы постоянной ложной тревоги (CFAR) играют ключевую роль в обеспечении стабильного обнаружения целей на фоне помех. Среди основных подходов выделяются:

- CA-CFAR (Cell-Averaging CFAR);
- GO-CFAR (Greatest Of CFAR);
- SO-CFAR (Smallest Of CFAR);
- их модификации.

Каждый из этих алгоритмов имеет свои преимущества и ограничения, что делает их применение зависимым от конкретных условий работы радиолокационной системы. Выбор оптимального метода CFAR требует тщательного анализа характеристик окружающей среды и возможных помеховых ситуаций. Современные разработки часто сочетают несколько подходов для создания гибридных алгоритмов, способных адаптироваться к различным сценариям работы.

### Характеристики обнаружения ПУЛТ CA-CFAR в условиях нестационарного радиолокационного фона

Показатели качества функционирования алгоритмов ПУЛТ могут быть существенно снижены в случае наличия нестационарного фона. Рассмотрены примеры моделей нестационарности РЛФ и выражения для расчета вероятностей правильного обнаружения и ложных тревог в этих случаях.

Модели нестационарных сигнально-помеховых ситуаций:

- Модель А. Перепад мощности в протяженной помехе
- Модель В: Два перепада мощности в помехе
- Модель С: Выбросы в отдельных ячейках
- Модель D: Помеха и выбросы в окне оценки.

Если тестовая ячейка находится в чистой области, а совокупность ячеек оценки мощности фона находится в помехе, имеет место так называемый эффект маскирования. Для этого эффекта характерен существенный подъем порога обнаружения, и поэтому вероятность обнаружения снижается, даже притом, что может быть высокое отношение сигнал/шум в интересующем элементе.

Тогда, с учетом методики, изложенной в статье [23] и результатов [4]:

$$p_0(z_i) = \begin{cases} \sigma_0^{-1} \cdot \exp(-z_i/\sigma_0), & i = \overline{m+1, N} \\ [\sigma_0 \cdot (1 + \gamma_n)]^{-1} \cdot \exp(-z_i/\sigma_0 \cdot (1 + \gamma_n)), & i = \overline{1, m} \end{cases} \quad (1)$$

где  $\gamma_n = \frac{\sigma_n}{\sigma_0}$  – обозначает отношение помеха/шум в окне оценки РЛФ.

В работе [4] **Ошибка! Источник ссылки не найден.**показано, что в этом случае выражение для вероятности обнаружения можно представить в виде

$$D = (1 + \gamma_n)^{-m} \left( \left( \frac{1}{1 + \gamma_n} \right) + \left( \frac{T}{1 + \mu} \right) \right)^{-m} \left( 1 + \frac{T}{1 + \mu} \right)^{m-N} \quad (2)$$

При  $\mu = 0$  получаем вероятность ложных тревог:

$$F = (1 + (1 + \gamma_n)T)^{-m} (1 + T)^{m-N} \quad (3)$$

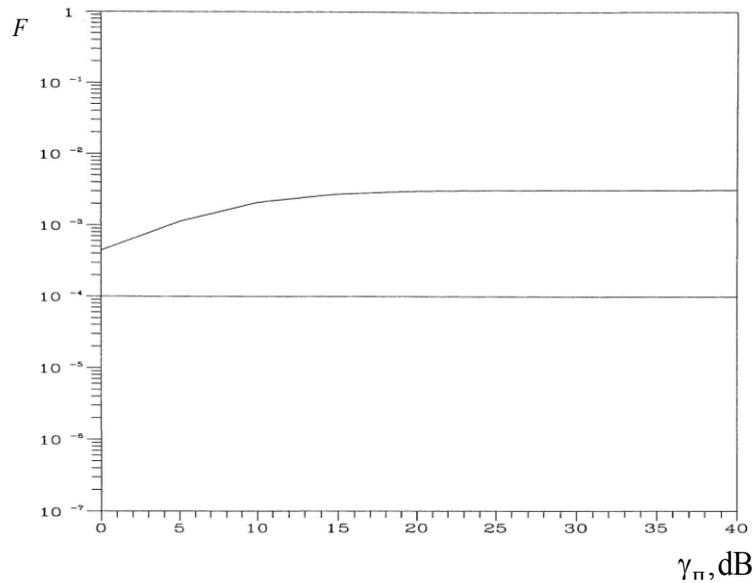


Рисунок 1 – Вероятность ЛТ алгоритма CA-CFAR в присутствии перепада мощности помехи,  $N = 16$ ,  $F_{\text{тр}} = 10^{-4}$

Из рисунка видно, что наличие нестационарного РЛФ ухудшает вероятность ложных тревог.

На Рисунок (2) показана вероятность обнаружения алгоритма CA-CFAR, когда одна и две мешающие цели присутствуют в окне оценки.

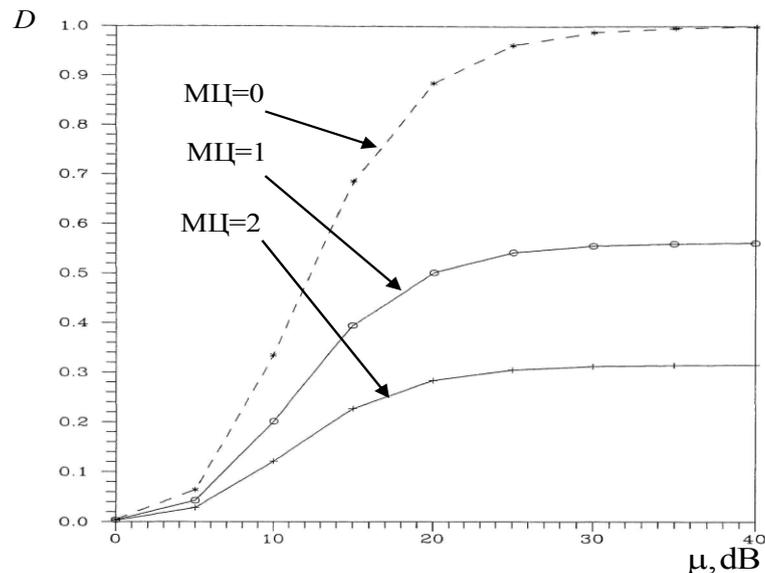


Рисунок 2 – Вероятность обнаружения алгоритма CA-CFAR в присутствии мешающих целей,  $N = 16$ ,  $F_{\text{тр}} = 10^{-4}$

В присутствии мешающих целей (МЦ), вероятность обнаружения ухудшается за счет *эффекта захвата*. Ухудшение более существенно, когда имеется две мешающие цели.

### Алгоритмы скользящего среднего с выбором максимума и минимума

#### Алгоритм GO-CFAR

Присутствие помеховых сигналов в окне оценки основной цели ухудшает вероятность обнаружения. Таким образом, предполагая, что множество помеховых целей присутствует или в ведущих, или в ведомых элементах окна, оценка уровня фона в тестируемом элементе производится так, чтобы быть минимумом сумм выходов ведущих и ведомых элементов.

В алгоритме GO-CFAR оценка уровня фона в испытуемом элементе устанавливается как максимум сумм выходов ведущих и ведомых ячеек. Таким образом, в случае GO-CFAR алгоритма, выход логической схемы выбора – максимум величин  $U$  и  $V$  запишется:

$$Z = \max(U, V) \quad (4)$$

где

$$U = \sum_{i=0}^{M-1} z_i, \quad V = \sum_{i=M+1}^N z_i \quad (5)$$

Случайные величины  $U$  и  $V$  подчиняются Гамма распределению с параметрами  $M$  и  $1, G(M, 1)$ , где  $G(M, 1)$  – плотность Гамма распределения.

Таким образом:

$$p_U(z) = p_V(z) = \frac{1}{\Gamma(M)} z^{M-1} \exp(-z), z \geq 0 \quad (6)$$

Совместная функция распределения для  $U$  и  $V$  имеет вид:

Совместная функция распределения статистики  $Z$  полученной в выражении (7) равна:

$$P_U(z) = P_V(z) = \int_0^z \frac{1}{\Gamma(M)} z^{M-1} \exp(-z) dz, \quad P_Z(z) = P_U(z)P_V(z) \quad (7)$$

$$p_Z(z) = \frac{2z^{M-1} \exp(-z)}{\Gamma(M)} \left[ 1 - \exp(-z) \sum_{k=0}^{M-1} \frac{z^k}{k!} \right] \quad (8)$$

Тогда [4]

$$D = 2 \left( 1 + \frac{T_{GO}}{1+\mu} \right)^{-M} - 2 \sum_{k=0}^{M-1} C_{M+k-1}^k \left( 2 + \frac{T_{GO}}{1+\mu} \right)^{-(M+k)} \quad (9)$$

При  $\mu = 0$ , из предыдущего выражения получаем выражение для заданной вероятности ложных тревог:

$$F = 2(1 + T_{GO})^{-M} - 2 \sum_{k=0}^{M-1} C_{M+k-1}^k (2 + T_{GO})^{-(M+k)} \quad (10)$$

Формула (10) используется для вычисления константы  $T_{GO}$ , при  $F = F_{\text{тр}}$ .

#### Алгоритм SO-CFAR

Алгоритм GO-CFAR работает достаточно хорошо при условии присутствия помехи в ведущем или ведомом окне, когда ячейка анализа тоже находится в помехе. Поэтому в присутствии мешающих целей или в случае присутствия помехи, при условии, что тестовая ячейка находится в чистой области, показатели качества работы алгоритма с выбором максимума существенно падают.

Для преодоления этой проблемы был предложен алгоритм SO-CFAR. В данном алгоритме за оценку шумового уровня в тестовой ячейке принимается минимум сумм выходов ячеек ведущего и ведомого окна.

В данном случае тестовая статистика алгоритма описывается следующим образом:

$$Z = \min(U, V) \quad (11)$$

где  $U$  и  $V$  получается из (5).

Аналогично алгоритм GO-CFAR плотность вероятности тестовой статистики  $z$  для алгоритма SO-CFAR:

$$p_Z(z) = \frac{2z^{M-1} \exp(-2z)}{\Gamma(M)} \sum_{k=0}^{M-1} \frac{z^k}{k!} \quad (12)$$

Тогда вероятность обнаружения алгоритма SO-CFAR равна:

$$D = 2 \left( 2 + \frac{T_{SO}}{1+\mu} \right)^{-M} \sum_{k=0}^{M-1} C_{M+k-1}^k \left( 2 + \frac{T_{SO}}{1+\mu} \right)^{-k} \quad (13)$$

Приравнивая  $\mu = 0$  в выражении (13) **Ошибка! Источник ссылки не найден.** мы получаем выражение для заданной вероятности ЛТФ алгоритма SO-CFAR

$$F = 2(2 + T_{SO})^{-M} \sum_{k=0}^{M-1} C_{M+k-1}^k (2 + T_{SO})^{-k} \quad (14)$$

Как и в случае алгоритма GO-CFAR выражение (14) **Ошибка! Источник ссылки не найден.** используется для вычисления константы  $T_{SO}$ , приравнивая  $F = F_{\text{тр}}$ .

На рисунках 3 и 4 показаны результаты моделирования характеристик обнаружения алгоритмов CA-CFAR, GO-CFAR и SO-CFAR.

При отсутствии помех (Рисунок 3) характеристики обнаружения алгоритмов CA-CFAR, GO-CFAR и SO-CFAR практически совпадают. Так как в алгоритме GO-CFAR из двух оценок берется большая, рассчитанный порог обнаружения оказывается немного больше оценок для CA-CFAR и SO-CFAR, то характеристика обнаружения смещается немного вправо. Это означает незначительное ухудшение вероятности правильного обнаружения для алгоритма GO-CFAR.

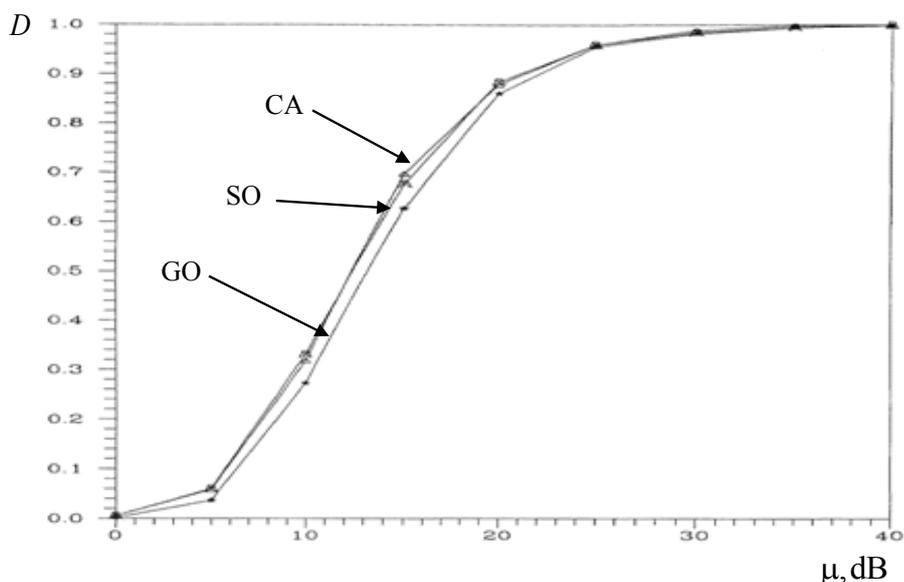


Рисунок 3 – Вероятность обнаружения CA, GO, SO алгоритмов ПУЛТ в случае стационарного фона,  $N = 16, F_{\text{тр}} = 10^{-4}$

На рисунке 4 показаны результаты моделирования алгоритмов CA-CFAR, GO-CFAR и SO-CFAR в присутствии одной мешающей цели в сравнении с результатами Рисунок 3.

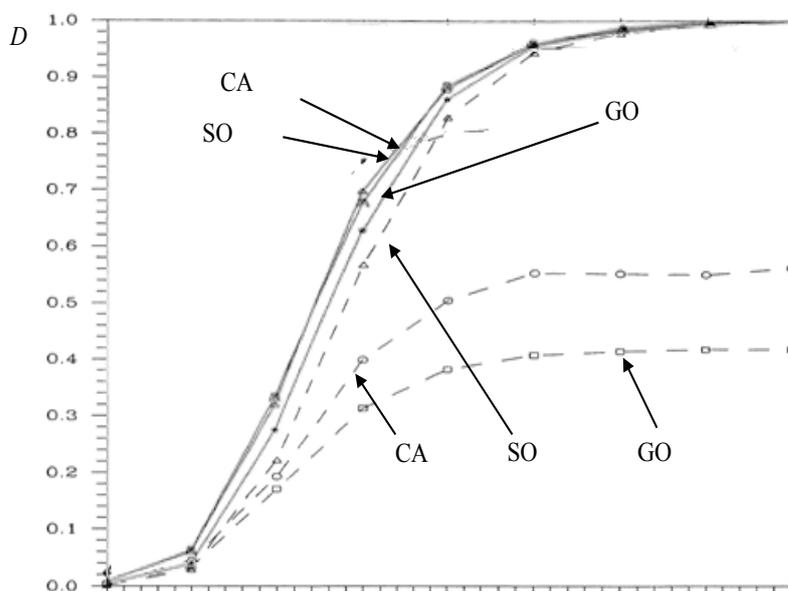


Рисунок 4 – Вероятность обнаружения CA, GO, SO алгоритмов ПУЛТ в присутствии одной мешающей цели,  $N = 16$ ,  $F_{тр} = 10^{-4}$

Из рисунка виден выигрыш в характеристиках обнаружения при использовании алгоритма ПУЛТ SO-CFAR в случае присутствия мешающей цели.

#### Список использованных источников

- (1) Радиозлектронные системы: основы построения и теория. Справочник/Под ред. Ширмана Я.Д.. М.: ЗАО «МАКВИС»; 1998 - 828с.
- (2) Левин Б.П. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Радио и связь, 1989 - 656с.
- (3) Rohling H., Radar CFAR thresholding in clutter and multiple target situations, *IEEE transaction on AES*, 3 (7/1983), 608-621
- (4) Prastitis L.A., On adaptive censored CFAR detection, *New Jersey Institute of Technology*, 1993, 197с.
- (5) С.Горшков, В.Латушкин, С.Седышев. Основы радиолокации. Конспект лекций. ЧИИ-Минск:ВАРБ, 2005г.
- (6) Levanon, N., Shor, M., Order statistic CFAR for Weibull background, *IEE Proceedings, F*, 137, 3 (6/1990), 157-162
- (7) Levanon, N., Detection loss due to interfering targets in ordered statistic CFAR, *IEEE Transactions on AES*, (11/1988), 678-681
- (8) Neyman, J. u Pearson, E., *Neyman-Pearson Criterion for Radar Signal Detection*. – London: *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 1933. – 90 с.
- (9) Urkowitz, H. *Signal Detection Theory and Radar*. Academic Press, 1967.
- (10) Johnson, R. S. Adaptive detection mode with threshold control as a function of spatially sampled clutter estimates/ R.S. Johnson, H.M. Finn// *RCA Review*, vol. 29, 1968, p.414–464.
- (11) Охрименко А. Е. Основы радиолокации и РЭБ. Ч.1. – М.: Воениздат, 1980.
- (12) Семенов К., Бродштейн И. Справочник по математике для инженеров. – М.: Наука, 1986.
- (13) Therrien, C. W. *Decision Estimation and Classification: An Introduction to Pattern Recognition and Related Topics*. Wiley-Interscience, 1989.
- (14) Prastitis, L. A. Ph. Dissertation. On adaptive censored CFAR detection. – *New Jersey Institute of Technology*. – 1993. – p.197
- (15) Swerling, P. Radar probability of detection for some additional fluctuating target cases. / P. Swerling. – *Life Member, IEEE A. Corporation*, 1996. – 698 – 709 p.
- (16) Levanon, N., *Radar Principles*. John Wiley and Sons, New York, 1988.
- (17) Steven M. Kay. *Statistical signal processing: Detection theory*. Prentice Hall PTR, 1998.
- (18) Rohling, H. 25 years research in range CFAR techniques / H. Rohling // *Proc. IRS-2003, Germany*. – 2003. – P. 363–368.
- (19) Горшков С. А., Латушкин В. В., Седышев С. Ю. Основы радиолокации: конспект лекций. – Ч I. – Минск: ВА РБ, 2003.
- (20) Michael F. Rimebert, *Constant False Alarm Rate Detection Techniques Based on Empirical Distribution Function Statistics*, Ph.D Thesis, *Purdue University*, 2005
- (21) Горшков С. А., Латушкин В. В., Седышев С. Ю. Основы радиолокации: конспект лекций. – Ч II. – Минск: ВА РБ, 2005.
- (22) Радиозлектронные системы: основы построения и теория: справ./ под ред. Я. Д. Ширмана. – М.: МАКВИС, 2007.
- (23) Алгоритмы оценки мощности радиолокационного фона в системах стабилизации уровня ложных тревог в радиолокационных станциях с цифровой обработкой сигнала, С.Ю. Седышев, – к.т.н., доцент.

UDC 621.396.96

## CFAR ALGORITHMS IN NON-STATIONARY CONDITIONS: CA-CFAR, GO/SO-CFAR AND OS-CFAR

*Shin Thant Aung, Master's student*

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus*

*Sergei Sedyshev, Ph.D., Associate Professor*

**Annotation.** The article discusses persistent false alarm rate (CFAR) algorithms used in radar systems for target detection in non-stationary background conditions. A comparative analysis of the classical CA-CFAR algorithm, its modifications (GO-CFAR and SO-CFAR), and the OS-CFAR algorithm based on cell ranking is carried out. Particular attention is paid to their detection characteristics in the presence of interference, inhomogeneities, and multiple targets.

**Keywords.** CFAR algorithms, non-stationary radar background, adaptive target detection, CA-CFAR, GO-CFAR, SO-CFAR, OS-CFAR, probability of false alarm (PFA), probability of detection (Pd), clutter, adaptive radar signal processing, comparative analysis of algorithms, interference resistance, ranking of evaluation cells, detection parameters in complex environments.