

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ УГЛОВ ПРИХОДА СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ И ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ НЕКОГЕРЕНТНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ РАДАРОВ¹

© 2024 г. И. В. Артюхин*, А. Г. Флакман, А. Е. Рубцов

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, просп. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950 Российская Федерация

*E-mail: artjukhin@rf.unn.ru

Поступила в редакцию 11.12.2023 г.

После доработки 11.12.2023 г.

Принята к публикации 15.05.2024 г.

На основе экспериментальных данных и численного моделирования проведено исследование эффективности разработанного ранее авторами алгоритма оценки углов прихода сигналов для системы распределенных некогерентных автомобильных радаров. Показано, что предложенный алгоритм корректно распознает положение целей в рассматриваемых сценариях эксперимента. Сравнительное численное моделирование показало эффективность работы предложенного алгоритма по сравнению с характеристиками одиночного радара.

Ключевые слова: система распределенных некогерентных автомобильных радаров, система помощи водителю, алгоритм сверхразрешения близких целей; метод Кейпона, автокомпенсатор

DOI: 10.31857/S0033849424040079, **EDN:** JROBUF

ВВЕДЕНИЕ

Современное направление развития системы безопасности и системы помощи водителю (Advanced Driver Assistance Systems, ADAS) заключается в объединении разнесенных радаров, расположенных на автомобиле, в единый комплекс с совместной обработкой сигналов для получения лучших характеристик в задачах обнаружения, позиционирования и распознавания целей [1–6].

Традиционно при объединении измерений с разных радаров выделяют два подхода: когерентную и некогерентную обработку сигналов. При этом одной из актуальных задач является разработка вычислительно-эффективных алгоритмов оценки углов прихода в таких системах.

Когерентная обработка предполагает построение совместной виртуальной антенной решетки нескольких радаров, работающих в бистатичном режиме, при этом необходима синхронизация сигналов между радарными [1, 2].

Некогерентная обработка подразумевает объединение сигналов отдельных радаров, работающих в моностатичном режиме [7–11]. В работе [7] предложена система радаров, состоящих из 15

некогерентных близко расположенных радаров, синхронизированных по частоте. Такая система позволила сформировать антенную решетку с разрешением в 0.1° без применения классических алгоритмов сверхразрешения. В работе [8] отдельные радары оценивают дальность, эффект Доплера (радиальную скорость), углы прихода сигналов независимо друг от друга, а совместная обработка сигналов осуществляется при помощи фильтра Калмана. В [9–11] предложены алгоритмы оценки углов на основе объединения измерений двух радаров. Алгоритм оценки углов прихода для системы некогерентных автомобильных радаров с малой вычислительной сложностью в случае короткой выборки входного процесса (Low-Complexity Auto-Compensator Method, LC ACM) был предложен нами ранее [10, 11].

Цель статьи — исследование эффективности алгоритма оценки углов прихода сигналов [10] на основе экспериментальных данных и численного моделирования.

1. ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА

Рассматриваемый алгоритм состоит из трех шагов: 1) процедура сканирования для отдельных радаров, 2) преобразование отсчетов и их объединение, 3) метод сверхразрешения двух близких целей

¹ Работа доложена на X Международной конференции “Инжиниринг и Телекоммуникации — En&T-2023”.

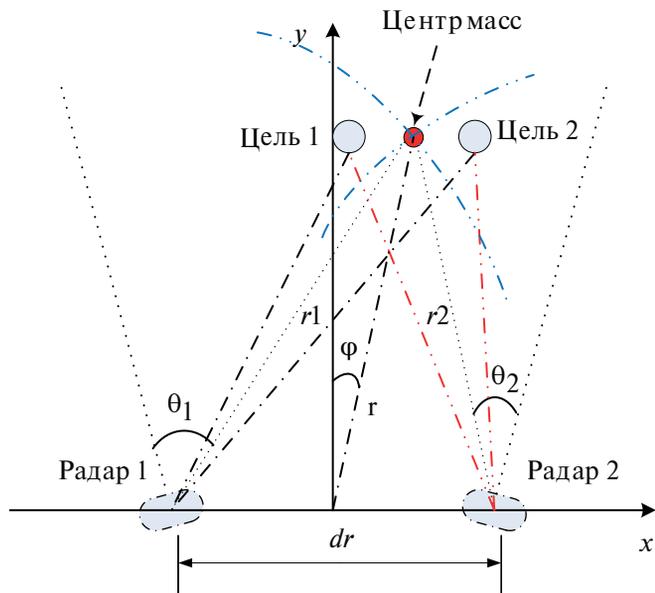


Рис. 1. Система координат, расположение радаров и целей.

с использованием двухканального автокомпенсатора [10, 12].

Система координат, расположение радаров в ней и целей представлено на рис. 1, общая схема алгоритма — на рис. 2.

Шаг 1 (сканирование) заключается в формировании сканирующего вектора для каждого радара в локальной системе координат, связанной с центром “своей” антенной решетки (АР). Пусть θ_k — угол прихода сигнала в азимутальной плоскости для k -го радара ($k = 1, 2$). Тогда p -ю компоненту сканирующего вектора $\mathbf{a}(\theta_k)$ АР этого радара в направлении θ_k можно представить в виде

$$\mathbf{a}_p(\theta_k) = \exp(2\pi j d_\lambda (p - 0.5(N + 1)\sin(\theta_k))), \quad (1)$$

где d_λ — расстояние между элементами АР, выраженное в длинах волн λ , N — число элементов в АР. Фазовый центр АР расположен в центре апертуры радара.

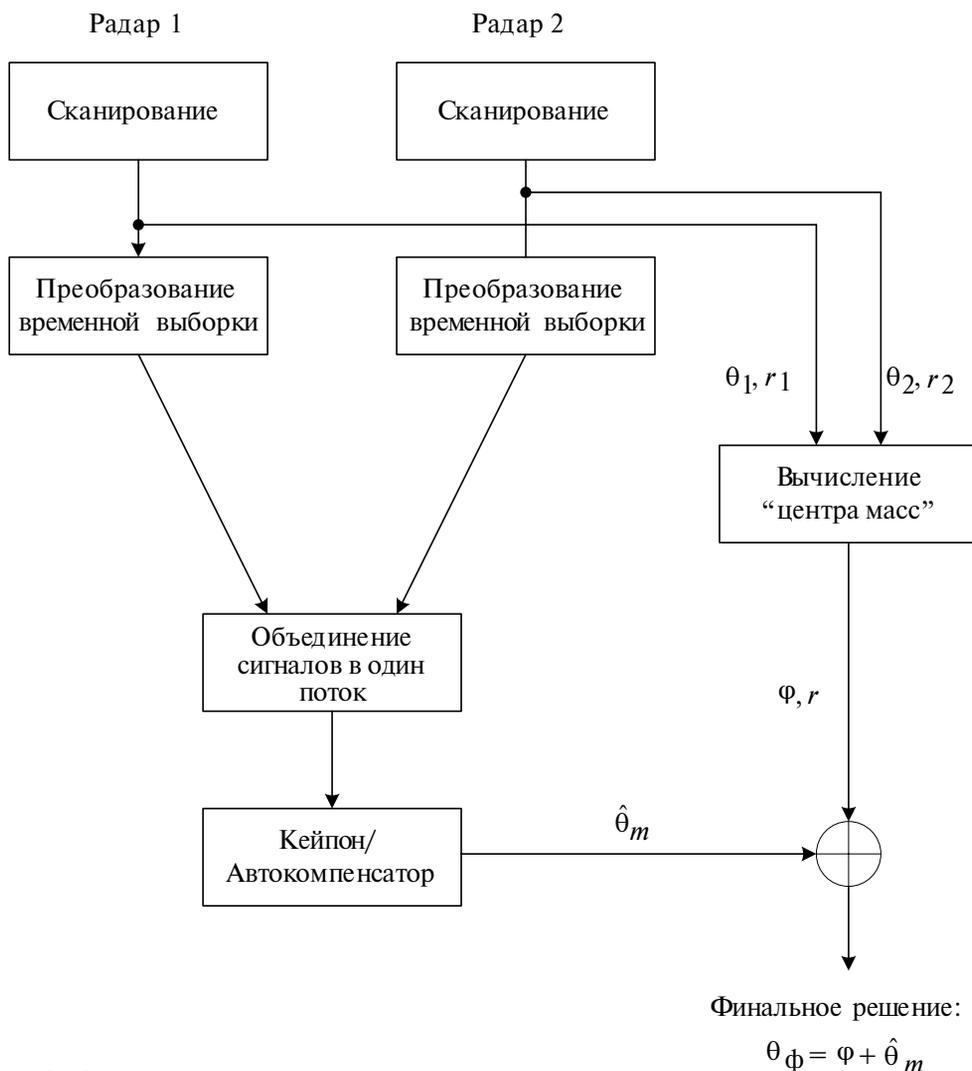


Рис. 2. Схема обработки сигналов для оценки углов прихода.

Шаг 2 — преобразование векторов входных сигналов. Вектор принятых сигналов в АР для k -го радара может быть записан в виде

$$\mathbf{y}^k = \sum_{m=0}^{J-1} \mathbf{a}(\theta_m^k) s_m^k + \xi^k, \quad (2)$$

где s_m^k — комплексная амплитуда m -й цели с угловой координатой θ_m^k , J — число целей, ξ^k — гауссов шум приемника k -го радара.

Преобразованные векторы будут иметь вид

$$\mathbf{z}(\theta_k) = \mathbf{G}_{\theta_k} \mathbf{y}^k, \quad \mathbf{G}_{\theta_k} = \text{diag}\{\mathbf{a}(-\theta_k)\}, \quad (3)$$

$\text{diag}\{\mathbf{x}\}$ — диагональная матрица, содержащая элементы вектора \mathbf{x} на главной диагонали.

Преобразованные сигналы (3) отдельных радаров объединяются в общий поток данных

$$\mathbf{Z} = [\mathbf{z}(\theta_1), \mathbf{z}(\theta_2)],$$

где матрица \mathbf{Z} будет иметь размерность $[N, 2L]$, L — число временных отсчетов в отдельном радаре.

Преобразование (3) сбрасывает на ноль “центр масс” двух близких целей. В конечном решении для углов прихода сигнала необходимо учесть результаты процедуры сканирования отдельных радаров. Координаты “центра масс” двух близких целей можно найти через решение системы уравнений двух окружностей [10]. Центры окружностей $C_1(-0.5d_r, 0)$; $C_2(+0.5d_r, 0)$ определяют положение радаров в общей системе координат, а радиусы: r_k ($k = 1, 2$) — оценки дальностей для каждого радара. Тогда можно записать систему уравнений, состоящую из уравнений этих окружностей

$$\begin{aligned} (x + 0.5d_r)^2 + y^2 &= r_1^2, \\ (x - 0.5d_r)^2 + y^2 &= r_2^2. \end{aligned} \quad (4)$$

Точка пересечения двух окружностей будет являться “центром масс” целей и угол θ_ϕ определяющий направление на данную точку, будет учтен при конечном решении для углов прихода. Решение системы (4) может быть записано в аналитическом виде

$$x = \frac{r_1^2 - r_2^2}{2d_r}, \quad y = \sqrt{r_1^2 - \left(\frac{r_1^2 - r_2^2}{2d_r} + \frac{d_r}{2}\right)^2}. \quad (5)$$

Координата y в выражении (5) берется со знаком плюс, поскольку цели лежат в верхней полуплоскости.

Шаг 3 — определение направлений углов прихода сигнала основано на практической реализации метода Кейпона с помощью двухканального автокомпенсатора (рис. 3).

Отметим, что для корректной работы методов оценки углов прихода сигналов в случае коррелированных сигналов и короткой выборки входного

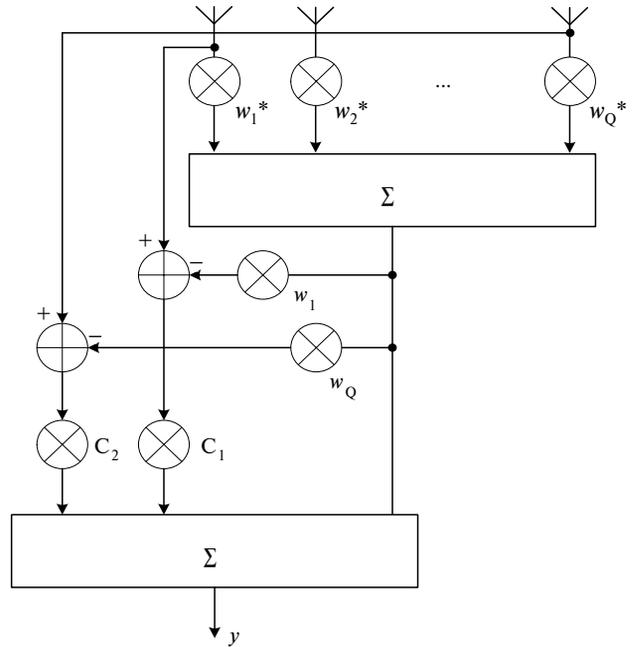


Рис. 3. Схема двухканального компенсатора.

процесса необходимо применять известную процедуру пространственного сглаживания для входных данных [13]. Для реализации этой процедуры в основной АР выделяются отдельные подрешетки, оптимальный размер которых составляет $Q \approx 0.7N$. Например, при $N = 12$, $Q = 8$.

Оценка углов прихода сигналов определяется через решение задачи максимизации

$$\hat{\theta}_m = \text{argmax}_\theta |y(\theta)|, \quad (6)$$

где $|y(\theta)|$ — сигнал автокомпенсатора y на выходе как функция угла θ . Максимумы функции (соответствующие им углы) являются углами прихода сигналов $\hat{\theta}_m$.

Выход компенсатора можно представить в виде

$$y = x_0 + \sum_{p=1}^K c_p x_p, \quad (7)$$

где x_0 и x_p — выходные сигналы основного и p -го вспомогательного каналов соответственно, K — число каналов,

$$c_1 = \frac{\langle x_0 x_2^* \rangle \langle x_2 x_1^* \rangle - \langle x_0 x_1^* \rangle \langle |x_2|^2 \rangle}{\langle |x_1|^2 \rangle \langle |x_2|^2 \rangle - |\langle x_2 x_1^* \rangle|^2}, \quad (8)$$

$$c_2 = \frac{\langle x_0 x_2^* \rangle \langle x_1 x_2^* \rangle - \langle x_0 x_2^* \rangle \langle |x_1|^2 \rangle}{\langle |x_1|^2 \rangle \langle |x_2|^2 \rangle - |\langle x_1 x_2^* \rangle|^2}. \quad (9)$$

Конечное решение для углов прихода необходимо сдвинуть на угол ϕ , полученный при решении системы уравнений (4):

$$\theta_\phi = \phi + \hat{\theta}_m. \quad (10)$$

2. ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Для исследования эффективности предложенного алгоритма были использованы измерения, полученные в ходе экспериментов прототипа распределенной системы автомобильных Multiple-Input-Multiple-Output радаров миллиметрового диапазона длин волн [14].

Два радара установлены на бампере автомобиля на расстоянии 1.46 м друг от друга и под углом 45° . Антенная решетка одиночного радара имеет конфигурацию 3T4R (три передающих и четыре приемных антенны). В результате полученная виртуальная AP является линейной эквидистантной, состоящей из 12 элементов с расстоянием между соседними элементами в 0.5λ . Основные параметры радара представлены в табл. 1.

Таблица 1. Основные параметры радара

Параметры	Значения
Зондирующий сигнал	Набор ЛЧМ-импульсов
Полоса, МГц	750
Количество импульсов в пачке	128
Количество отсчетов внутри одного импульса	512
Разрешение по дальности, м	0.2
Разрешение по скорости, м/с	1.1
Максимальная дальность, м	30

Условная схема эксперимента представлена на рис. 4. Две цели (автомобили) находятся в общем секторе обзора двух радаров и медленно двигаются по отношению к автомобилю с радаром.

Данные радаров с выхода аналого-цифрового преобразователя записываются в память внешнего устройства, и дальнейшая обработка сигналов происходит на компьютере. Обнаружение сигналов, определение дальности и радиальной скорости производится для каждого радара в отдельности и является стандартной процедурой, описанной в известной литературе, например, в [15].

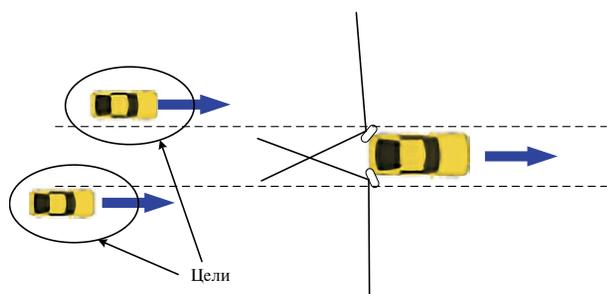


Рис. 4. Условная схема эксперимента.

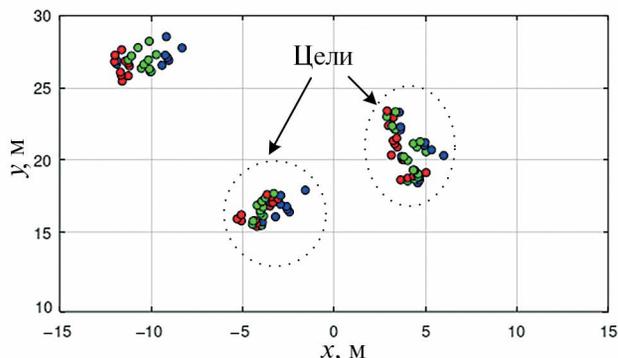


Рис. 5. Пример обработки экспериментальных данных: красные/синие точки — решения, полученные с помощью процедуры сканирования для одиночных радаров SRR_1 и SRR_2 соответственно, зеленые точки — оценки целей предложенного алгоритма для распределенной системы.

Пример обработки экспериментальных данных для одиночного радара и с учетом предложенного алгоритма оценки углов прихода сигналов для системы радаров, представлен на рис. 5. При этом для оценки углов прихода используется только один временной отсчет с каждого радара.

Из полученных результатов обработки экспериментальных данных видно, что каждый автомобиль представлен набором точечных целей (облаком “блестящих” точек). При этом цели разнесены в пространстве и легко идентифицируются (разделяются).

Отсчеты с отдельных радаров для алгоритма оценки углов прихода сигналов в распределенной системе группируются попарно исходя из предположения близости точек на плоскости XU и с дополнительным ограничением на одинаковость знаков углов прихода, полученного из метода сканирования.

Экспериментальные данные были представлены для случая динамического сценария движущихся целей, что затрудняет получение статистических характеристик для точности оценки углов прихода. Поэтому для сравнения эффективности алгоритмов использовалось дополнительное численное моделирование.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В рассматриваемом сценарии отдельные цели разделяются в пространстве без дополнительного применения алгоритмов сверхразрешения. Принимая во внимание особенности эксперимента, без ограничения общности, сравнение эффективности алгоритмов оценки углов прихода выполнено для случая одной пары “блестящих” точек от правого и левого радаров (что эквивалентно одиночной точечной цели в общем секторе обзора).

В качестве примера рассмотрена система, состоящая из двух распределенных в пространстве радаров ближнего действия (Short Range Radar, SRR) миллиметрового диапазона длин волн, расстояние между радаром 1.46 м. Каждый радар имеет эквидистантную АР, состоящую из 12 изотропных элементов с периодом 0.5λ. Для оценки углов прихода используется только один временной отсчет с каждого радара. Сигнал, отраженный от цели, моделируется в виде комплексного гауссова процесса, учитывается только прямой луч. Для исследования эффективности алгоритмов был использован метод Монте-Карло.

Три основные метрики используются для сравнения.

1. Вероятность правильного определения числа целей p :

$$p = m / n, \tag{11}$$

где m — число экспериментов с правильным числом целей, n — общее число экспериментов.

2. Среднеквадратичная ошибка (СКО) вычисляется по формуле

$$\begin{aligned} \text{СКО} &= \sqrt{\frac{1}{J} \sum_{k=1}^J \sigma_k^2}, \\ \sigma_k^2 &= \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (\hat{\varphi}_{ki} - \bar{\varphi}_k)^2, \\ \bar{\varphi}_k &= \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \hat{\varphi}_{ki}, \end{aligned} \tag{12}$$

где $\hat{\varphi}_{ki}$ — оценка углов прихода для k -й цели в m -м эксперименте.

3. Систематическая ошибка (СО) имеет вид

$$\text{СО} = \sqrt{\frac{1}{J} \sum_{k=1}^J (\bar{\varphi}_k - \varphi_k)^2}. \tag{13}$$

Метрики СКО и СО рассматриваются только для случаев, когда вероятность корректного обнаружения числа близких целей равна $p > 0.8$.

Дополнительная метрика использована для численного сравнения эффективности алгоритмов (методов) — нормированные СКО и СО (Норм. СКО и Норм. СО соответственно) по отношению к метрикам алгоритма для распределенной системы радаров:

$$\begin{aligned} \text{Норм. СКО} &= \frac{\text{СКО}_{\text{рассм. алгоритм}}}{\text{СКО}_{\text{LC ACM}}}, \\ \text{Норм. СО} &= \frac{\text{СО}_{\text{рассм. алгоритм}}}{\text{СО}_{\text{LC ACM}}}. \end{aligned} \tag{14}$$

Обобщенные (усредненные) метрики, полученные по результатам численного моделирования для разных углов прихода сигналов с фиксированным

Таблица 2. Сравнение результатов численного моделирования для различных алгоритмов

Метрики	LC ACM	BS		Метод Кейпона [13]	
		SRR ₁	SRR ₂	SRR ₁	SRR ₂
СКО	0.0711	0.2987	0.2584	0.4057	0.3571
Нормированное СКО	1.0000	4.2020	3.6351	5.7067	5.0238
СО	0.0033	0.0096	0.0075	0.0221	0.0152
Нормированное СО	1.0000	2.9361	2.2837	6.7627	4.6602

Примечания: LC ACM — предложенный алгоритм для распределенной системы; BS (Beam Scanning) — классическая процедура (метод) сканирования для одиночного радара [13].

значением отношения сигнал/шум (ОСШ), равным 15 дБ, представлены в табл. 2.

Из представленных результатов видно, что распределенная система выигрывает в точности определения углов прихода сигналов примерно в 5 раз по сравнению с одиночным радаром.

Сравнение трех метрик как функции ОСШ для разных алгоритмов оценки углов прихода представлены на рис. 6, 7. В качестве примера рассмотрен случай, когда одиночная цель находится на азимуте 7°. Число экспериментов для каждого значения ОСШ равно 500.

Из результатов численного моделирования видно, что предложенный алгоритм оценки углов прихода сигналов в системе распределенных некогерентных радаров выигрывает в основных метриках (СКО и СО) по сравнению с одиночным радаром. Например, СКО в 0.1° достигается при ОСШ 12 дБ

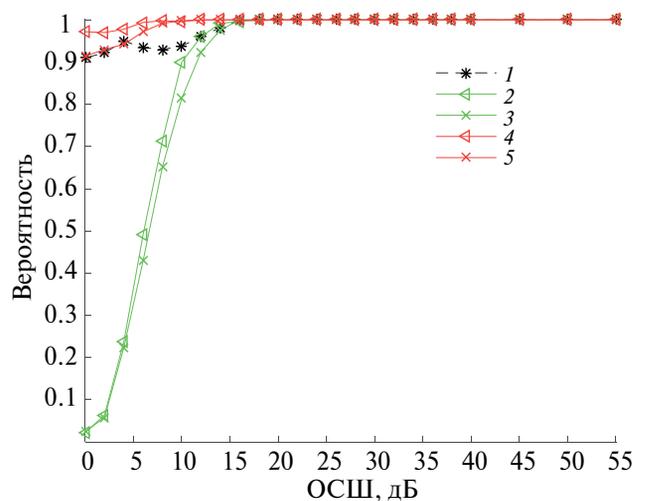


Рис. 6. Вероятность корректного обнаружения числа целей в зависимости от ОСШ: кривая 1 — предложенный алгоритм для распределенной системы, LC ACM; кривые 2 и 3 — метод сканирования для одиночного радара SRR₁ и SRR₂; кривые 4 и 5 — классический метод Кейпона для одиночного радара SRR₁ и SRR₂.

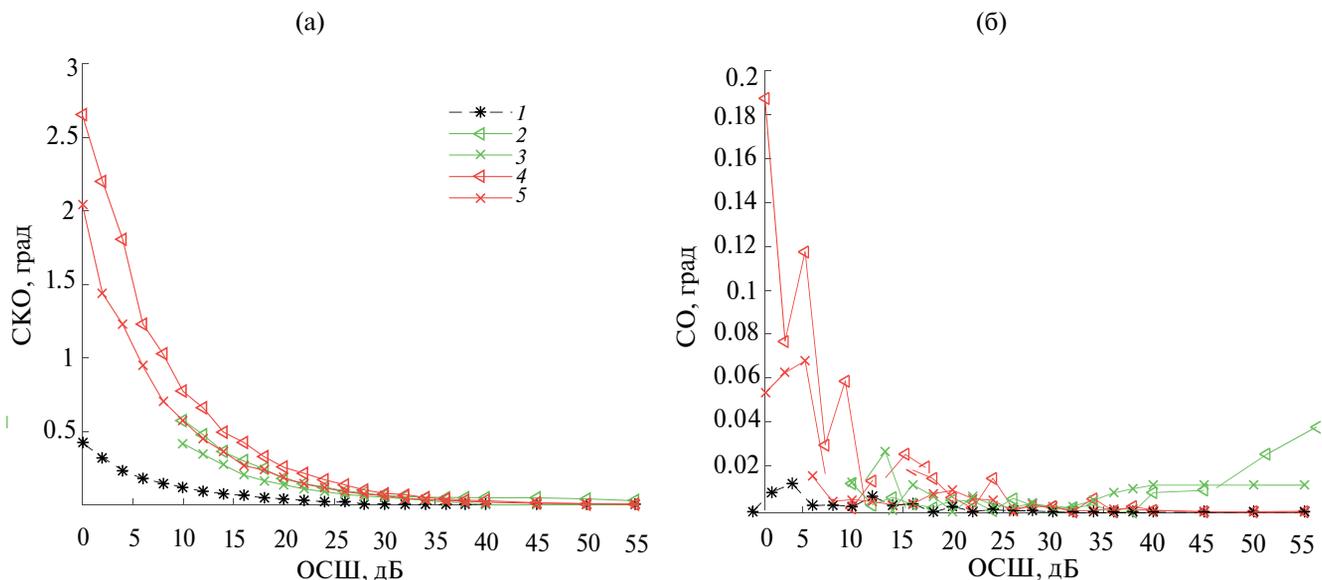


Рис. 7. Зависимость МСКО (а) и СО (б) от ОСШ: кривая 1 — предложенный алгоритм для распределенной системы, LC ACM; кривые 2 и 3 — метод сканирования для одиночного радара SRR_1 и SRR_2 ; кривые 4 и 5 — классический метод Кейпона для одиночного радара SRR_1 и SRR_2 .

для распределенной системы радаров против 26 дБ для одиночного радара (выигрыш в ОСШ составляет 14 дБ).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследована эффективность алгоритма оценки углов прихода сигналов, предложенного авторами ранее в [10] на основе экспериментальных данных и численного моделирования. В ходе обработки экспериментальных данных было показано, что предложенный алгоритм корректно распознает положение целей в рассматриваемых сценариях. Проведенное дополнительно сравнительное численное моделирование показало эффективность алгоритма оценки углов прихода сигналов для системы распределенных некогерентных радаров в предложенном сценарии по сравнению с характеристиками одиночного радара.

Авторы данной работы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Gottinger M., Hoffmann M., Christmann M. et al. // IEEE J. Microwaves. 2021. V. 1. № 1. P. 149. <https://doi.org/10.1109/JMW.2020.3034475>
- Waldschmidt C., Hasch J., Menzel W. // IEEE J. Microwaves. 2021. V. 1. P. 135. <https://doi.org/10.1109/JMW.2020.3033616>
- Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. М.: Радио и связь, 1993.
- Patole S., Torlak M., Wang D., Ali M. // IEEE Signal Process. Mag. 2017. V. 34. № 2. P. 22. <https://doi.org/10.1109/MSP.2016.2628914>
- Ziegler J., Bender Ph., Schreiber M. et al. // IEEE Intell. Transp. Syst. Mag. 2014. V. 6. № 2. P. 8. <https://doi.org/10.1109/MITS.2014.2306552>
- Deng H. // IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag. 2012. V. 27. № 5. P. 28. <https://doi.org/10.1109/MAES.2012.6226692>
- Bialer O., Jonas A., Tirer T. // IEEE Sensors J. 2021. V. 21. № 16. P. 17846. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3085677>
- Folster F., Rohling H., Lubbert U. // IEEE Int. Radar Conf. 2005. P. 871. <https://doi.org/10.1109/RADAR.2005.1435950>
- Bialer O., Kolpinizki S. // IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing. 2019. P. 4175. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2019.8682458>
- Артюхин И.В., Аверин И.М., Флакман А.Г., Рубцов А.Е. // Журн. радиоэлектроники. 2023. № 4. <https://doi.org/10.30898/16841719.2023.4.2>
- Артюхин И.В., Аверин И.М., Флакман А.Г., Рубцов А.Е. // IX Int. Conf. "Engineering & Telecommunication En&T-2022". М.: МФТИ. 2022. С. 5.
- Widrow B., Stearn S.D. Adaptive Signal Processing. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1985.
- Tuncer T.E., Friedlander B. Classical and Modern Direction-of-Arrival Estimation. Burlington; MA: Acad. Press, Inc. 2009.
- Li J., Stoica P. MIMO Radar Signal Processing. Hoboken; N.J.: Wiley-IEEE Press, 2009.
- Patole S., Torlak M., Wang D., Ali M. // IEEE Signal Processing Magazine. 2017. V. 34. № 2. P. 22. <https://doi.org/10.1109/MSP.2016.2628914>

INVESTIGATION OF EFFICIENCY OF DOA ALGORITHM ON THE BASE OF EXPERIMENTAL DATA AND NUMERICAL SIMULATIONS IN AUTOMOTIVE DISTRIBUTED SYSTEM OF INCOHERENT RADARS

I. V. Artyukhin*, A. G. Flaksman, A. E. Rubtsov

*Nizhny Novgorod State University n. a. N.I. Lobachevsky,
Gagarina ave., 23, Nizhny Novgorod, 603950 Russian Federation
E-mail: artjukhin@rf.unn.ru

Received December 11, 2023; revised December 11, 2023; accepted May 15, 2024

Investigation of efficiency of proposed DoA estimation algorithm for system of distributed incoherent automotive radars is performed on the base of experimental data and numerical simulation. It is shown that the proposed algorithm correctly recognizes the position of targets in considered experimental scenarios. Comparative numerical simulations show the efficiency of the proposed algorithm compared to the characteristics of single radar.

Keywords: automotive distributed non-coherent multi-radars system, advanced driver assistance system, high-resolution DoA algorithm, Capon method, auto-compensator