

УДК 621.396.96

## ОЦЕНКА ПОМЕХОЗАЩИТНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ АДАПТИВНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ ПРИ ДЕЙСТВИИ ДВУХТОЧЕЧНОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ПОМЕХИ

© 2024 г. В. Н. Юдин<sup>а</sup>, Д. А. Савченко<sup>б,\*</sup>

<sup>а</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
Волоколамское шоссе, 4, Москва, 125993 Российская Федерация

<sup>б</sup>АО «Аэроприбор-Восход»,  
ул. Ткацкая, 19, Москва, 105318 Российская Федерация

\*E-mail: danil.svch@yandex.ru

Поступила в редакцию 27.03.2024 г.

После доработки 27.03.2024 г.

Принята к публикации 24.04.2024 г.

Проведено сравнение помехоустойчивости адаптивной антенной решетки (ААР) при действии двухточечной некогерентной и когерентной шумовой помехи (ШП) по величине коэффициента ослабления помехи. Показано на примере навигационной ААР, что уровни ослабления двухточечной когерентной ШП по итогам адаптации ААР значительно ниже, чем некогерентной ШП.

*Ключевые слова:* адаптивная антенная решетка, коэффициент ослабления помехи, двухточечная когерентная помеха

DOI: 10.31857/S0033849424080093, EDN: НОВКОО

### ВВЕДЕНИЕ

Адаптивная антенная решетка (ААР) содержит средства, позволяющие управлять формой диаграммы направленности (ДН) сообразно складывающейся сигнально-помеховой обстановке. Адаптивное управление формой ДН выполняется с целью ослабления помех, т.е. в интересах повышения помехозащищенности радиоэлектронного средства (РЭС), в составе которого работает ААР. Варианты построения, критерии и алгоритмы адаптации, а также вопросы эффективности ААР как средства помехозащиты (“помехозащитной эффективности”), рассмотрены в обширной литературе, например, в [1–3].

Оценка помехозащитной эффективности ААР обычно выполняется применительно к условиям, когда радиопомехи, действующие на РЭС, в составе которого работает ААР, взаимно некогерентные. В таких условиях ААР формирует ДН с “провалами” в направлениях источников помех, глубина и форма которых определяет степень ослабления помех. Количественные оценки помехозащитной эффективности ААР, полученные по результатам натурных, а также компьютерных модельных экспериментов содержатся в ряде источников, например, в [4].

Особенность задачи, рассматриваемой в данной работе, заключается в том, что анализируется ситуация, когда на ААР воздействует двухкомпонентная

шумовая помеха (ШП), создаваемая излучателями ШП. Компоненты ШП в совпадающие моменты времени идентичны и создаются из разнесенных точек пространства. Фактически речь идет о ШП, одна и та же реализация которой излучается одновременно из двух точек пространства. Такую помеху будем называть двухточечная когерентная шумовая помеха (ДКШП). Формирование ДКШП возможно, например, на базе двух комплектов цифровой памяти, расположенных в точках излучения, из которых по команде одновременно считывается записанная в них реализация шума.

Амплитудно-фазовое распределение, создаваемое компонентами ДКШП на полотне ААР, зависит от взаимного пространственного положения точек излучения ДКШП и антенных элементов ААР (геометрический фактор). Кроме того, распределение фаз на элементах ААР определяется фазоугловой характеристикой двухточечного когерентного излучателя (фактор фазо-угловой зависимости излучателя). Совместное действие этих факторов влияет на формирование оценки корреляционной матрицы помехи, которая определяет форму ДН ААР, получаемую в результате адаптации. Логично предположить, что ААР может воспринимать двухточечный когерентный излучатель как одноточечный, расположенный между точками излучения. В итоге по результатам адаптации ААР вместо двух “провалов”,

ориентированных в точки излучения взаимно некогерентных ШП, может быть сформирован один “провал”, ориентированный в промежуточную точку. Результатом действия указанного эффекта может быть уменьшение помехозащитной эффективности ААР по отношению к помехам типа ДКШП по сравнению с взаимно некогерентными помехами.

Сказанное выше определяет актуальность изучения влияния ДКШП на помехозащитную эффективность ААР. Количественные оценки этого влияния были получены с использованием компьютерной имитационной модели воздействия двухточечных некогерентной и когерентной ШП на навигационную ААР.

### 1. ОПИСАНИЕ ИССЛЕДУЕМОГО ОБЪЕКТА

Критерий адаптации рассматриваемой ААР – минимум мощности помехи на выходе ААР (ММП) при следующем ограничении:

$$\dot{\mathbf{W}}^{*T} \mathbf{1} = 1,$$

где  $\dot{\mathbf{W}}$  – комплексный весовой вектор ААР;  $\mathbf{1} = [1 \dots 1]^T$  – единичный вектор; знак \* обозначает комплексное сопряжение, знак  $T$  – транспонирование. Критерий ММП обычно реализуется в ААР из состава аппаратуры потребителей спутниковых систем радионавигации, для которых характерно отсутствие влияния полезных навигационных сигналов на процесс адаптации [3]. Указанное ограничение обеспечивает после завершения адаптации наличие усиления в направлении нормали к плоскости полотна ААР. При известной корреляционной матрице помехи  $\mathbf{R}_n$  оптимальный весовой вектор адаптации определяется соотношением [1]

$$\dot{\mathbf{W}}_{\text{опт ММП}} = \frac{1}{\mathbf{1}^T \dot{\mathbf{R}}_n^{-1} \mathbf{1}} \dot{\mathbf{R}}_n^{-1} \mathbf{1}.$$

Поскольку матрица  $\dot{\mathbf{R}}_n$  обычно неизвестна, используется ее выборочная оценка

$$\hat{\mathbf{R}}_{\text{п.выб}} = \frac{1}{K_{\text{выб}}} = \sum_{k=1}^{K_{\text{выб}}} \dot{\mathbf{Y}}(t_k) \dot{\mathbf{Y}}(t_k)^{*T},$$

где  $\dot{\mathbf{Y}}(t_k) = [\dot{y}_1(t_k) \dot{y}_2(t_k) \dots \dot{y}_N(t_k)]^T$  – вектор комплексных отсчетов процесса на выходах АЦП 1, 2, ..., N-го каналов N-канальной ААР;  $K_{\text{выб}}$  – объем выборки, используемой для формирования оценки корреляционной матрицы помехи.

Как известно [6], для двухточечного когерентного излучателя характерно наличие зависимости амплитуды  $A$  и фазы  $\varphi$  излучаемого колебания от направления излучения (амплитудно-угловой (АУЗ) и фазоугловой зависимости (ФУЗ)). Для представляющего интерес случая, когда антенными элементами двухточечного излучателя являются вертикально ориентированные вибраторы, плоскость полотна ААР и база двухточечного

излучателя принадлежат горизонтальной плоскости (плоскости азимута), обсуждаемые зависимости определяются соответственно амплитудно-угловой и фазоугловой характеристиками вида [6, 7]

$$A^{\text{АУЗ}}(\mu) = \sqrt{1 + \rho^2 + 2\rho \cos(kd \sin(\mu) + \Psi)}, \quad (1)$$

$$\varphi^{\text{ФУЗ}}(\mu) = \arctg \left[ \frac{\sin\left(\frac{kd}{2} \sin(\mu)\right) - \rho \sin\left(\frac{kd}{2} \sin(\mu) - \Psi\right)}{\cos\left(\frac{kd}{2} \sin(\mu)\right) + \rho \cos\left(\frac{kd}{2} \sin(\mu) - \Psi\right)} \right]. \quad (2)$$

Здесь  $\mu$  – угол, отсчитываемый от нормали к линии базы двухточечного излучателя ШП (совокупность ИШП1 и ИШП2), выставленной в точку П центра базы;  $\rho \leq 1$  – отношение амплитуд токов, протекающих во втором и первом вибраторах;  $\Psi$  – разность фаз токов, протекающих во втором и первом вибраторах;  $d$  – расстояние между излучателями (база двухточечного излучателя);  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  – волновое число. Вид характеристик (1) и (2) (фрагменты) при  $\lambda = 19$  см,  $\rho = 0.8$ ,  $\Psi = 0$ ,  $d = 50$  м представлен на рис. 1а,1б.

Учитывая сказанное выше, математическое описание внешней узкополосной ДКШП, действующей на ААР, может быть представлено следующим образом. Если в фазовом центре ААР (точке О) расположить антенный элемент (АЭ), аналогичный АЭ<sub>1</sub>, АЭ<sub>2</sub>, ... АЭ<sub>N</sub>, то реализация ДКШП как функция времени будет имеет вид

$$x_{\text{ШП},0}(t) = A^{\text{АУЗ}}(\mu_0) U_{\text{ШП}}(t) \cos[\omega t + \varphi_{\text{ШП}}(t) + \varphi^{\text{ФУЗ}}(\mu_0)], \quad (3)$$

где  $\mu_0$  – угол между нормалью к линии базы двухточечного излучателя, выставленной в точку П, и направлением из точки П на точку О;  $U_{\text{ШП}}(t)$  – огибающая реализации ШП в момент  $t$ , имеющая распределение вероятностей Релея

$$p_U(u) = \frac{u}{2\pi P_{\text{ШП вых АЭ}}} \exp\left(-\frac{u^2}{2P_{\text{ШП вых АЭ}}}\right); \quad (4)$$

$\varphi_{\text{ШП}}(t)$  – случайная фаза колебания ШП в момент  $t$ , распределенная равномерно на  $[0, 2\pi]$ ;  $A^{\text{АУЗ}}(\mu_0)$  – амплитудно-угловая характеристика в точке  $\mu_0$ , определяемая согласно (1);  $\varphi^{\text{ФУЗ}}(\mu_0)$  – фазовая добавка, возникающая из-за наличия фазоугловой зависимости, определяемая для направления  $\mu_0$  согласно (2);  $P_{\text{ШП вых АЭ}}$  – мощность ШП на выходе антенного элемента;  $u$  – независимая переменная. На основе выражения (3) могут быть представлены реализации ШП на выходах АЭ<sub>1</sub>, АЭ<sub>2</sub>, ... АЭ<sub>N</sub> в виде

$$x_{\text{ШП},n}(t) = A^{\text{АУЗ}}(\mu_n) U_{\text{ШП}}(t) \cos[\omega t + \varphi_{\text{ШП}}(t) + \Delta\varphi_{\text{н}0}^{\text{геом}} + \varphi^{\text{ФУЗ}}(\mu_n)],$$

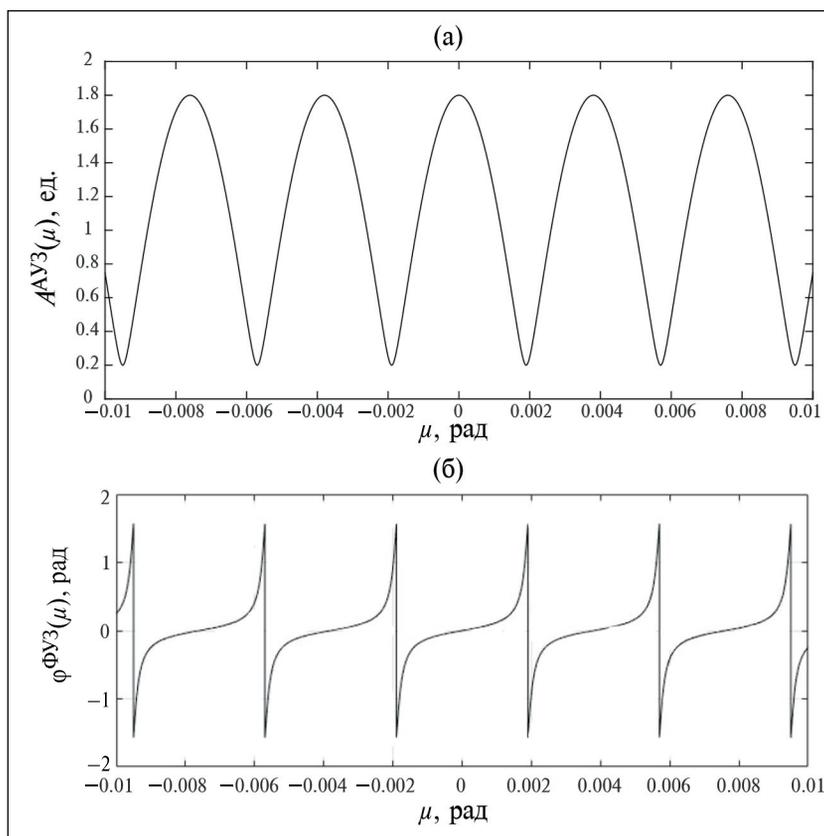


Рис. 1. Амплитудно-угловая (а) и фазоугловая (б) характеристики двухточечного излучателя.

где  $n = 1, 2, \dots, N$ ;  $\Delta\varphi_{n0}^{\text{геом}}$  – фазовая добавка, определяемая стандартным образом геометрией взаимного расположения антенных элементов, фазового центра антенны (точка О) и центра базы двухточечного излучателя (точка П);  $\mu_n$ ,  $n = 1, 2, \dots, N$  – угол в горизонтальной плоскости между нормалью к линии базы двухточечного излучателя, проведенной из точки П, и прямой, соединяющей точку П с точкой расположения АЭ $_n$ .

Кроме внешней ШП на входе каждого антенного канала (выходе соответствующего АЭ) в пределах полосы его пропускания присутствует собственный шум приемного канала – гауссовский случайный процесс с мощностью  $P_{\text{СШ вых АЭ}}$ , одинаковой для всех АЭ.

«Косинусная» (с) и «синусная» (s) составляющие реализации суммарной помехи  $\Sigma$  (ШП + собственный шум (СШ)) на выходах формирователя квадратур  $n$ -го канала ААР имеют вид

$$x_{\Sigma c, n}(t) = k_{\text{пер. ан}} \left\{ A^{\text{AY3}}(\mu_n) U_{\text{ШП}}(t) \cos[\varphi_{\text{ШП}}(t) + \Delta\varphi_{n0}^{\text{геом}} + \varphi^{\text{FY3}}(\mu_n)] + x_{\text{СШ}c, n}(t) \right\};$$

$$x_{\Sigma s, n}(t) = -k_{\text{пер. ан}} \left\{ A^{\text{AY3}}(\mu_n) U_{\text{ШП}}(t) \sin[\varphi_{\text{ШП}}(t) + \Delta\varphi_{n0}^{\text{геом}} + \varphi^{\text{FY3}}(\mu_n)] + x_{\text{СШ}s, n}(t) \right\},$$

где  $x_{\text{СШ}c, n}(t)$  и  $x_{\text{СШ}s, n}(t)$  – квадратурные составляющие собственного шума  $n$ -го приемного канала – взаимно независимые гауссовские процессы с нулевым математическим ожиданием и одинаковой дисперсией, равной  $P_{\text{СШ вых АЭ}}$ ;  $k_{\text{пер. ан}}$  – коэффициент передачи аналоговой части приемного канала, одинаковый для всех каналов ААР.

Дискретные отсчеты квадратурных составляющих суммарной помехи на выходах аналого-цифрового преобразователя  $n$ -го канала ( $n = 1, 2, \dots, N$ ) в моменты времени  $t_k$ ,  $k = 1, 2, \dots$  определяются как

$$x_{\Sigma c, n}(t) = k_{\text{пер. ан}} \left\{ A^{\text{AY3}}(\mu_n) U_{\text{ШП}}(t_k) \cos[\varphi_{\text{ШП}}(t_k) + \Delta\varphi_{n0}^{\text{геом}} + \varphi^{\text{FY3}}(\mu_n)] + x_{\text{СШ}c, n}(t_k) \right\};$$

$$x_{\Sigma s, n}(t) = -k_{\text{пер. ан}} \left\{ A^{\text{AY3}}(\mu_n) U_{\text{ШП}}(t_k) \sin[\varphi_{\text{ШП}}(t_k) + \Delta\varphi_{n0}^{\text{геом}} + \varphi^{\text{FY3}}(\mu_n)] + x_{\text{СШ}s, n}(t_k) \right\},$$

Здесь согласно (4) случайная величина  $U_{\text{ШП}}(t_k)$  имеет распределение Релея с дисперсией, равной  $P_{\text{ШП вых АЭ}}$  (мощность ШП на выходе единичного АЭ), фаза  $\varphi(t_k)$  распределена равномерно на  $[0, 2\pi]$ , а дисперсия отсчетов СШ одинакова

для всех синфазных и квадратурных каналов и равна  $P_{\text{СШ вых АЭ}}$ .

Преобразовав эти соотношения с использованием стандартной формулы для  $\cos(\sin)$  суммы, получаем

$$\begin{aligned} x_{\Sigma c,n}(t_k) &= k_{\text{пер.ан}} \left\{ A^{\text{АУЗ}}(\mu_n) U_{\text{ШПс}}(t_k) \cos \left[ \Delta\varphi_{n0}^{\text{геом}} + \varphi^{\text{ФУЗ}}(\mu_n) \right] - \right. \\ &\quad \left. - A^{\text{АУЗ}}(\mu_n) U_{\text{ШПs}}(t_k) \sin \left[ \Delta\varphi_{n0}^{\text{геом}} + \varphi^{\text{ФУЗ}}(\mu_n) \right] + x_{\text{СШс},n}(t_k) \right\}; \\ x_{\Sigma s,n}(t_k) &= -k_{\text{пер.ан}} \left\{ A^{\text{АУЗ}}(\mu_n) U_{\text{ШПs}}(t_k) \cos \left[ \Delta\varphi_{n0}^{\text{геом}} + \varphi^{\text{ФУЗ}}(\mu_n) \right] + \right. \\ &\quad \left. + A^{\text{АУЗ}}(\mu_n) U_{\text{ШПс}}(t_k) \sin \left[ \Delta\varphi_{n0}^{\text{геом}} + \varphi^{\text{ФУЗ}}(\mu_n) \right] + x_{\text{СШs},n}(t_k) \right\}; \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь

$$U_{\text{ШПс}}(t_k) = U_{\text{ШП}}(t_k) \cos[\varphi_{\text{ШП}}(t_k)];$$

$$U_{\text{ШПs}}(t_k) = U_{\text{ШП}}(t_k) \sin[\varphi_{\text{ШП}}(t_k)]$$

- квадратурные составляющие ШП – гауссовские взаимно независимые случайные величины с нулевым математическим ожиданием и одинаковой дисперсией, равной  $P_{\text{ШП вых АЭ}}$

Мощность внешней ШП на выходах антенных элементов  $P_{\text{ШП вых АЭ}}$ , одинаковая для всех АЭ, определяется соотношением

$$P_{\text{ШП вых АЭ}} = \frac{P_{\text{ПШП}} G_{\text{ПШП}}^{\text{АЭ}} G_{\text{АЭ}}^{\text{ПШП}} \lambda^2 \gamma_{\text{АЭ}}^{\text{ПШП}}}{16\pi^2 r_{\text{ПШП}}^2 K_{\text{ШП}f}},$$

где  $P_{\text{ПШП}}$  – мощность постановщика ШП (ПШП);  $G_{\text{ПШП}}^{\text{АЭ}}$  – усиление антенны ПШП в направлении АЭ;  $G_{\text{АЭ}}^{\text{ПШП}}$  – усиление АЭ в направлении ПШП;  $\lambda$  – длина волны излучения постановщика ШП;  $\gamma_{\text{АЭ}}^{\text{ПШП}}$  – коэффициент, учитывающий рассогласование поляризации антенны ПШП и АЭ;  $r_{\text{ПШП}}^{\text{АЭ}}$  – расстояние между АЭ и ПШП;  $K_{\text{ШП}f} = \frac{\Delta f_{\text{ШП}}}{\Delta f_{\text{пр}}}$  – относительная ширина спектра ШП (параметр прицельности ШП по частоте);  $\Delta f_{\text{ШП}}$  – ширина спектра ШП;  $\Delta f_{\text{пр}}$  – полоса пропускания приемного канала АЭ.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Приведенное выше математическое описание использовано в компьютерной имитационной модели сценария воздействия ДКШП на ААР. Эксперименты, выполненные на этой модели, имели целью сравнение помехозащитной эффективности

ААР при действии на нее двухточечных некогерентной и когерентной ШП (ДНШП и ДКШП соответственно). Количественным показателем помехозащитной эффективности ААР является коэффициент ослабления ШП по мощности на выходе ААР по сравнению с выходом АЭ, определяемый как

$$K_{\text{осл ШП}} = \frac{P_{\text{ШП вых АЭ}}}{P_{\text{ШП вых ААР}}},$$

где  $P_{\text{ШП вых АЭ}}$  – мощность ШП на выходе антенного элемента;  $P_{\text{ШП вых ААР}}$  – мощность ШП на выходе ААР.

Результаты экспериментов получены при следующих исходных данных:

- рабочая длина волны  $\lambda = 19$  см;
- ААР плоская четырехэлементная, антенные элементы АЭ<sub>1</sub>, АЭ<sub>2</sub>, АЭ<sub>3</sub>, АЭ<sub>4</sub> типа «антенна на корпусе» [5] расположены в вершинах квадрата со стороной  $\lambda/2$ , полотно ААР ориентировано горизонтально, фокусировка в зенит;
- антенны излучателей ИШП<sub>1</sub> и ИШП<sub>2</sub> – вертикально ориентированные полуволновые вибраторы, расположенные в горизонтальной плоскости, совпадающей с плоскостью полотна ААР, мощность каждого излучателя ШП  $P_{\text{ПШП}} = 20$  дБВт ( $\rho = 1$ ), разность фаз токов в вибраторах двухточечного излучателя  $\Psi = 0$ , коэффициент усиления вибратора в направлении ААР  $G_{\text{ИШП}}^{\text{ААР}} = 2.8$ ;
- параметр прицельности ШП по частоте  $K_{\text{ШП}f} = 1$ ;
- объем выборки наблюдаемого процесса для формирования оценки корреляционной матрицы ШП  $K_{\text{выб}} = 20$  отсчетов;
- рассогласование поляризации ААР и излучателями ШП отсутствует ( $\gamma_{\text{АЭ}}^{\text{ПШП}} = 1$ );
- степень неидентичности (разброс) АЧХ и ФЧХ приемных каналов ААР соответственно 0.2 дБ и 1 нс (среднеквадратические значения).

Взаимное расположение и ориентация излучателей ДКШП и антенных элементов ААР, принятые в эксперименте, представлены на рис. 2.

Углы  $\mu_n$ ,  $n = 1, 2, 3, 4$ , используемые при формировании отсчетов входного процесса согласно (1), (2), (5), определяются для конфигурации, соответствующей рис. 3, соотношением

$$\mu_n \approx l_n / r_0 + \alpha_B,$$

в котором

$$l_n = \frac{\sqrt{2}}{2} d \sin \left[ (n-1) \frac{\pi}{2} + \alpha_{\text{ААР}} \right]$$

- проекция отрезка  $OA_n$  на прямую, проходящую через точку  $O$  перпендикулярно линии ПО.

На рис. 3 представлены полученные по результатам модельного эксперимента зависимости величины  $K_{\text{осл ШП}}$  от расстояния  $r_0$  между центрами базы двухточечного излучателя ШП и полотна ААР при различной длине  $d$  базы. Графики получены усреднением по результатам 10 экспериментов, проведенных при различных реализациях входного процесса.

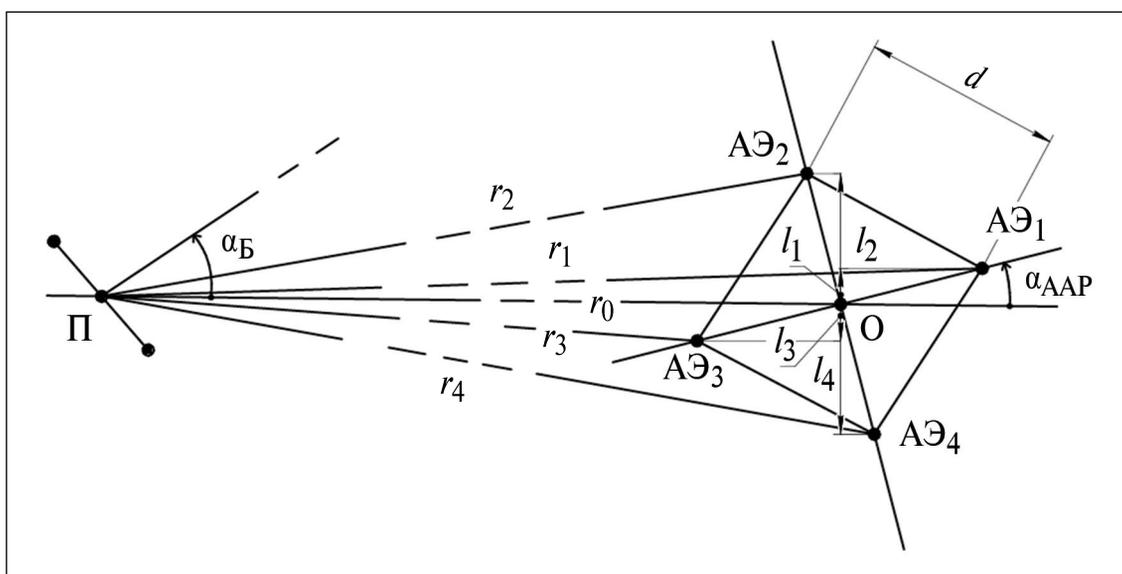
Анализ графиков рис. 3 показывает, что при длине базы  $d = 350$  и  $1000$  м имеет место значительная разница в уровнях ослабления ДНШП и ДКШП по итогам адаптации ААР. Двухточечная когерентная ШП ослабляется в значительно меньшей степени. Однако разница уровней  $K_{\text{осл ШП}}$  уменьшается при увеличении расстояния между

излучателем ШП и ААР. При малых расстояниях (сравнимых с длиной базы излучателя) разница достигает (30 ...40) дБ, а при расстояниях примерно 12 км (при длине базы 350 м) и 15 км (длина базы 1000 м) уменьшается до нуля. Наличие указанной разницы в уровнях  $K_{\text{осл ШП}}$  объясняется тем, что в случае ДКШП “провал” ДН ААР, формируемый по результатам адаптации, ориентируется в направлении центра базы парного излучателя. В случае ДНШП ААР формирует два провала, ориентированные на первый и второй излучатели ШП. Сказанное подтверждается рис. 4, где представлены сечения ДН, сформированной по итогам адаптации ААР, горизонтальной плоскостью.

В явном виде зависимость величины  $K_{\text{осл ШП}}$  от величины  $d$  базы двухточечного излучателя при расстоянии  $r_0 = 50$  км представлена на рис. 5. Из рисунка видно, что разница в величине  $K_{\text{осл ШП}}$  для случаев ДНШП и ДКШП появляется начиная с  $d \approx 12$  км и увеличивается примерно до 15 дБ при  $r_0 = 50$  км.

На рис. 6 представлены графики зависимости величины  $K_{\text{осл ШП}}$  от соотношения мощностей излучателей, образующих двухточечный излучатель ШП (излучатель 1 (ИШП<sub>1</sub>) и излучатель 2 (ИШП<sub>2</sub>)). В эксперименте принято: расстояние  $r_0$  между излучателем ШП и ААР 3 км, длина базы двухточечного излучателя 1 км, мощность первого излучателя 20 дБВт, мощность второго излучателя изменяется от -10 дБВт до 40 дБВт.

Как видно из рисунков, при одинаковых значениях мощности первого и второго излучателей (по



**Рис. 2.** Взаимное расположение и ориентация базы Б излучателя двухточечной ШП и элементов ААР:  $\alpha_B$  и  $\alpha_{\text{ААР}}$  – углы, определяющие ориентацию базы двухточечного излучателя ШП и полотна ААР относительно прямой, проходящей через точки П и О;  $r_0$  – расстояние между точками П и О;  $r_n$  – расстояние между точками П и  $AЭ_n$ ,  $n = 1...4$ ;  $d$  – длина стороны квадратного полотна ААР.

условиям эксперимента равных 20 дБВт) величины  $K_{\text{осл ШП}}$  для обоих излучателей ШП одинаковы, при этом разница в ослаблении ДНШП и ДКШП составляет около 28 дБ. При уменьшении или увеличении мощности ИШП<sub>2</sub> относительно ИШП<sub>1</sub> происходит существенное изменение величины  $K_{\text{осл ШП}}$  как для ДНШП, так и для ДКШП. Изменение происходит в направлении увеличения ослабления ШП для более мощного излучателя и уменьшения ослабления для излучателя с меньшей мощностью. Следует отметить, что при любом соотношении мощностей разница в ослаблении ДНШП и ДКШП по-прежнему имеет место, ее

величина максимальна при равенстве мощностей ИШП<sub>1</sub> и ИШП<sub>2</sub> и уменьшается с ростом различия мощностей.

Важным параметром рассматриваемой задачи является угол  $\alpha_B$  между линией, перпендикулярной линии базы двухточечного излучателя, и прямой, соединяющей точки центра базы и центра полотна ААР (см. рис. 3). Результаты всех экспериментов, описанные выше, получены при  $\alpha_B = 0$ , при этом расстояния от первого и второго излучателей ШП до центра полотна ААР (точка  $O$ ) одинаковы, следовательно, одинаковы и соответствующие набеги фаз антенных элементах ААР. Вместе

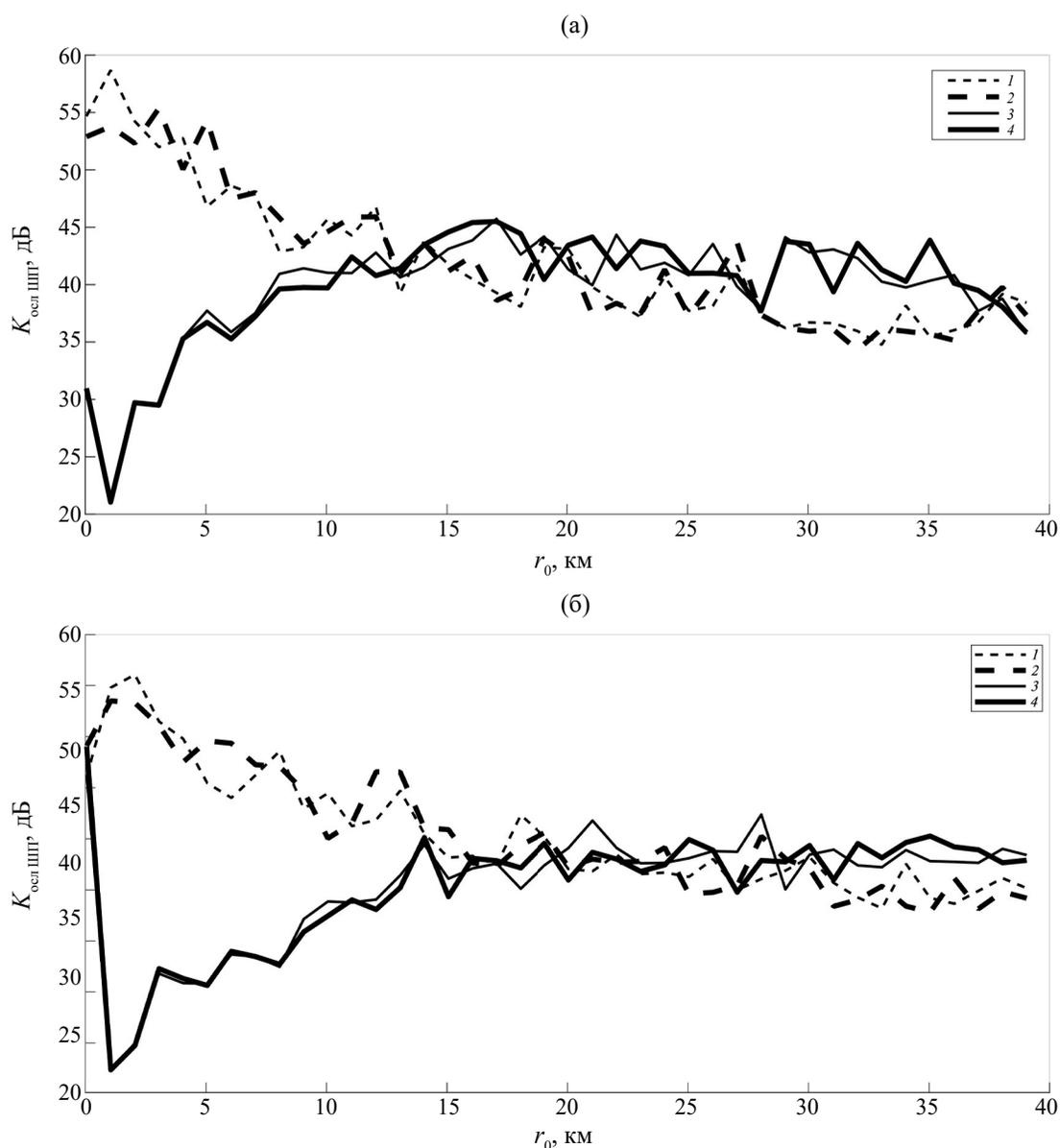
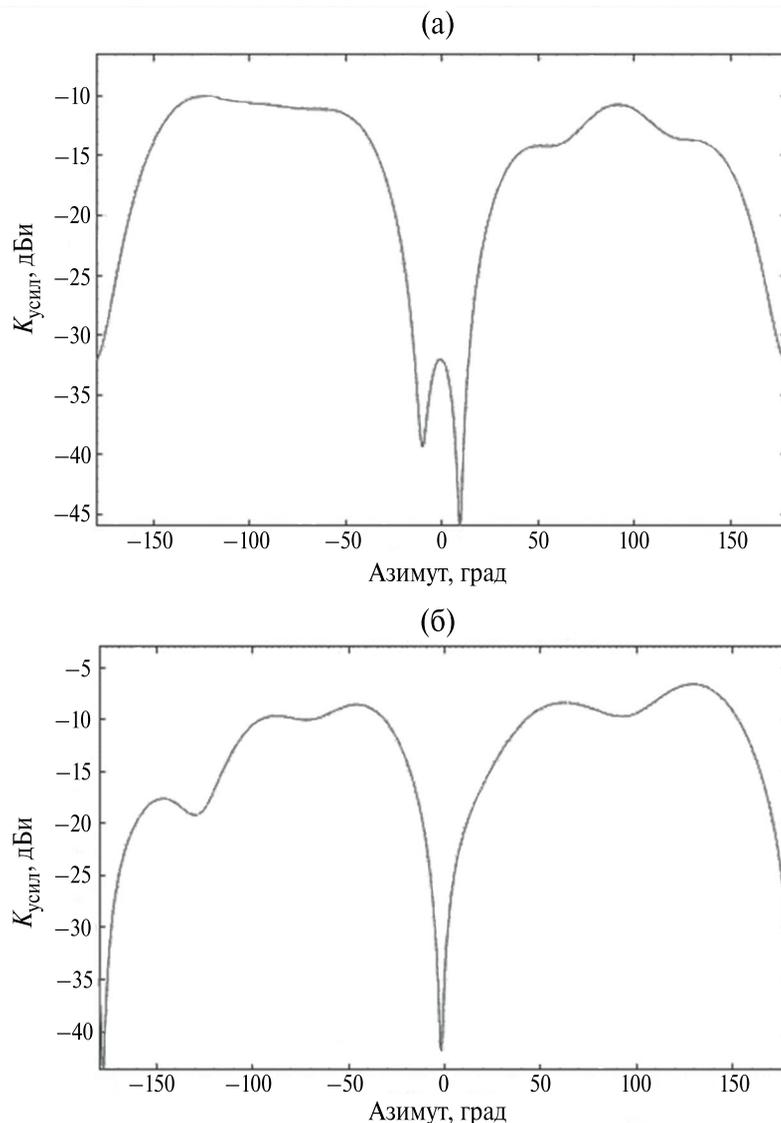


Рис. 3. Зависимость  $K_{\text{осл ШП}}$  от расстояния  $r_0$  при длине базы  $d = 350$  м (а) и 1000 м (б) для случаев ДНШП (кривая 1 – ИШП<sub>1</sub>, кривая 2 – ИШП<sub>2</sub>) и ДКШП (кривая 3 – ИШП<sub>1</sub>, кривая 4 – ИШП<sub>2</sub>).



**Рис. 4.** Сечения ДН ААР, сформированной по итогам адаптации, горизонтальной плоскостью для случаев ДНШП (а) и ДКШП (б): направления на ИШП<sub>1</sub> и ИШП<sub>2</sub> равны  $-9.4623$  и  $9.4623$  град соответственно,  $r_0 = 3$  км,  $d = 1$  км.

с тем, поскольку при  $\alpha_B \neq 0$  фазовые набегии неодинаковы, от величины этого угла неизбежно зависят результаты воздействия ДКШП на ААР. Результаты экспериментальной оценки этой зависимости представлены на рис. 7. В эксперименте угол  $\alpha_B$  варьировался от  $-10^\circ$  до  $+10^\circ$ , расстояние между двухточечным излучателем ШП и ААР 3 км. База двухточечного излучателя ШП  $d = 100$  и 200 м.

В целях отдельного изучения влияния различных факторов на функционирование ААР в данном эксперименте не учитывалось действие характерного для двухточечного когерентного излучателя фактора амплитудно-угловой и фазоугловой зависимости.

Это означает, что в модельном соотношении (5) предполагалось  $A^{(\text{АУЗ})}(\mu_n) = 1$ ,  $\varphi^{\text{ФУЗ}}(\mu_n) = 0$ .

Анализ представленных на рис. 7 графиков показывает, что различие в уровнях  $K_{\text{осл ШП}}$  для ДНШП и ДКШП имеет место только в пределах относительно небольшого диапазона углов  $\alpha_B$ , центр которого совпадает с точкой  $\alpha_B = 0^\circ$  (линия базы перпендикулярна линии визирования точки О из точки П). Ширина этого диапазона уменьшается при увеличении длины  $d$  базы двухточечного излучателя ШП и в данном эксперименте составила ориентировочно:  $10^\circ$  ( $d = 100$  м) и  $6^\circ$  ( $d = 200$  м). Причина заключается в том, что за пределами указанного диапазона разность хода волн от ИШП<sub>1</sub> и ИШП<sub>2</sub>

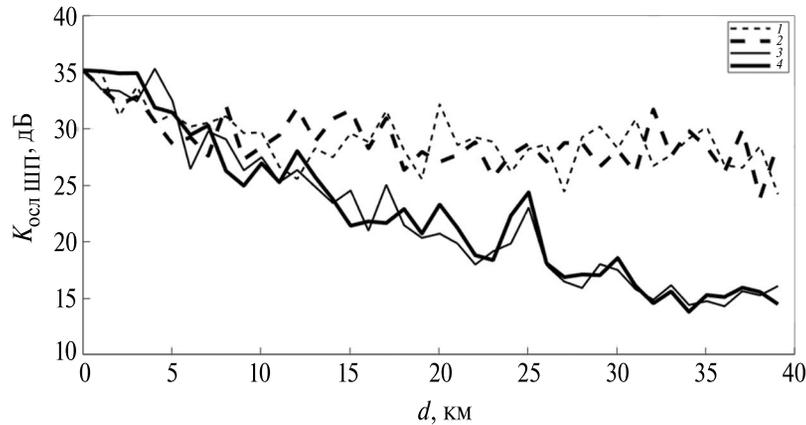


Рис. 5. Зависимость  $K_{\text{осл ШП}}$  от длины базы двухточечного излучателя  $d$  при расстоянии  $r_0 = 50$  км для случаев ДНШП (кривая 1 – ИШП<sub>1</sub>, кривая 2 – ИШП<sub>2</sub>) и ДКШП (кривая 3 – ИШП<sub>1</sub>, кривая 4 – ИШП<sub>2</sub>).

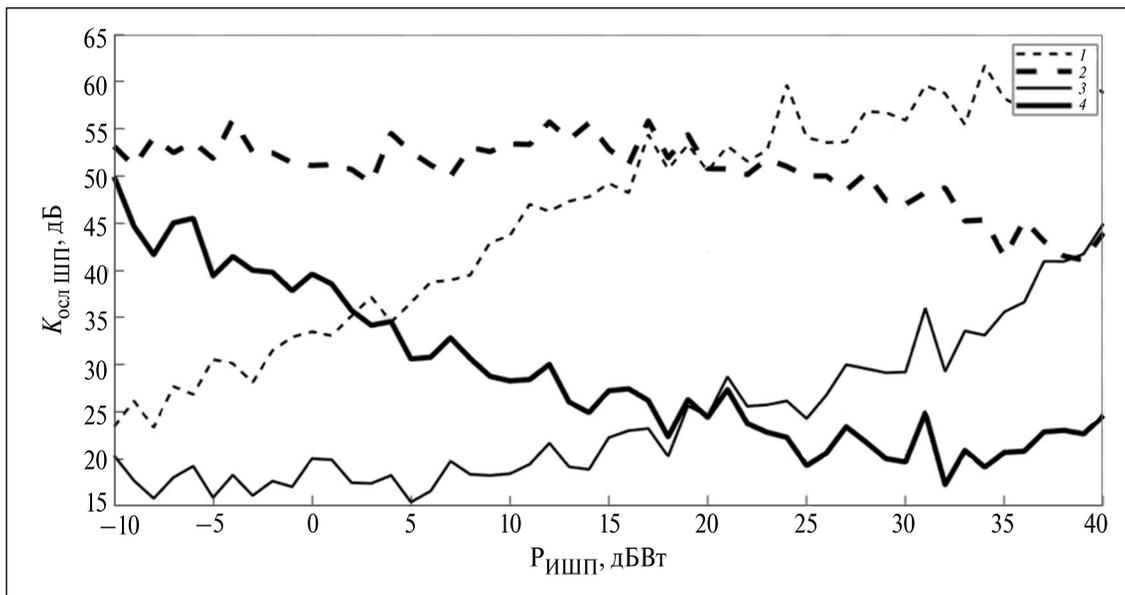


Рис. 6. Зависимость  $K_{\text{осл ШП}}$  от мощности ИШП при длине базы  $d = 1$  км и расстоянии  $r_0 = 3$  км для случаев ДНШП (кривая 1 – ИШП<sub>1</sub>, кривая 2 – ИШП<sub>2</sub>) и ДКШП (кривая 3 – ИШП<sub>1</sub>, кривая 4 – ИШП<sub>2</sub>).

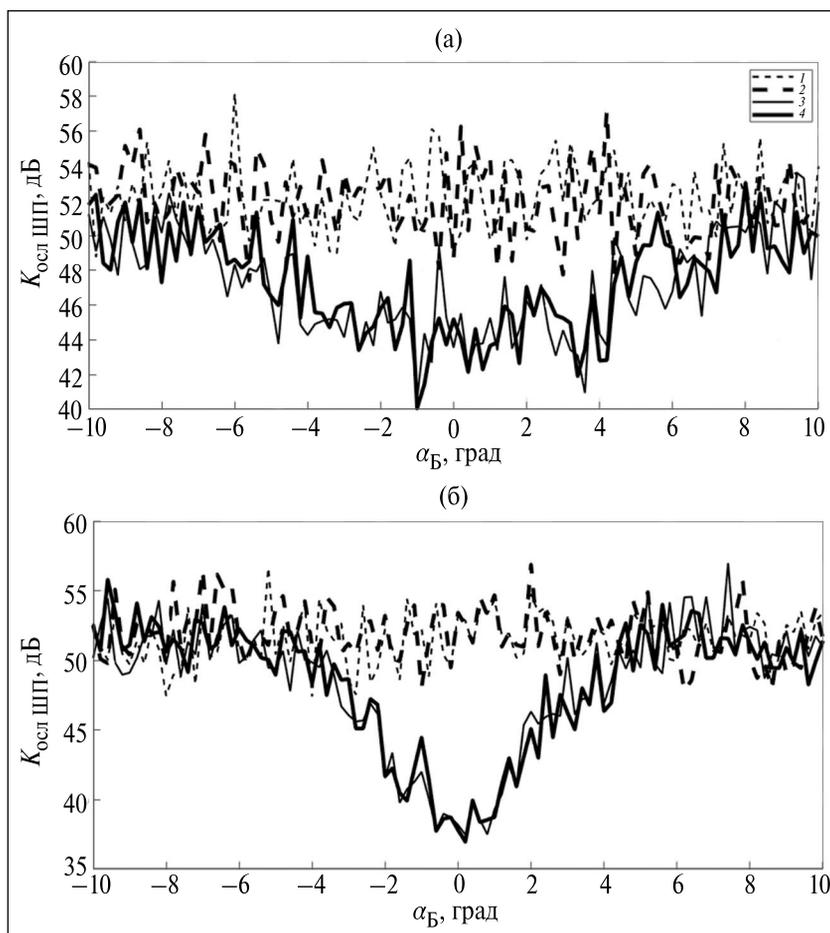
до центра полотна ААР (до точки О) превышает пространственный интервал взаимной когерентности излучателей, вследствие чего ААР воспринимает их как взаимно некогерентные. Величина интервала взаимной когерентности, зависит от параметров автокорреляционной функции ШП, в частности, от ширины зоны высокой корреляции.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного исследования указывают на наличие существенной разницы помехозащитного эффекта, обеспечиваемого адаптивной антенной решеткой в условиях действия на нее

двухточечных взаимно некогерентных и когерентных шумовых помех. Ослабление ШП на выходе ААР в случае ДКШП оказывается на значительно меньшем уровне, чем в случае ДНШП. Разница в уровнях коэффициента ослабления ШП зависит от длины базы двухточечного излучателя, расстояния между центрами базы излучателя и полотна ААР, соотношения мощностей излучателей ШП, а также от угла ориентации базы двухточечного излучателя относительно полотна ААР.

Показано, что при названных выше условиях значения разницы уровней коэффициента ослабления ДНШП и ДКШП могут достигать десятков децибелл, что обуславливает интерес к использованию



**Рис. 7.** Зависимость  $K_{\text{осл ШП}}$  от угла  $\alpha_B$  ориентации базы двухточечного излучателя при расстоянии  $r_0 = 3$  км и длине базы  $d = 100$  (а) и  $200$  м (б) для случаев ДНШП (кривая 1 – ИШП<sub>1</sub>, кривая 2 – ИШП<sub>2</sub>) и ДКШП (кривая 3 – ИШП<sub>1</sub>, кривая 4 – ИШП<sub>2</sub>).

ДКШП средствами радиоподавления в интересах снижения помехозащитной эффективности ААР.

Вместе с тем отмечено существенное влияние угла ориентации базы двухточечного излучателя относительно полотна ААР на уровни коэффициента ослабления ШП. Изучение вопросов, связанных с ослаблением этого влияния, а также с оценкой влияния характерной для двухточечных когерентных излучателей амплитудно-угловой и фазоугловой зависимости, представляет значительный интерес.

Авторы данной работы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Van Trees H. Optimum Array Processing. N.Y.: Wiley-Intersci., 2002.
2. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию / Пер с англ. М.: Радио и связь, 1986.
3. Глонасс. Принципы построения и функционирования. 3-е изд. М.: Радиотехника, 2005.
4. Харисов В.Н., Ефименко В.С., Оганесян А.А. и др. // Радиотехника. 2013. № 7. С. 132.
5. Вейцель А.В., Вейцель В.А., Татарников Д.В. Аппаратура высокоточного позиционирования по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем: высокоточные антенны. Специальные методы повышения точности позиционирования / Под ред. М.И. Жодзишского. М.: МАИ-ПРИНТ, 2011.
6. Марков Г.Т., Сазонов Д.М. Антенны: учебник для студентов радиотехнических специальностей вузов. 2-е изд. М.: Энергия, 1975.
7. Юдин В.Н., Волков А.М. // Электросвязь. 2020. № 12. С. 50.

# EVALUATION OF THE INTERFERENCE PROTECTION EFFICIENCY OF AN ADAPTIVE ANTENNA ARRAY UNDER THE ACTION OF TWO-POINT COHERENT INTERFERENCE

**V. N. Yudin<sup>a</sup>, D. A. Savchenko<sup>b,\*</sup>**

<sup>a</sup>*Moscow Aviation Institute (National Research University),  
Volokolamskoye Highway, 4, Moscow, 125993 Russia*

<sup>b</sup>*JS «Aeropribor-Voshod»,  
str. Tkatskaya, 19, Moscow, 105318 Russia*

*\*E-mail: danil.svch@yandex.ru*

Received March 27, 2024, revised March 27, 2024, accepted April 24, 2024

The noise immunity of the adaptive antenna array (AAA) under the action of two-point incoherent and coherent noise interference (NI) was compared by the value of the interference reduction factor. On the example of navigation AAA it is shown that the attenuation levels of two-point coherent noise interference by the results of AAA adaptation are much lower than incoherent noise interference.

*Keywords:* adaptive antenna array, interference reduction factor, two-point coherent interference