

УДК 621. 396. 679. 4 01

**Результаты оценки эффективности многолучевых  
самофокусирующихся адаптивных антенных решеток  
радиоэлектронных систем**

**Арнольдова Е.А.\*, Балалаев А.Ю.\*\*, Зайцев А.Г.\*\*\***

*Радиотехнические и информационные системы воздушно-космической обороны,  
ул. Зинаиды Коноплянниковой, 89, корп. 1, Тверь, 170041, Россия*

*\*e-mail: [katj\\_000@mail.ru](mailto:katj_000@mail.ru)*

*\*\*e-mail: [artem6993@gmail.com](mailto:artem6993@gmail.com)*

*\*\*\*e-mail: [sev.krym@gmail.com](mailto:sev.krym@gmail.com)*

**Аннотация**

Представлены результаты численного моделирования оценки флуктуационной составляющей вектора параметров многолучевых самофокусирующихся адаптивных антенных решеток (МЛ СФААР) в установившемся режиме, включая оценки эффективности информационных радиоэлектронных систем с МЛ СФААР по обнаружению сигналов источников излучения (ИИ) имеющих перекрывающиеся энергетические спектры.

**Ключевые слова:** многолучевая самофокусирующаяся адаптивная антенная решетка, обнаружение сигнала, взаимные помехи.

## Введение

Одной из проблем информационного обеспечения радиолокационных комплексов (РЛК) с распределенной пространственной структурой, является поиск сигналов источников излучений (ИИ) [1], когда в наблюдаемой выборке  $Y^k$  сигнала, регистрируемой приемным каналом информационной радиоэлектронной системы/средства (РЭС) присутствуют сигналы ИИ, имеющие перекрывающиеся энергетические спектры. Это обстоятельство приводит к снижению эффективности поиска ИИ по показателю "вероятность правильного обнаружения" за счет снижения отношения сигнал/помеха+шум (ОСПШ) в отчетах решающей статистики канала обнаружения информационной РЭС [2, 3]. Решение указанной проблемы возможно при использовании отдельных оценок амплитудно-фазового распределения (АФР), получаемых по результатам адаптации многолучевых самофокусирующихся адаптивных антенных решеток (МЛ СФААР) при обнаружении сигналов ИИ [4].

Особенностью рассматриваемых МЛ СФААР, является взаимосвязанность их контуров самонастройки. Применение существующих методов анализа многомерных динамических систем [5] не позволяет отдельно оценить флуктуационную составляющую ошибки в каждом из формируемых АФР. В связи с этим интерес представляет получение оценок эффективности информационных РЭС, имеющих в своем составе МЛ СФААР, с учетом флуктуационной составляющей ошибки измерения АФР каждого из ИИ.

Целью настоящей статьи является оценка эффективности МЛ СФААР информационных РЭС используя методику [6].

### Алгоритм адаптации МЛ СФААР

Моделируется ситуация поиска сигналов  $M$  пространственно-сосредоточенных ИИ, находящихся в зоне контроля информационной РЭС пространственно-распределенного РЛК. Сигналы ИИ имеют перекрывающиеся энергетические спектры и регистрируются  $N$  элементной антенной решеткой (АР) в присутствии пространственно-некоррелированного фонового излучения:

$$\mathbf{Y}^k = \mathbf{S}^k + \mathbf{h}^k, \quad (1)$$

где  $\mathbf{h}^k = \left\| h_n^k \right\|_{n=1}^N$  – вектор пространственно-некоррелированного фонового излучения;

$\mathbf{S}^k = \left\| \sum_{m=1}^M A_m(k) \exp \left[ j \left( \omega_m k + \omega_m^D(k) + (n-1) \varphi_m \right) \right] \right\|_{n=1}^N$  – вектор сигналов ИИ;  $A_m$ ,  $\omega_m$ ,  $\omega_m^D$

,  $\varphi_m = 2\pi d \sin(\theta_m) / \lambda_m$  – амплитуда, круговая частота, закон модуляции и поэлементный набег фазы  $m$ -го ИИ;  $\lambda_m$  – длина волны излучения сигнала  $m$ -го РЭС;  $\theta_m$  – угол отклонения от нормали к ФАР  $m$ -го ИИ;  $d$  – межэлементное

расстояние АР;  $\mathbf{Y}^k = \left\| y_n(k) \right\|_{n=1}^N$  – вектор входного сигнала регистрируемый АР информационной РЭС в  $k$ -й момент времени.

Алгоритмы адаптации МЛ СФААР информационной РЭС соответствует системе разностных уравнений:

$$\hat{\mathbf{V}}(k) = \hat{\mathbf{V}}(k, k-1) + \hat{\mathbf{K}}^V(k) \frac{\partial}{\partial \mathbf{V}} \mathbf{S}^+ \left[ (k, k-1), \mathbf{V} \right] \Big|_{\mathbf{V}=\hat{\mathbf{V}}(k, k-1)} \mathbf{R}_h^{-1} \cdot$$

$$\cdot \left[ \mathbf{Y}(k) - \mathbf{S} \left[ (k, k-1), \mathbf{V} \right] \Big|_{\mathbf{V}=\hat{\mathbf{V}}(k, k-1)} \right]; \quad (2)$$

$$\hat{\mathbf{V}}(k, k-1) = \mathbf{A} \hat{\mathbf{V}}(k-1); \quad (3)$$

$$\left[\hat{\mathbf{K}}^{\mathbf{v}}(k)\right]^{-1} = \left[\hat{\mathbf{K}}^{\mathbf{v}}(k, k-1)\right]^{-1} + \frac{\partial}{\partial \mathbf{V}} \mathbf{S}^+ \left[ (k, k-1), \mathbf{V} \right] \Big|_{\mathbf{V}=\hat{\mathbf{v}}(k, k-1)}.$$

$$\cdot \mathbf{R}_h^{-1} \frac{\partial}{\partial \mathbf{V}} \mathbf{S} \left[ (k, k-1), \mathbf{V} \right] \Big|_{\mathbf{V}=\hat{\mathbf{v}}(k, k-1)}; \quad (4)$$

$$\hat{\mathbf{K}}^{\mathbf{v}}(k, k-1) = \mathbf{A} \hat{\mathbf{K}}^{\mathbf{v}}(k-1) \mathbf{A}^+ + \mathbf{R}_v^n, \quad (5)$$

где  $\hat{\mathbf{V}}(k)$ ,  $\hat{\mathbf{V}}(k, k-1)$  – текущая и экстраполированная оценка вектора параметров (ВП)  $\mathbf{V} = \left\| v_m \right\|_{m=1}^{2M}$  МЛ СФААР, в котором  $v_m$ ,  $m = \overline{1, M}$  определяют междуканальный фазовый набег сигнала  $m$ -го ИИ, а  $v_m$ ,  $m = \overline{M+1, 2M}$  – его комплексную амплитуду на опорном элементе АР [4];  $\hat{\mathbf{K}}^{\mathbf{v}}(k)$ ,  $\hat{\mathbf{K}}^{\mathbf{v}}(k, k-1)$  – матрицы дисперсии ошибок фильтрации и экстраполяции соответственно;  $\mathbf{R}_h$ ,  $\mathbf{R}_v^n$  – корреляционные матрицы (КМ) шумов наблюдения и измерения.

### **Результаты оценки флуктуационной составляющей ошибки измерения вектора параметров МЛ СФААР**

Установившееся значение ВП МЛ СФААР содержит флуктуационную ошибку отработки задающего воздействия. Оценка ее значений выполнялась с использованием методики [6]. Задающее воздействие аппроксимировалось марковским экспоненциально коррелированным случайным процессом. Анализировалась суммарная флуктуационная составляющая  $2\sigma_\Sigma^2 = Sp(\Sigma_v^2)$ , где  $\Sigma_v^2$  – матрица дисперсий, в оценках компонент ВП МЛ СФААР для значений интервалов времени  $k \square k_a$ , где  $k_a$  – время адаптации МЛ СФААР:

$$2\sigma_\Sigma^2 = \sum_{m=1}^{2M} \frac{4\sigma_{v_m}^2}{1 + \sqrt{1 + \lambda_{\mathbf{D}m} \gamma_m}},$$

где  $2\sigma_{v_m}^2$  - средняя мощность задающего воздействия  $m$ -го контура самонастройки МЛ СФААР;  $\lambda_{\mathbf{D}_m}$  -  $m$ -е собственное значение матрицы крутизны  $\mathbf{K}_{\mathbf{D}}^{\Lambda}$  дискриминатора ВП МЛ СФААР;  $\gamma_m = \frac{S_{v_m}}{S_{h_m}}$  - отношение спектральной плотности мощности задающего к спектральной плотности мощности возмущающего воздействия  $m$ -го контура самонастройки МЛ СФААР.

На рисунке 1 представлены результаты исследования значения нормированной суммарной флуктуационной составляющей в оценках компонент ВП МЛ СФААР при изменении угловых расстояний между ИИ. Моделировалась трехцелевая ситуация ( $M=3$ ) приема эквидистантной АР сигналов равных мощностей ( $2\sigma_{ci}^2 = 2\sigma_c^2$ ,  $i = \overline{1,3}$ ), когда два ИИ располагались под углами  $\theta_2 = 15^\circ$ ,  $\theta_3 = 25^\circ$  (рисунок 1а) и  $\theta_2 = 15^\circ$ ,  $\theta_3 = 40^\circ$  (рисунок 1б) относительно нормали к АР, а первый - последовательно перемещался по направлению ко второму ИИ. Количество элементов в АР последовательно полагалось равным  $N=20, 40, 60$ . Энергетические спектры сигналов моделируемых ИИ выбирались эквивалентными ( $f_{0i} = f_0$ ,  $\Delta f_{0i} = \Delta f_0$ ,  $i = \overline{1,3}$ ).

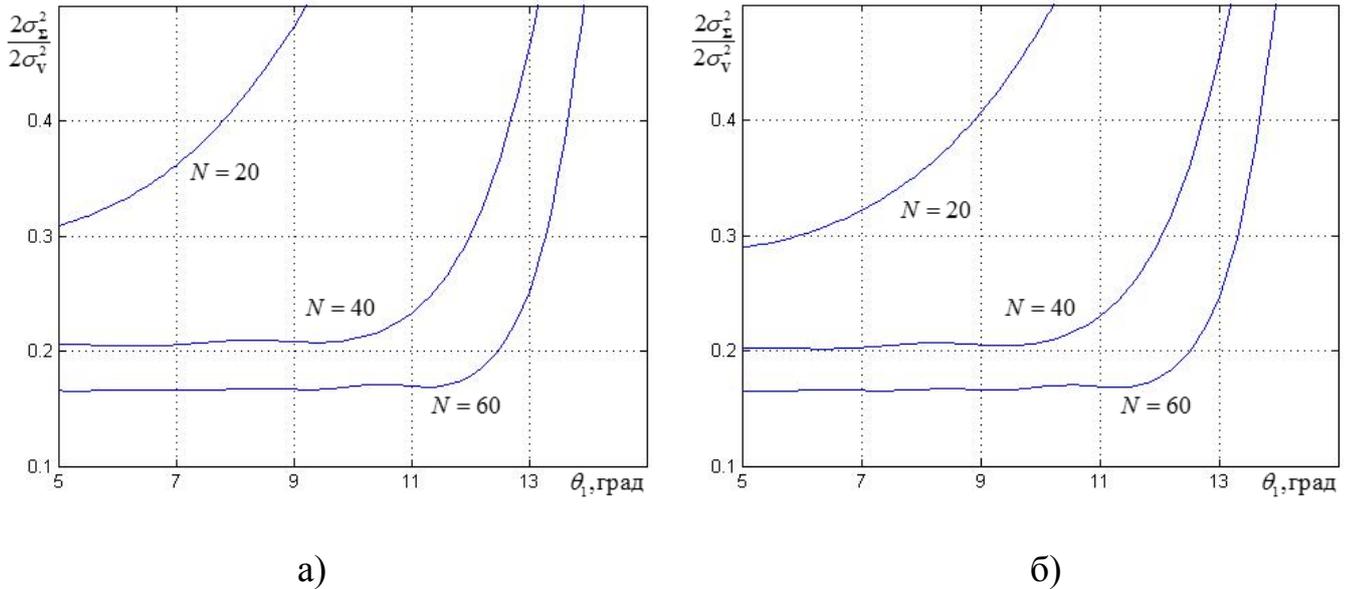


Рисунок 1. Результаты оценки флуктуационной составляющей ВП МЛ СФААР.

ИИ располагались под углами а)  $\theta_2 = 15^\circ$ ,  $\theta_3 = 25^\circ$ ; б)  $\theta_2 = 15^\circ$ ,  $\theta_3 = 40^\circ$

На рисунке 2 представлены результаты, полученные для различных значений времени корреляции задающего воздействия, когда отношение ширины энергетического спектра помехового воздействия  $\Delta f_{hm}$ ,  $m = \overline{1, M}$  к эквивалентной полосе пропускания замкнутого контура самонастройки МЛ СФААР  $\Delta f_{0V_m}$ ,  $m = \overline{1, M}$ , определяемая временем корреляции задающего воздействия, составляло  $\frac{\Delta f_{h1}}{\Delta f_{0V1}} = 3\text{дБ}$ ;

$\frac{\Delta f_{h2}}{\Delta f_{0V2}} = 5\text{дБ}$ ;  $\frac{\Delta f_{h3}}{\Delta f_{0V3}} = 6\text{дБ}$  (рисунок 2а), и  $\frac{\Delta f_{h1}}{\Delta f_{0V1}} = 3\text{дБ}$ ;  $\frac{\Delta f_{h2}}{\Delta f_{0V2}} = 8\text{дБ}$ ;  $\frac{\Delta f_{h3}}{\Delta f_{0V3}} = 8\text{дБ}$  (рисунок

2б). Моделировалась ситуация соответствующая приему сигналов равных мощностей с эквивалентными энергетическими спектрами, когда второй и третий ИИ располагались под углами  $\theta_2 = 15^\circ$ ,  $\theta_3 = 40^\circ$  относительно нормали к АР, первый ИИ последовательно перемещался по направлению ко второму.

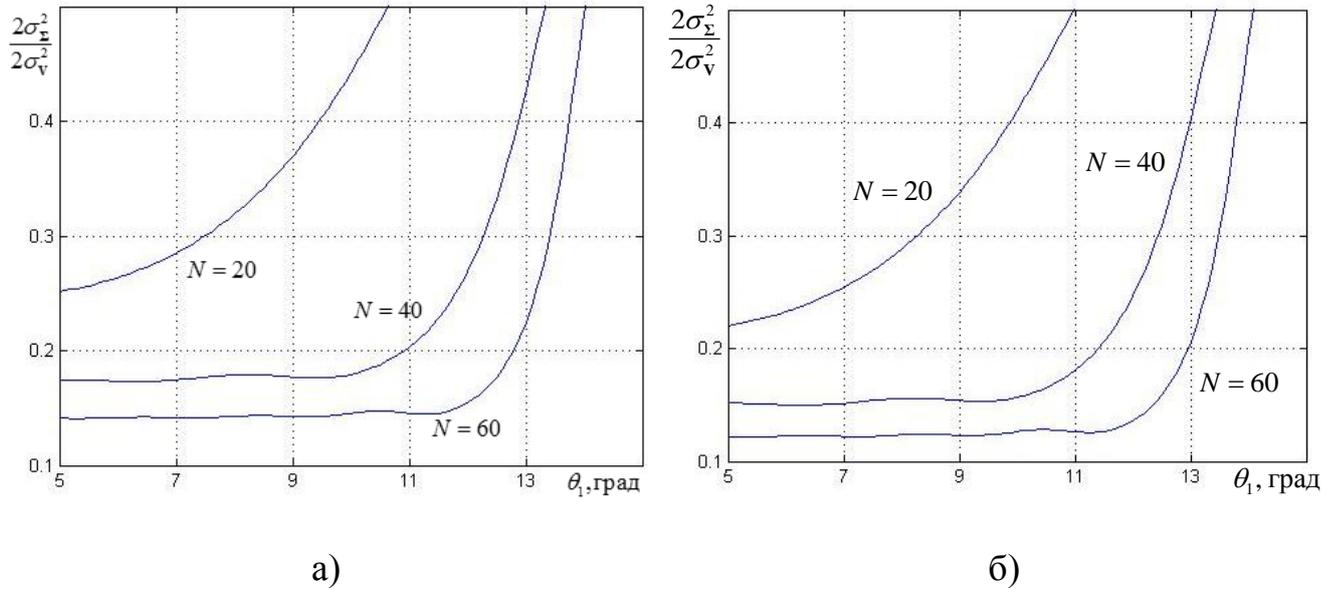


Рисунок 2. Результаты оценки флуктуационной составляющей ВП МЛ СФААР.

$$\text{а) } \frac{\Delta f_{h1}}{\Delta f_{0V1}} = 3 \text{ дБ}; \frac{\Delta f_{h2}}{\Delta f_{0V2}} = 5 \text{ дБ}; \frac{\Delta f_{h3}}{\Delta f_{0V3}} = 6 \text{ дБ}; \quad \text{б) } \frac{\Delta f_{h1}}{\Delta f_{0V1}} = 3 \text{ дБ}; \frac{\Delta f_{h2}}{\Delta f_{0V2}} = 8 \text{ дБ}; \frac{\Delta f_{h3}}{\Delta f_{0V3}} = 8 \text{ дБ}$$

Как следует из представленных результатов, рассовмещение ИИ на угловые расстояния, значения которых превышают ширину диаграммы направленности АР не приводит к росту флуктуационной составляющей в оценках ВП МЛ СФААР. Попытка получить оценки АФР сигналов, ИИ которых находятся в ширине ДН АР приводит к ее резкому росту. Увеличение эквивалентной полосы пропускания замкнутого контура самонастройки МЛ СФААР влечет снижение крутизны его дискриминационной характеристики и, как следствие, рост флуктуационной ошибки в оценках ВП МЛ СФААР.

## Результаты оценки эффективности поиска сигналов информационными РЭС с МЛ СФААР

Эффективность поиска сигналов ИИ информационными РЭС с МЛ СФААР оценивалась по показателю  $D$  – "вероятность правильного обнаружения сигнала". Решение о наличии сигнала  $m$ -го ИИ принимается в соответствии с правилом [7]:

$$\left(\mathbf{Y}^k\right)^+ \left( \left(\hat{\mathbf{R}}_n^k\right)^{-1} - \left(\hat{\mathbf{R}}^k\right)^{-1} \right) \mathbf{Y}^k \geq h' \left(\mathbf{Y}^k\right)^+ \left(\hat{\mathbf{R}}_n^k\right)^{-1} \mathbf{Y}^k, \quad (6)$$

где  $\hat{\mathbf{R}}^k$ ,  $\hat{\mathbf{R}}_n^k$  – оценки КМ входного и помехового сигналов для  $k$ -го момента времени, полученные по  $K$  временным отсчетам, что предполагает формирование выборки  $\mathbf{Z}^K$  из  $K$  временных отсчетов  $\mathbf{Z}^K = \left\| z^{k+k_a-1} \right\|_{k=1}^K$ , где  $z^k = \left| \left(\mathbf{Y}^k\right)^+ \hat{\mathbf{R}}_n^{-1} \hat{\mathbf{r}}_m^* \right|^2$ . В отсчетах  $z^k$  величина ОСПШ, без учета ошибок в измеренных значениях ВП МЛ СФААР, составляет  $\gamma_{0m} = \gamma'_m \hat{\mathbf{r}}_m^+ \hat{\mathbf{R}}_n^{-1} \hat{\mathbf{r}}_m$ , где  $\gamma'_m$  – отношение мощности сигнала  $m$ -го ИИ к мощности внутреннего шума (ОШ) на входе АР. В (6) матрицы  $\hat{\mathbf{R}}^k$ ,  $\hat{\mathbf{R}}_n^k$  определяются по завершению процесса адаптации в МЛ СФААР:

$$\hat{\mathbf{R}} = 2\hat{\sigma}_0^2 \mathbf{I} + 2 \sum_{l=1}^M \hat{\sigma}_{cl}^2 \hat{\mathbf{r}}_l \hat{\mathbf{r}}_l^+, \quad \hat{\mathbf{R}}_n = 2\hat{\sigma}_0^2 \mathbf{I} + 2 \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq m}}^M \hat{\sigma}_{cl}^2 \hat{\mathbf{r}}_l \hat{\mathbf{r}}_l^+,$$

где  $2\hat{\sigma}_{cl}^2$ ,  $2\hat{\sigma}_0^2$  – оценки мощности сигнала  $l$ -го ИИ и внутренних шумов в приемных каналах АР (величина  $2\hat{\sigma}_0^2$  определяется по результатам работы системы шумовой регулировки коэффициента усиления);  $\hat{\mathbf{r}}_l = \left\| \hat{v}_l^{n-1} \right\|_{n=1}^N$  – оценка вектора ФР сигнала  $l$ -го ИИ на апертуре МЛ СФААР;  $\mathbf{I}$  – единичная матрица.

Принималось, что решающая статистика  $\mathbf{Z}^K$  подчинена  $\chi^2$ -распределению. В этом случае значение вероятности правильного обнаружения  $D_m$  сигнала  $m$ -го ИИ рассчитывается согласно выражения:

$$D_m = \frac{\Gamma\left(n_1, \frac{n_1 Z_*}{1 + \gamma_m}\right)}{\Gamma(n_1)}, \quad (7)$$

где  $\Gamma(a,b)$  ( $\Gamma(a)$ ) - значение неполной (полной) гаммой функции;  $n_1$  - число степеней свободы  $\chi^2$ -распределения при наличии в выборке  $\mathbf{Z}^K$  входного сигнала обнаруживаемого сигнала  $m$ -го ИИ.

Величина порога  $Z_*$  находилась по заданной величине вероятности ложной тревоги:

$$F = \frac{\Gamma(n_0, n_0 Z_*)}{\Gamma(n_0)},$$

где  $n_0$  - число степеней свободы  $\chi^2$ -распределения при отсутствии в выборке  $\mathbf{Z}^K$  входного сигнала обнаруживаемого сигнала  $m$ -го ИИ.

Наличие флуктуационной ошибки в измеренных значениях ВП МЛ СФААР, а следовательно и в оценках АФР сигналов ИИ на апертуре АР информационной РЭС, приводит к снижению величины ОСПШ в выборке  $\mathbf{Z}^K$ . На рисунке 3 представлены результаты исследования нормированных значений ОСПШ  $\frac{\gamma_m}{\gamma_{0m}}$  на выходе АР.

Линиями показаны зависимости  $\frac{\gamma_m}{\gamma_{0m}}$ , являющиеся функциями дисперсии ошибок в оценках ВП МЛ СФААР с  $N=20, 60$ , которые учтены в оценках КМ принятого сигнала, точками – значения  $\frac{\gamma_m}{\gamma_{0m}}$  полученные по результатам моделирования работы МЛ СФААР в соответствии с алгоритмом (2)-(5).

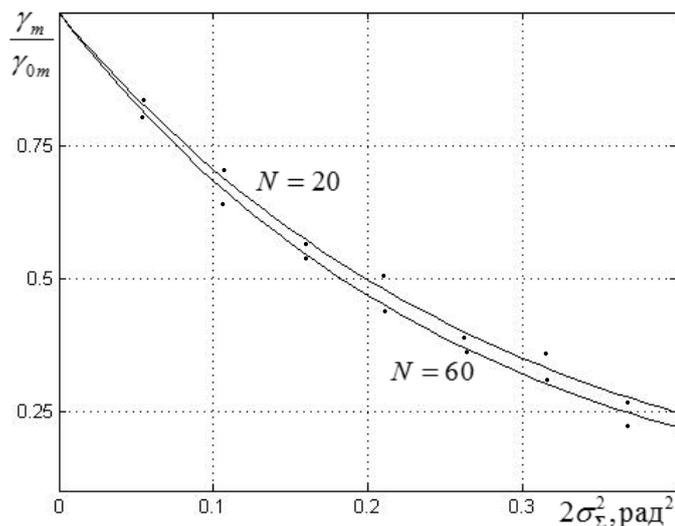


Рисунок 3. Зависимость ОСПШ от величины флуктуационной ошибки ВП МЛ

### СФААР

Моделировалась ситуация приема  $N$ -элементной эквидистантной АР трех сигналов ( $M=3$ ) равных мощностей ( $2\sigma_{ci}^2=2\sigma_c^2$ ,  $i=\overline{1,3}$ , где  $2\sigma_{ci}^2$  - мощность сигнала  $i$ -го ИИ на входе АР) с эквивалентными энергетическими спектрами ( $f_{oi}=f_0$ ,  $\Delta f_{oi}=\Delta f_0$ ,  $i=\overline{1,3}$ , где  $f_{oi}$ ,  $\Delta f_{oi}$  - несущая частота и ширина энергетического спектра сигнала  $i$ -го ИИ), ИИ которых располагались под углами  $\theta_1=0^\circ$ ,  $\theta_2=15^\circ$ ,  $\theta_3=40^\circ$  относительно нормали к АР. Обнаруживался сигнал ИИ с  $\theta_1=0^\circ$ . Количество элементов в АР последовательно полагалось равным  $N=20, 60$ . Как следует из представленных результатов, значение дисперсии ошибки в оценках ВП МЛ СФААР равное  $2\sigma_\Sigma^2=0,1\dots 0,2 \text{ рад}^2$  приводит к снижению величины ОСПШ на выходе АР в  $\sim 1,5\dots 2,2$  раза. Рост числа элементов в АР, при наличии ошибок в оценках устанавливаемого АФР по раскрытию АР, ведет к снижению величины  $\frac{\gamma_m}{\gamma_{0m}}$ .

Так изменение  $N$  с  $N=20$  до  $N=60$  приводит к снижению  $\frac{\gamma_m}{\gamma_{0m}}$  на  $\sim 1,85\%$  при  $2\sigma_\Sigma^2 \sim 0,1 \dots 0,2 \text{ рад}^2$ .

Величина относительного приращения показателя  $D_m$  при применении в информационных РЭС МЛ СФААР оценивалась согласно выражению:

$$\Delta^{D_m} = 1 - \frac{D_m}{D_{0m}}, \quad (8)$$

где  $D_{0m}$  - вероятность правильного обнаружения сигнала  $m$ -го ИИ с учетом результатов адаптации МЛ СФААР.

Количественная оценка величины  $\Delta^{D_m}$  выполнялась по результатам численного эксперимента, результаты которого представлены на рисунках 4, 5. Линиями показаны зависимости  $\Delta^{D_m}$  рассчитанные в соответствии с (7), точками – по результатам моделирования процесса обнаружения сигнала ИИ согласно (6). В (8) значение  $D_m$  вычислялось без учета результатов адаптации МЛ СФААР, когда КМ помехового сигнала принимается равной  $\mathbf{R}_n = 2\sigma_0^2 \mathbf{I}$ . При проведении численного эксперимента ИИ располагались под углами  $\theta_1 = 0^\circ$ ,  $\theta_2 = 15^\circ$ ,  $\theta_3 = 40^\circ$  относительно нормали к АР (рисунок 4а). Обнаруживался сигнал ИИ с  $\theta_1 = 0^\circ$ . Результаты рисунка 4б получены при значении ОСПШ на входе АР равным  $\gamma'_1 = 1,54 \text{ дБ}$ , когда коэффициент подавления помехи  $K_1^P = \frac{\gamma_1}{\gamma'_1}$  составлял  $K_1^P = 6 \text{ дБ}$ .

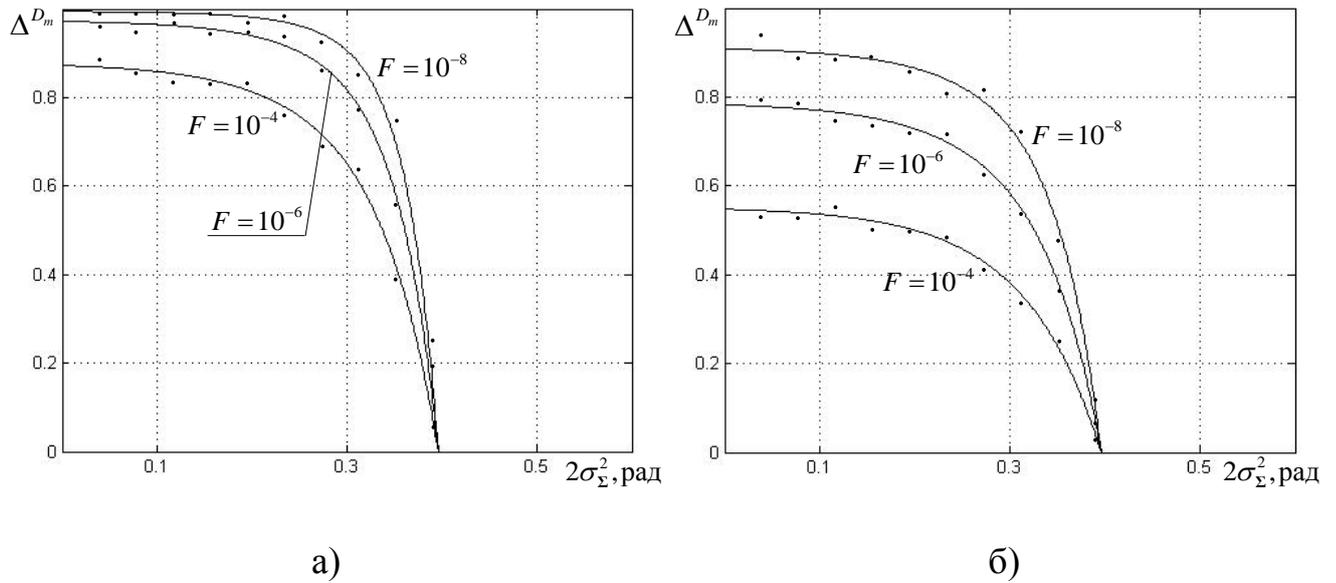


Рисунок 4. Влияние флуктуационной составляющей ошибки ВП МЛ СФААР на эффективность обнаружения сигнала при  $\gamma_1' = -1,54$  дБ. а)  $K_1^P = 6$  дБ; б)  $K_1^P = 8,5$  дБ.

Результаты рисунка 5 получены при  $\gamma_1' = 0,41$  дБ,  $K_1^P = 8,5$  дБ.

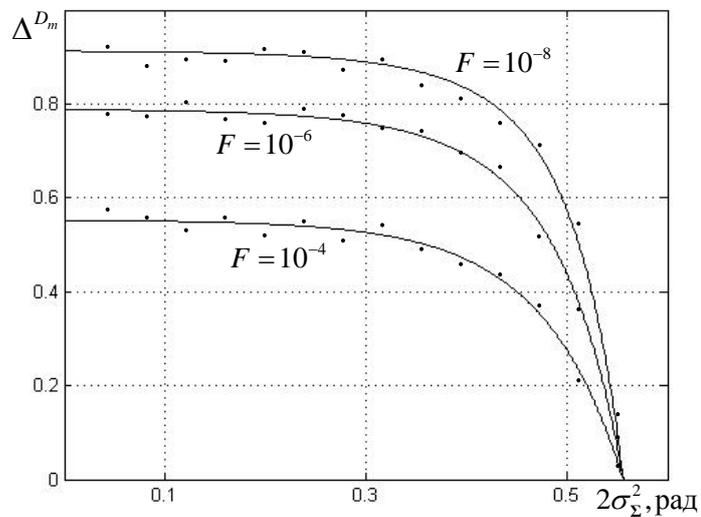


Рисунок 5. Влияние флуктуационной составляющей ошибки ВП МЛ СФААР на эффективность обнаружения сигнала при  $\gamma_1' = 0,41$  дБ,  $K_1^P = 8,5$  дБ

Как следует из представленных результатов снижение доли энергии обнаруживаемого сигнала пораженной взаимной помехой приводит к сохранению

эффективности поиска сигнала при наличии флуктуационной ошибки в оценках ВП МЛ СФААР.

### **Выводы**

Наличие флуктуационной составляющей суммарной ошибки в оценках ВП МЛ СФААР приводит к снижению эффективности информационных РЭС по показателю "вероятность правильного обнаружения" при обнаружении сигнала в соответствии с критерием Неймана-Пирсона по результатам анализа выборки, формируемой с использованием результатов адаптации МЛ СФААР. Параметром, оказывающим основное влияние на величину флуктуационной составляющей ВП МЛ СФААР является угловое рассовмещение ИИ между собой. При этом, при сохранении равенства угловых положений ИИ, на величину флуктуационной ошибки так же оказывает влияние их число и величина полосы пропускания замкнутого контура самонастройки МЛ СФААР. Полученные результаты позволяют проводить оценку влияния взаимных помех на качество обнаружения сигналов в соответствии с текущей сигнально-помеховой обстановкой.

*Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ (НШ-6831.2016.8)*

### **Библиографический список**

1. Лешко Н.А., Ашурков И.С. Расчет рабочей зоны многопозиционной радиолокационной системы по стороннему источнику подсвета // Труды МАИ. 2015. №83. URL: <https://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=62297>

2. Агапов О.А. Обнаружение полезного сигнала на фоне сигналов активных помех в полном поляризационном базисе при известной межканальной корреляционной матрице // Труды МАИ. 2016. №89. URL: <https://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=73361>

3. Радзиевский В.Г., Сирота А.А. Информационное обеспечение радиоэлектронных систем в условиях конфликта. – М.: Изд-во ИПРЖР, 2001. – 456 с.

4. Гуменюк А.Ю., Зайцев А.Г., Линкевичиус А.П., Тимаков Д.А. Метод поиска сигналов РЭС в условиях сложной сигнально-помеховой обстановки с использованием МЛ СФААР // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2016. №5. С.26-35.

5. Царьков В.М. Многоканальные радиолокационные измерители. – М.: Советское радио, 1980. – 190 с.

6. Гузенко О.Б., Зайцев А.Г., Неплюев О.Н., Ягольников С.В. Методика анализа качества МЛ СФААР // Радиотехника. 2015. №3. С.79-83.

7. Акимов П.С., Бакут П.А., Богданович В.А. и др. Теория обнаружения сигналов. – М.: Радио и связь, 1984. – 440 с.