

## Лекция 6.

### Определение оптимальных параметров кольцевой антенной решетки при осуществлении пеленгации с помощью алгоритма MUSIC

Кольцевая антенная решетка (КАР) – это система антенных элементов, размещенных по окружности. Основными достоинствами кольцевых АР являются:

- круговая симметрия, благодаря которой КАР могут использоваться для создания направленных диаграмм, мало меняющихся при сканировании в пределах  $360^\circ$ ;
- возможность пеленгации, как по азимуту, так и по углу места.

Определим оптимальные параметры антенной решетки, рассмотрев кольцевую структуру антенной решетки. Оценим влияние параметров кольцевой антенной решетки (КАР) на точность пеленгации. Для этого введем следующие характеристики:  $\Delta\alpha$  – разрешающая способность, т.е. разнос между ИРИ по азимуту, при котором глубина провала между пиками выходной функции составляет 5 дБ;  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение (СКО) оценки пеленга от его истинного значения.

На рис. 1. представлены графики зависимости разрешающей способности по азимуту и СКО оценки пеленга алгоритма MUSIC от радиуса при различном количестве элементов КАР. Зависимость разрешающей способности по углу места от радиуса не представлена, поскольку совпадает с зависимостью разрешающей способности по азимуту от радиуса. Как видно из графиков, значения  $\Delta\alpha$  и  $\sigma$  резко уменьшаются при увеличении радиуса КАР, при этом в интервале значений радиуса от  $\lambda$  до  $2\lambda$  они практически не изменяются. Следовательно, применение антенной решетки с радиусом  $R > \lambda$  не имеет смысла, поскольку увеличение радиуса КАР означает увеличение длины фидера, что приводит к ослаблению сигнала. Кроме того, увеличение элементов КАР не приводит к существенному уменьшению разрешающей способности и СКО оценки пеленга.

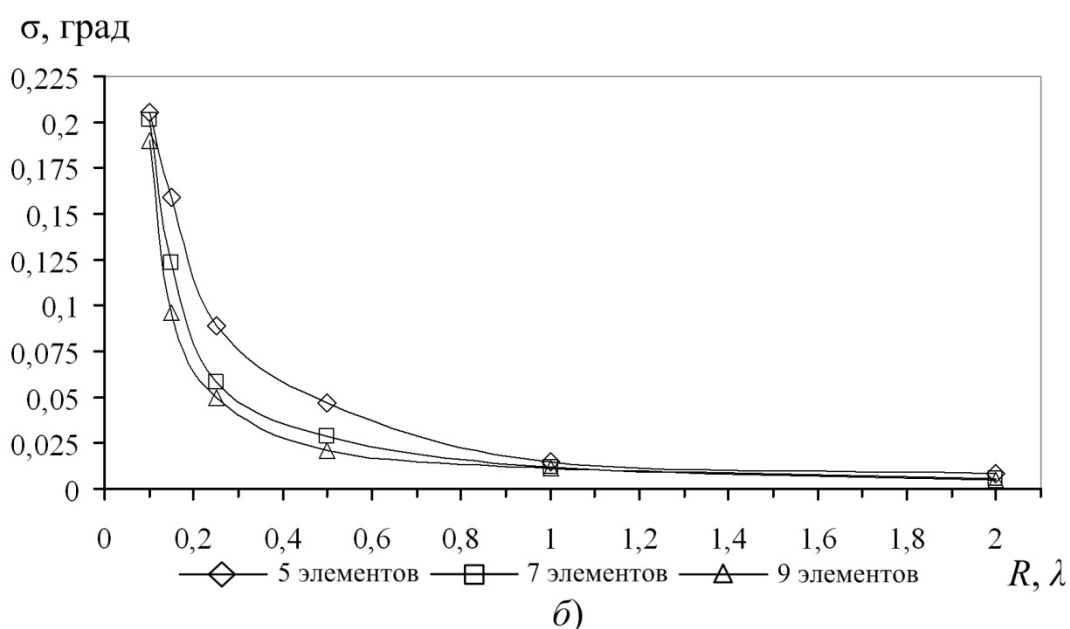
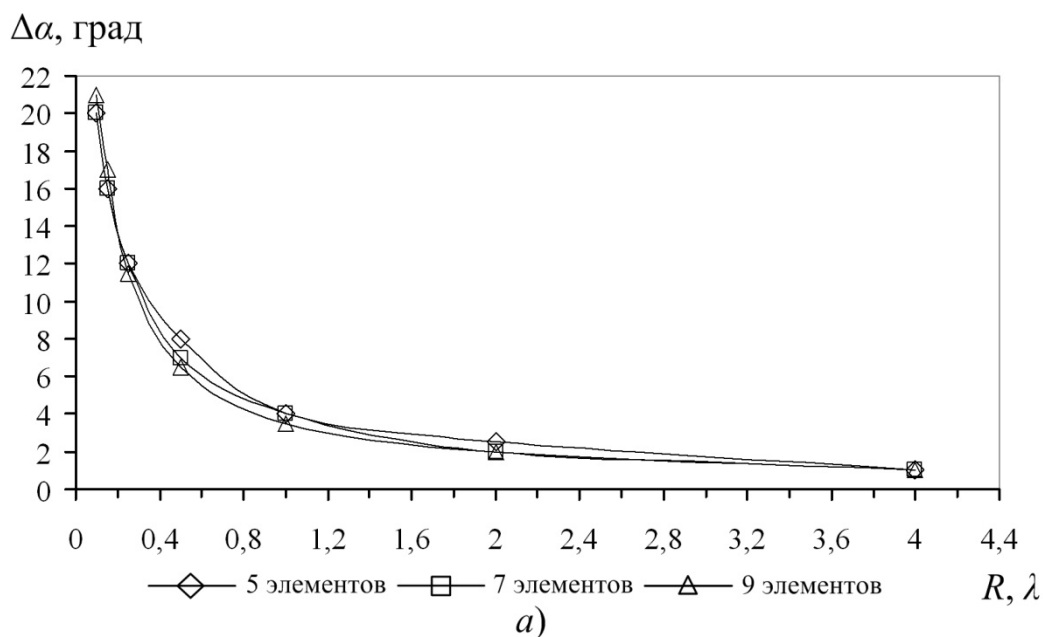


Рис. 1. Графики зависимостей разрешающей способности метода MUSIC (а) и СКО оценки пеленга (б) от радиуса КАР при различном количестве антенных элементов.

Для определения оптимальных параметров кольцевой антенной решетки в случае низкого отношения сигнал/шум исследуем зависимость критического отношения сигнал/шум  $ОСШ_{кр}$  от параметров антенной решетки: количества элементов  $N$ , а также радиуса  $R$ . Назовем отношение

сигнал/шум, при котором разрешение сигналов выполняется в 95% случаев, – критическим.

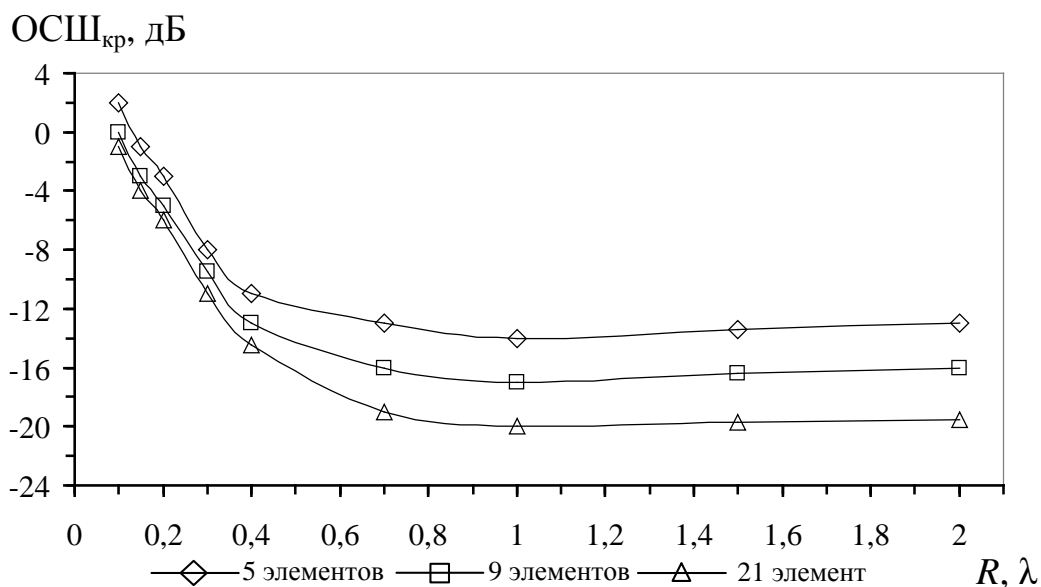


Рис. 2. Графики зависимости критического отношения сигнал/шум от радиуса кольцевой антенной решетки при различном количестве антенных элементов.

На рис. 2. представлены графики зависимости критического отношения сигнал/шум от радиуса кольцевой антенной решетки при различном количестве антенных элементов. Как видно из графиков, увеличение радиуса  $R$  кольцевой антенной решетки в пределах от  $0,1\lambda$  до  $\lambda$  приводит к уменьшению критического значения отношения сигнал/шум  $ОСШ_{кр}$ , что означает более высокую устойчивость метода при малых значениях мощности пеленгуемых сигналов. Дальнейшее увеличение радиуса приводит к некоторому увеличению  $ОСШ_{кр}$ . Таким образом, в условиях низкого отношения сигнал/шум целесообразно выбирать радиус КАР равным длине волны  $R = \lambda$ . Как видно из рис. 2. данное правило справедливо для различного количества антенных элементов.

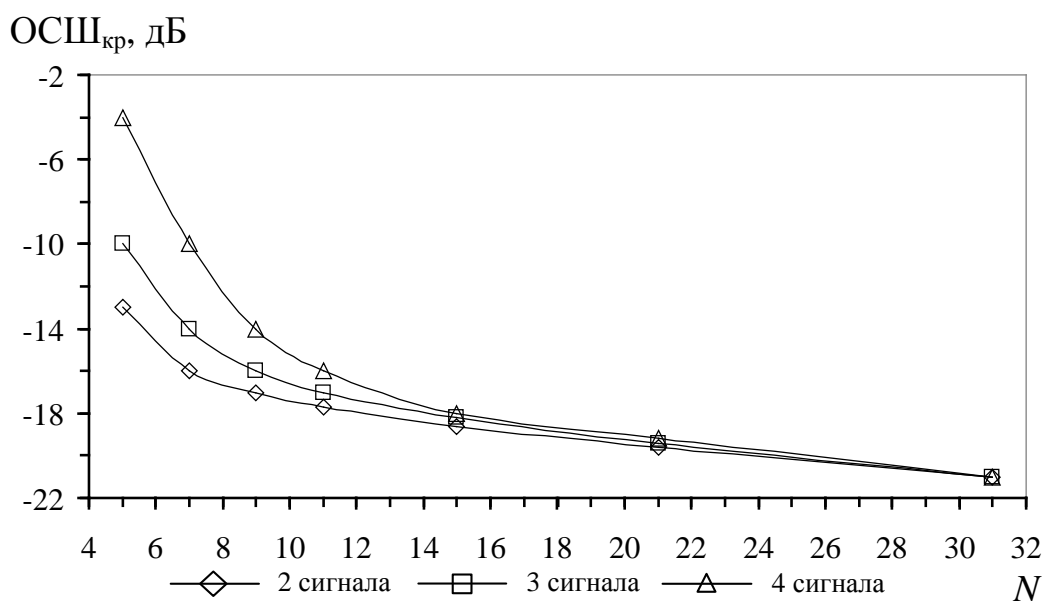


Рис. 3. Графики зависимости критического отношения сигнал/шум от количества антенных элементов при различном количестве пеленгуемых сигналов ( $R = \lambda$ ).

На рис. 3. представлены графики зависимости критического отношения сигнал/шум от количества антенных элементов при различном количестве пеленгуемых сигналов в случае  $R = \lambda$ . Как видно из графиков, увеличение количества антенных элементов  $N$  кольцевой антенной решетки приводит к уменьшению критического значения отношения сигнал/шум  $ОСШ_{кр}$ . Кроме того, увеличение количества пеленгуемых сигналов ведет к возрастанию  $ОСШ_{кр}$ . Зависимость на рис.3. имеет резкий спад в области  $5 \leq N \leq 11$ . Дальнейшее увеличение антенных элементов приводит к незначительному выигрышу для  $ОСШ_{кр}$ . Так при увеличении  $N$  с 11 до 31 выигрыш для  $ОСШ_{кр}$  составляет -4 дБ. Однако даже при  $N = 31$ , критическое отношение сигнал/шум равняется -21 дБ.

### 3.5.2. Исследование влияния смещения несущей частоты сигналов от заданного значения на характеристики пеленгации метода MUSIC

Для того чтобы характеризовать возможность пеленгации введем следующий параметр:

$$g = 10 \log \left( \frac{P_2}{P_1} \right), \quad (1)$$

где  $P_2$  – наименьший из пиков функции  $P(\alpha)$ , соответствующих пеленгуемым сигналам,  $P_1$  – наибольший из ложных пиков функции  $P(\alpha)$  (рис. 4). Следовательно, при  $g > 0$  гарантируется правильность определения пеленгов, при  $g \leq 0$  уровень наименьшего из пиков, соответствующих пеленгуемым сигналам, меньше либо равен уровню наибольшего из ложных пиков, что приводит к ошибке определения пеленгов.

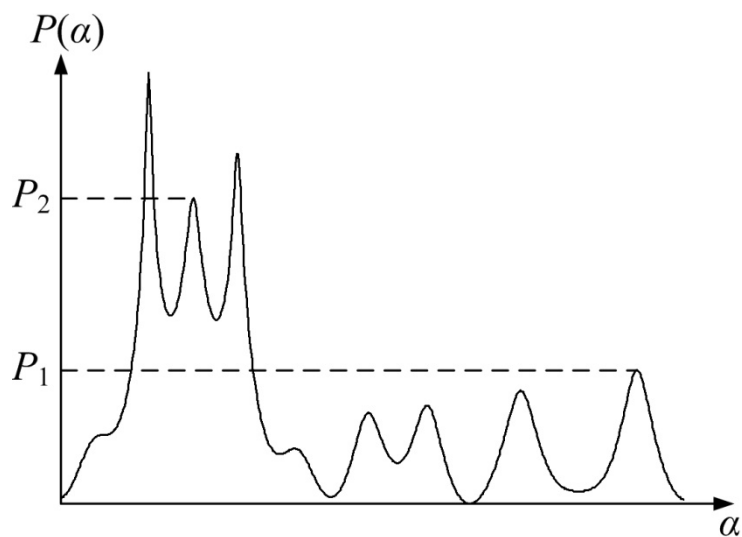


Рис. 4. К определению параметра  $g$ .

Смещение несущей частоты сигналов от заданного значения определяется следующим образом:

$$\Delta f = \frac{|f - f_3|}{f_3} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где  $f$  – несущая частота сигнала,  $f_3$  – заданная частота.

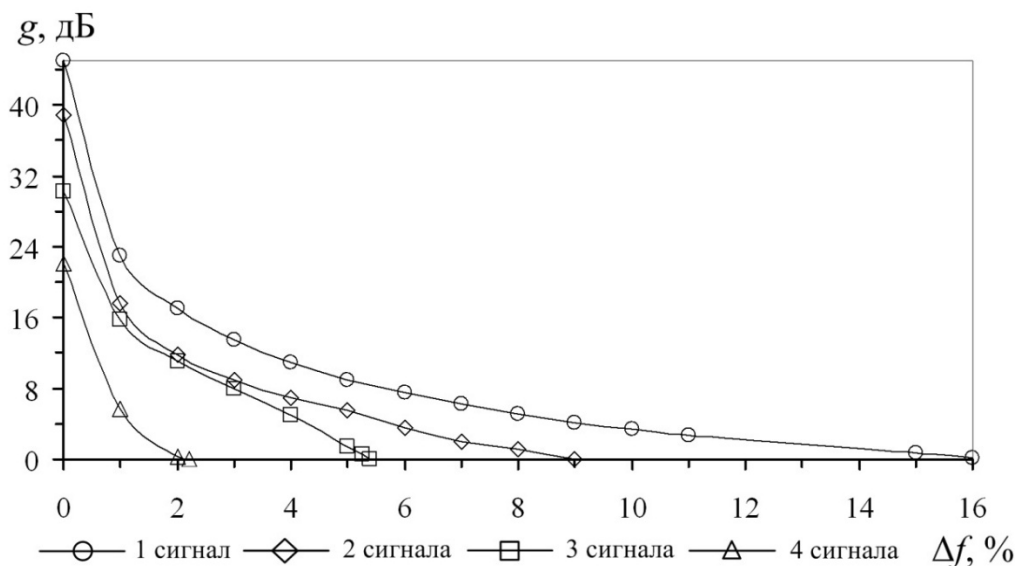


Рис. 5. Графики зависимости параметра  $g$  от смещения несущей частоты сигналов от заданного значения (5-ти элементная КАР).

На рис. 5. представлены графики зависимости характеристики пеленгации  $g$  от смещения несущей частоты сигналов от заданного значения при различном числе принимаемых сигналов. Из графиков видно, что увеличение количества пеленгуемых сигналов приводит к резкому снижению значения границы пеленгации  $\Delta f_0$ , при котором  $g = 0$  и величина наибольшего ложного пика становится равной величине наименьшего из пиков, соответствующих направлению на ИРИ.

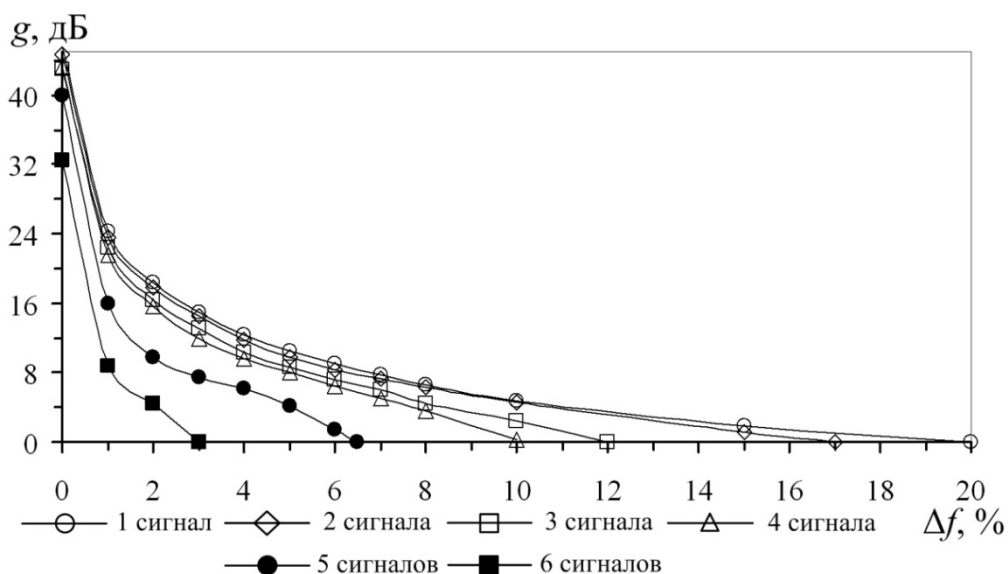


Рис. 6. Графики зависимости параметра  $g$  от смещения несущей частоты сигналов от заданного значения (7-ми элементная КАР).

На рис. 6. приведены графики зависимости характеристики пеленгации  $g$  от смещения несущей частоты сигналов от заданного значения 7-ми элементной КАР. Как видно из графиков, увеличение количества элементов антенной решетки приводит к увеличению границы пеленгации  $\Delta f_0$ , для различного количества пеленгуемых сигналов. Кроме того, из графиков на рис. 5 и 6 следует, что пеленгация  $M$  источников радиоизлучения в случае  $N - 2 \leq M < N$ , возможна лишь при малых смещениях несущей частоты сигналов от заданного значения. Следовательно, рекомендуется выбирать количество антенных элементов исходя из условия  $N \geq M+3$ .

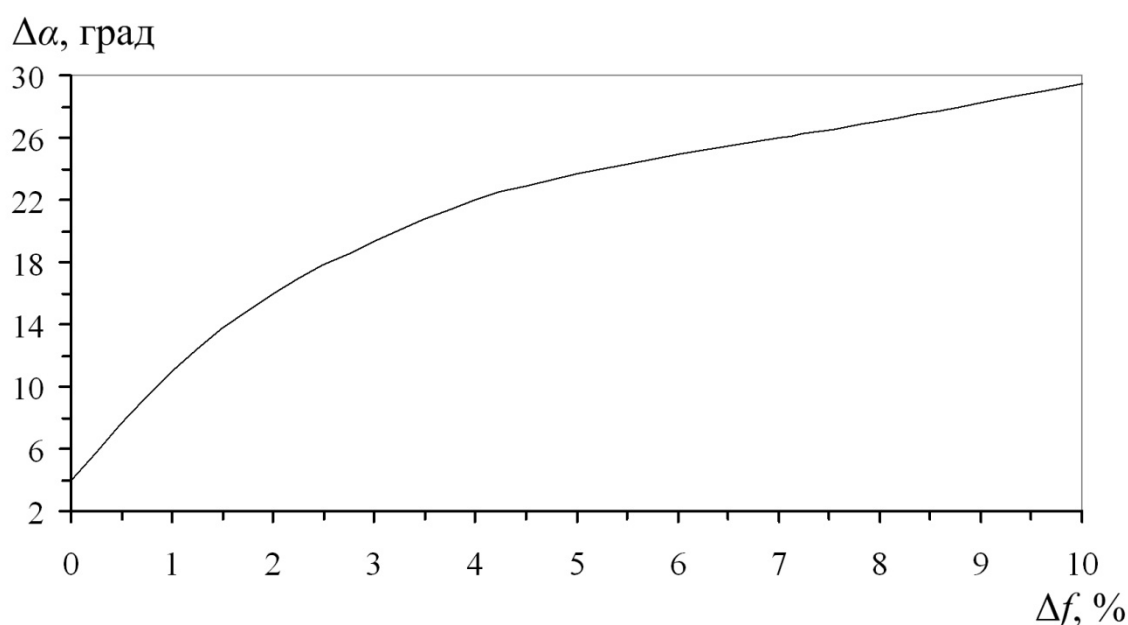


Рис. 7. График зависимости разрешающей способности от смещения несущей частоты сигналов от заданного значения.

На рис. 7. приведена зависимость разрешающей способности от смещения несущей частоты сигналов от заданного значения. Данная зависимость показывает, что увеличение ошибки приводит к резкому увеличению значения разрешающей способности для различного количества ИРИ.

Как показало моделирование, СКО оценки пеленга не зависит от смещения несущей частоты от заданного значения, поэтому график данной зависимости не представлен.

Анализируя результаты моделирования, можно сделать вывод о том, что граница возможной пеленгации  $\Delta f_0$ , резко снижается при увеличении количества принимаемых сигналов. При этом для количества сигналов, близкого к числу антенных элементов пеленгация становится невозможной уже при небольшом значении  $\Delta f$ . Кроме этого, при росте смещения происходит резкое увеличение значения разрешающей способности, и если повышение значения  $\Delta f_0$  можно осуществить за счет увеличения количества элементов антенной решетки, то разрешающая способность от него практически не зависит. Данный факт говорит о том, что алгоритм MUSIC является неустойчивым к смещению несущей частоты сигналов от заданного значения, и может эффективно применяться лишь при значениях  $\Delta f \leq 2\%$ .

### **Исследование метода MUSIC при низком отношении сигнал/шум.**

Чтобы оценить влияние отношения сигнал/шум на характеристики пеленгации необходимо провести моделирование алгоритма MUSIC при различных условиях.

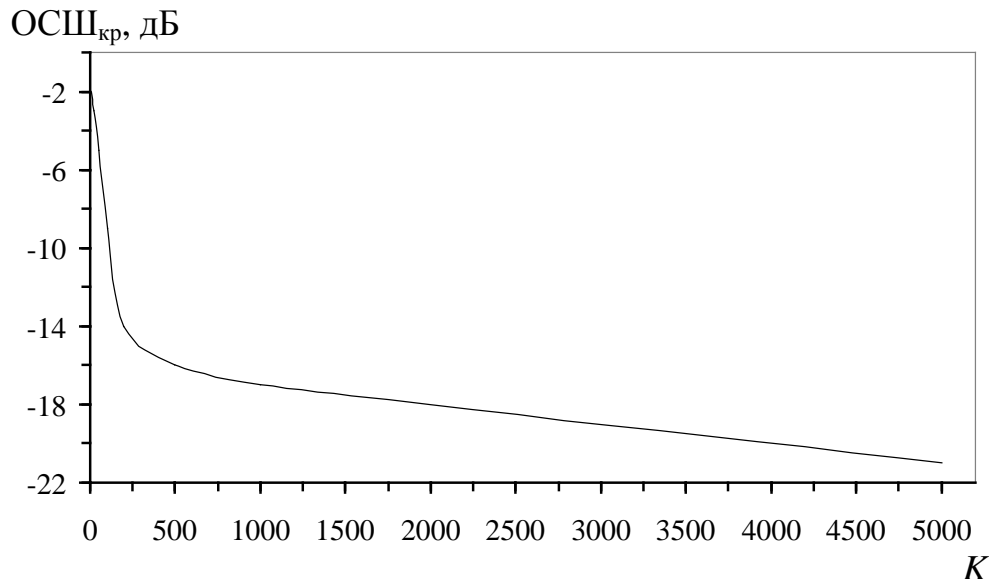


Рис. 8. График зависимости критического отношения сигнал/шум от времени накопления сигнала. ( $N = 9, R = \lambda$ )

На рис. 8. представлены графики зависимости критического отношения сигнал/шум от времени накопления сигнала в случае  $N = 9, R = \lambda$ . Как видно из графиков, можно добиться уменьшения значения  $ОСШ_{кр}$  и за счет



увеличения времени накопления сигнала  $K$ . Так увеличение количества отсчетов  $K$ , до 5000 приводит к уменьшению  $ОСШ_{кр}$  до -21дБ, что эквивалентно результату для 31-элементной решетки с временем накопления сигнала  $K = 1000$ . В случае малого времени накопления ( $K < 250$ ) зависимость критического отношения сигнал/шум от времени накопления сигнала имеет резкий спад.

Рассмотрим влияние отношения сигнал/шум на характеристики пеленгации в случае  $N = 9$ ,  $R = \lambda$ ,  $K=1000$ . Для этого введем следующие характеристики:  $\Delta\alpha$  – разрешающая способность по азимуту, т.е. величина минимального разноса между ИРИ, при котором можно обнаружить наличие двух источников;  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение (СКО) оценки пеленга от его истинного значения.

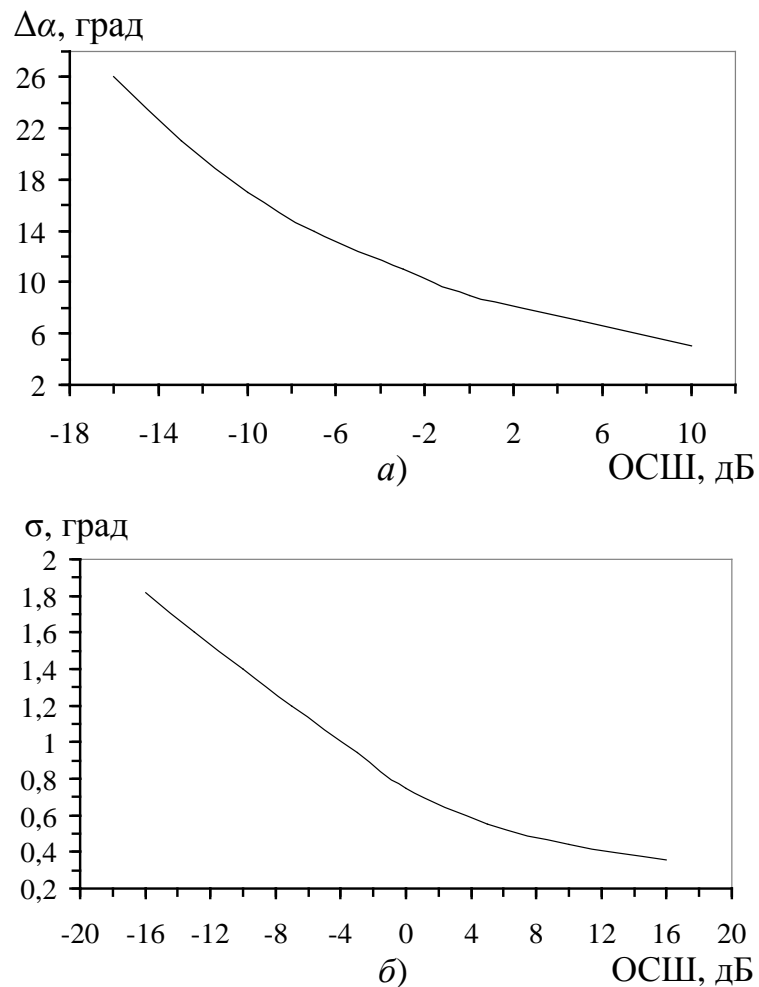


Рис. 9. Графики зависимости разрешающей способности (а) и СКО оценки пеленга (б) от отношения сигнал/шум ( $N = 9$ ,  $R = \lambda$ ,  $K=1000$ ).

На рис. 9. представлены зависимости разрешающей способности ( $a$ ) и СКО оценки пеленга ( $b$ ) от отношения сигнал/шум в случае  $N = 9$ ,  $R = \lambda$ ,  $K = 1000$ . Из графика на рис. 9. ( $a$ ) видно, что при отрицательных значениях ОСШ величина разрешения сигналов превышает 10 градусов и растет с его уменьшением. При критическом значении отношения сигнал/шум разрешение достигает 26 градусов. Данные значения разрешения сигналов являются неприемлемыми для задач пеленгации сигналов

Как видно из графиков на рис. 9. ( $b$ ) СКО оценки пеленга растет с уменьшением ОСШ и при критическом значении ОСШ достигает 2 градусов, что при пеленгации сигналов от далеко удаленных ИРИ означает большую ошибку в определении расстояния, что является неприемлемым.

Анализируя результаты моделирования, можно сделать вывод о том, что меняя количество антенных элементов, а также время накопления сигнала можно адаптировать метод MUSIC для работы при отношении сигнал/шум вплоть до -25дБ, однако данная работа будет неэффективной. Во-первых, на эффективность пеленгации оказывает негативное влияние увеличение пеленгуемых сигналов. Во-вторых, разрешающая способность метода при критических значениях сигнал/шум резко увеличивается и достигает нескольких десятков градусов, что в случае большой удаленности объектов пеленгации означает невозможность их пеленгации. В-третьих, значение СКО оценки пеленга при критическом значении ОСШ достигает 2 градусов, при определении расстояния до удаленных объектов дает большую ошибку.

Таким образом, данные выводы говорят о несостоятельности метода MUSIC в случае когда уровни пеленгуемых сигналов много меньше уровня шума, т.е. при критических значениях сигнал/шум, и необходимости разработки метода позволяющего эффективно решать задачи разрешения и пеленгации сигналов

Несмотря на данные замечания, стоит отметить, что при использовании оптимальных значений параметров антенной решетки, а также времени

накопления сигналов метод MUSIC может показывать удовлетворительные результаты в случае  $OSI \geq -10$  дБ.