

УДК 621.396.49

## ОТНОШЕНИЕ СИГНАЛ-ШУМ В МНОГОКАНАЛЬНОЙ ПРИЕМНОЙ СИСТЕМЕ С СИЛЬНЫМ ВЗАИМНЫМ ВЛИЯНИЕМ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КАНАЛОВ

*Грачев М.В., младший научный сотрудник кафедры РТУ Рязанского государственного радиотехнического университета им. В.Ф. Уткина, email: grachev.m.v@rsreu.ru;*

*Паршин Ю.Н., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой РТУ Рязанского государственного радиотехнического университета им. В.Ф. Уткина, email: parshin.y.n@rsreu.ru*

### SIGNAL-TO-NOISE RATIO IN MULTICHANNEL RECEIVING SYSTEM WITH STRONG MUTUAL INFLUENCE BETWEEN SPACE CHANNELS

*Grachev M.V., Parshin Yu.N.*

*A method for analyzing a multichannel receiving system with strong mutual influence is considered. To describe and take into account the mutual influence on the characteristics of the signal at the output of the multichannel receiving system a matrix of mutual impedances is used. A method of adjusting the mutual influence amount using a scaling factor is used. A model of signal and noise in a multichannel receiving system with mutual influence is presented. Different cases of signal's weight processing in the multichannel receiving system with mutual influence without taking into account signal distortions and noise, taking into account only signal distortion, and taking into account both signal and noise distortions are considered. The analysis of the output signal-to-noise ratio on the amount of mutual influence, the number of channels of the receiving system, the size of the aperture of the antenna system is carried out. Opportunity of increasing the efficiency of signal processing in multichannel receiving systems with mutual influence is shown.*

**Key words:** multichannel receiving system, signal processing, mutual influence, mutual impedance matrix, scaling factor, optimal weight, load impedance optimization.

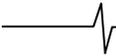
**Ключевые слова:** многоканальная приемная система, обработка сигналов, взаимное влияние, матрица взаимных импедансов, метод масштабирования, оптимальный весовой вектор, оптимизация нагрузочных импедансов.

#### Введение

Пространственная обработка сигналов в многоканальных приемных системах является актуальной научно-технической задачей в различных областях радиотехники. Эффективность подобных систем существенным образом зависит от прогресса в области пространственной обработки сигналов, а также антенной техники. Результаты теории оптимальной обработки сигналов [1] показывают, что эффективность обработки во многом определяется свойствами сигналов и помех, учитываемых при разработке оптимальных алгоритмов. В современных многоканальных приемных системах из-за ограничений на объем, в котором располагаются каналы приемной системы, увеличивается взаимное влияние каналов. Это связано с минимизацией размеров радиоустройств, значительным уменьшением расстояния между приемными каналами. Сильное взаимное влияние приемных каналов оказывает воздействие, как на входной сигнал, так и на действующие в системе шумы. Во многих случаях взаимное влияние каналов приемной системы ухудшает характеристики приемной системы, снижает эффективность обработки сигналов. Однако есть также варианты использования малогабаритных многоканальных приемных систем, в которых взаимное влияние может быть полезным [2].

*Рассматривается метод анализа многоканальной приемной системы с сильным взаимным влиянием. Для описания и учета взаимного влияния на характеристики сигнала на выходе многоканальной приемной системы используется матрица взаимных импедансов. Используется метод регулировки величины взаимного влияния с использованием коэффициента масштабирования. Представлена модель сигнала и шумов в многоканальной приемной системе с взаимным влиянием. Рассмотрены варианты весовой обработки сигналов в многоканальной приемной системе с взаимным влиянием без учета искажений сигнала и шумов, с учетом искажения только сигнала и с учетом искажений, как сигнала, так и шумов. Проведен анализ выходного отношения сигнал-шум от величины взаимного влияния, количества каналов приемной системы, размера апертуры антенной системы. Показаны возможности повышения эффективности обработки сигналов в многоканальных приемных системах с взаимным влиянием.*

В работе [3] проведен анализ искажений выходного сигнала, возникающих из-за взаимного влияния между каналами приемной системы, показано, что его учет позволяет увеличить эффективность приемной системы. В работах [4, 5] на примере характеристик обнаружения, оценки эффективности оценивания угловой координаты источника радиоизлучения многоканального радиолокатора показано, что взаимная связь приводит к изменению пространственных характеристик каналов, их рассогласованию. Также в работе [4] отмечен эффект рассогласования между антенной системой и приемным трактом, возникающим вследствие взаимного влияния каналов приемной системы. Предложено использование согласующих нагрузочных импедансов, их оптимизация



для согласования приемных каналов системы. Таким образом, учет взаимного влияния при проектировании многоканальных приемных систем, при проведении пространственной обработки сигнала позволяет повысить эффективность работы системы.

Целью данной работы является повышение эффективности обработки сигналов в многоканальных приемных системах с сильным взаимным влиянием путем рационального выбора размера апертуры и числа элементов антенной системы.

### Модель многоканальной приемной системы с взаимным влиянием

Рассматриваемая в работе  $N$ -канальная приемная система состоит из антенной системы, согласующей цепи, блока малошумящих усилителей (МШУ), блока весовой обработки сигналов.

Для представления взаимного влияния в  $N$ -канальной приемной системе используется матрица взаимных импедансов  $\mathbf{Z}_A$  размерностью  $N \times N$ , которая для некоторых типов антенн может быть рассчитана аналитически. В работе [6] предложена модель связи между каналами приемной системы на основе изменения масштаба расстояний между элементами некоторой опорной антенной системы, для которой матрица  $\mathbf{Z}_A$  может быть рассчитана аналитически. При расчете матрицы взаимных импедансов используется масштабирующий коэффициент:

$$a_M = d_{mn} / a_{mn},$$

где  $d_{mn}$  – расстояние между элементами реальной антенной системы,  $a_{mn}$  – расстояние между элементами опорной антенной системы. При этом величина  $a_{mn} = 0$  соответствует случаю отсутствия взаимной связи, а величина  $a_{mn} a_M \gg 1$  – случаю сильной взаимной связи. Значение  $a_{mn} a_M = 1$  соответствует величине взаимной связи как тонких вибраторов.

В качестве опорной антенной системы используется система антенн в виде тонких вибраторов. Для данной модели методом наведенных ЭДС получено аналитическое выражение для матрицы взаимных импедансов [7]:

$$\underline{Z}_A(m, n) = \frac{jW}{2\pi \sin kl} \int_0^l (\underline{\alpha}_{mn}(z) + \underline{\beta}_{mn}(z) - \underline{\gamma}_{mn}(z)) \times \frac{\sin k(l-|z|)}{\sin kl} dz, \quad m, n = 1, \dots, N,$$

$$\text{где } \underline{\alpha}_{mn}(z) = \frac{\exp(-jk\sqrt{d_{mn}^2 + (z-l)^2})}{\sqrt{d_{mn}^2 + (z-l)^2}},$$

$$\underline{\beta}_{mn}(z) = \frac{\exp(-jk\sqrt{d_{mn}^2 + (z+l)^2})}{\sqrt{d_{mn}^2 + (z+l)^2}},$$

$$\underline{\gamma}_{mn}(z) = 2 \cos kl \frac{\exp(-jk\sqrt{d_{mn}^2 + z^2})}{\sqrt{d_{mn}^2 + z^2}},$$

$k = 2\pi / \lambda$  – волновое число,  $\lambda$  – длина волны,

$\varepsilon_0 = 10^{-9} / 36\pi \text{ К}^2 / \text{H} \times \text{M}^2$  – электрическая постоянная вакуума,  $W = \frac{k}{\omega\varepsilon_0}$  – волновое сопротивление среды,  $2l$  –

длина вибраторов,  $d_{mn}$ ,  $m, n = 1, \dots, N$  – расстояния между вибраторами. В дальнейшем рассматривается линейная антенная система с координатами антенн  $x_n$ .

Источник сигнала расположен в дальней зоне и создает в окрестности антенн поле с дисперсией  $D_S$ . Пространственные характеристики источника сигнала в элементах линейной антенной системы  $N$ -канальной приемной системы задаются направляющим вектором-столбцом:

$$\underline{\mathbf{V}}_{S0} = \left\{ \exp\left(-j \frac{2\pi x_n}{\lambda} \sin \varphi_S\right), n = 1, \dots, N \right\},$$

где  $\varphi_S$  – направление прихода сигнала относительно нормали антенной системы в угломестной плоскости тонкого вибратора. Сигнал в антеннах определяется вектором-столбцом  $\mathbf{S}_0 = \mathbf{V}_{S0} A_S$ , где  $A_S$  – комплексная амплитуда сигнала. Матрица пространственной корреляции сигнала в раскрыве антенной системы равна  $\mathbf{R}_{S0} = D_S \mathbf{V}_{S0} \mathbf{V}_{S0}^H$ , где знак  $^H$  означает эрмитово сопряжение.

Для задания энергетических свойств сигнала используется входное отношение сигнал-шум  $q_S = \frac{D_S}{D_N}$ ,

где  $D_N = 4k_B T_{ISO} \Delta f \text{ Re } Z_A$  – дисперсия тепловых шумов в пространственных каналах без взаимного влияния,  $Z_A$  – импеданс изолированной антенны,  $k_B = 1,38 \times 10^{-23} \text{ Дж/}^\circ\text{K}$  – постоянная Больцмана,  $T_{ISO}$  – температура окружающей среды,  $^\circ\text{K}$ ,  $\Delta f$  – полоса рабочих частот.

Согласующая цепь решает задачу передачи максимальной мощности сигнала из антенной системы в МШУ [8, 9]. Согласующая цепь преобразует действительную часть импеданса антенной системы к значению действительной составляющей входного импеданса МШУ при помощи трансформатора без потерь. Диагональная матрица коэффициентов трансформации всех каналов:

$$\mathbf{K}_{TR} = \left\{ K_{TR}(n, n) = \sqrt{\frac{R_{LNA}}{R_L(n)}}, n = 1, \dots, N \right\},$$

где  $R_{LNA}$  – входное сопротивление МШУ,  $R_L$  действительная часть согласуемого импеданса. Для компенсации мнимой части импеданса антенны используется реактивный элемент, включенный последовательно:

$$\mathbf{X} = \{X(n, n), n = 1, \dots, N\}.$$

В данной статье применяется согласование МШУ с изолированным тонким вибратором.

Матрица взаимных импедансов антенной системы после трансформации на входе МШУ принимает следующее значение

$$\mathbf{Z}_{ATR} = \mathbf{K}_{TR}^2 (\mathbf{Z}_A + j\mathbf{X}).$$

В многоканальной приемной системе действуют внешние шумы антенны и внутренние шумы МШУ. Кор-

реляционные матрицы суммы коррелированных в общем случае шумовых токов и напряжений на входе МШУ соответственно равны [10]:

$$\mathbf{R}_I = \mathbf{Z}_{ATR}^{-1} \mathbf{M}_U \mathbf{Z}_{ATR}^{-1H} + \mathbf{Z}_{ATR}^{-1H} \mathbf{Y}_C \mathbf{M}_U + \mathbf{M}_U \mathbf{Y}_C^H \mathbf{Z}_{ATR}^{-1} + \mathbf{M}_I,$$

$$\mathbf{R}_U = \left( \mathbf{Z}_{ATR}^{-1} + \frac{1}{R_{LNA}} \mathbf{I} \right)^{-1} \mathbf{R}_I \times \left( \mathbf{Z}_{ATR}^{-1} + \frac{1}{R_{LNA}} \mathbf{I} \right)^{-1H},$$

где  $\mathbf{Y}_C = \overline{\mathbf{I}_R \mathbf{V}_R^H \mathbf{M}_V^{-1}}$ ,  $\mathbf{M}_V = \overline{\mathbf{V}_R \mathbf{V}_R^H}$ ,  $\mathbf{M}_I = \overline{\mathbf{I}_R \mathbf{I}_R^H}$  – диагональные матрицы шумовой проводимости, дисперсий шумовых источников напряжения  $\mathbf{V}_R$  и тока  $\mathbf{I}_R$  шумовой схемы замещения МШУ.

Преобразование сигнала и шума антенны в многоканальной приемной системе происходит в соответствии с матричным коэффициентом преобразования:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{K}_{TR} \mathbf{K}_{TR}^{-2} \mathbf{R}_{LNA} (\mathbf{Z}_A + j\mathbf{X} + \mathbf{K}_{TR}^{-2} \mathbf{R}_{LNA})^{-1}.$$

В результате направляющий вектор сигнала, пересчитанный к входу МШУ, определяется по формуле  $\mathbf{V}_S = \mathbf{Q} \mathbf{V}_{S0}$ , а сигнал на входе МШУ равен  $\mathbf{S} = \mathbf{V}_S \mathbf{A}_S$ .

Матрица дисперсий шумового напряжения, вызванного шумами антенной системы и пересчитанного к входу МШУ, равна [10]:

$$\mathbf{R}_{TU} = 4kT_{ISO} \Delta f \mathbf{Q} \mathbf{R}_e \mathbf{Z}_A \mathbf{Q}^H.$$

Для повышения эффективности приема полезного сигнала и подавления помех сигналы с выходов МШУ поступают в блок весовой обработки, в котором происходит умножение сигналов каналов на вектор-строку комплексных весовых коэффициентов  $\mathbf{w}$ :

$$z = \mathbf{w}(\mathbf{S} + \mathbf{N}),$$

где  $\mathbf{N}$  – вектор-столбец шумовых напряжений антенн и МШУ, пересчитанные к входам МШУ. В результате формируется выходной сигнал многоканальной приемной системы, который в дальнейшем используется как статистика для принятия решений. Выбор весового вектора происходит в соответствии с одним из заданных критериев качества. В качестве критерия качества предлагается использовать отношение сигнал-шум (ОСШ), величина которого определяется следующим выражением [11]:

$$q = \frac{\mathbf{w} \mathbf{R}_S \mathbf{w}^H}{\mathbf{w} \mathbf{R}_N \mathbf{w}^H},$$

где  $\mathbf{R}_N = \mathbf{R}_{TU} + \mathbf{R}_U$  – корреляционная матрица шумов антенны и МШУ, пересчитанных к входам МШУ,  $\mathbf{R}_S = \mathbf{Q} \mathbf{R}_{S0} \mathbf{Q}^H$  – корреляционная матрица сигнала на входе МШУ.

В статье рассматриваются следующие варианты оптимальной обработки [11]:

1) без учета корреляции шумов и искажений сигнала,

вызванных взаимным влиянием  $\mathbf{w}_1 = \frac{\mathbf{S}_0^H}{D_N}$ ,

2) без учета корреляции шумов, с учетом искажений

сигнала, вызванных взаимным влиянием  $\mathbf{w}_2 = \frac{\mathbf{S}^H}{D_N}$ ,

3) с учетом корреляции шумов и искажений сигнала,

вызванных взаимным влиянием  $\mathbf{w}_3 = \mathbf{S}^H \mathbf{R}_N^{-1}$ .

### Зависимости отношения сигнал-шум от числа пространственных каналов

Проведем анализ зависимости ОСШ многоканальной приемной системы от взаимного влияния между каналами. Степень взаимного влияния определяется расстоянием между антеннами, а также типом антенн. Для регулировки степени взаимного влияния используется масштабирующий коэффициент  $a_M$ . Значение нагрузочных импедансов  $Z_L = 73,07 - 42,5j$  Ом каждого пространственного канала выбрано из условия согласования одиночного изолированного тонкого полуволнового вибратора [7]. Шумовые свойства МШУ определяются набором параметров шумовой схемы замещения: шумовое сопротивление  $R_n = 15$  Ом, коэффициент шума  $K_{LNA} = 1,2$  дБ, входное сопротивление МШУ  $R_{LNA} = 50$  Ом. Далее полагается, что шумовые источники МШУ в схеме замещения некоррелированы  $Y_C = 0$ .

Диагональная матрица отношений дисперсий шумовых источников напряжения и тока МШУ в каналах приемной системы:

$$[\mathbf{M}_I^{-1} \mathbf{M}_U]_{n,n} = \frac{R_n R_{LNA}^2}{(R_{LNA} (K_{LNA} - 1) - R_n)} = 5331 \text{ Ом}^2.$$

Антенная система функционирует при температуре  $T_{ISO} = 300$  К. ОСШ на входе многоканальной приемной системы равно  $q_S = 11,4$  дБ.

Рассмотрим влиянием числа пространственных каналов на отношение сигнал-шум при заданном размере апертуры антенной системы  $D/\lambda = 1$ . Полагается, что расположение антенн на апертуре линейное и эквидистантное.

На рис. 1 приведены зависимости выходного ОСШ многоканальной приемной системы от количества каналов при различном значении масштабирующего коэффициента. Весовая обработка сигнала  $\mathbf{w}_1$  выполнена без учета искажений сигнала и шумов, вызванных взаимным влиянием каналов.

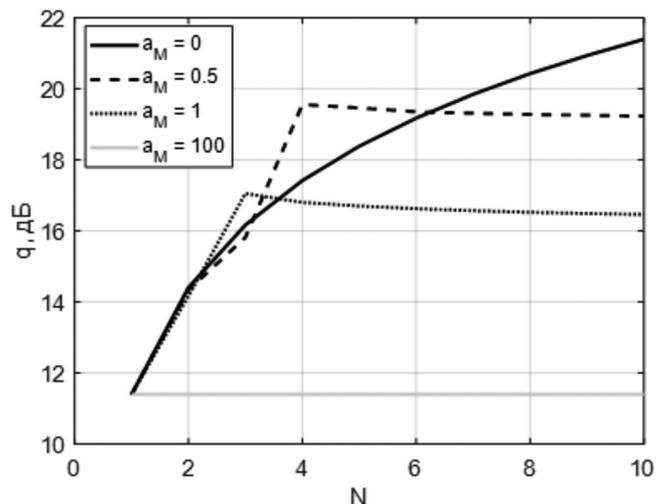
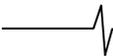


Рис. 1. Зависимость ОСШ на выходе многоканальной приемной системы от числа каналов для весового вектора  $\mathbf{w}_1$



При отсутствии взаимного влияния  $a_M = 0$  увеличение каналов приводит к пропорциональному увеличению выходного ОСШ.

Увеличение количества каналов при фиксированной величине апертуры приводит к увеличению степени взаимного влияния между каналами. Взаимное влияние каналов приемной системы приводит к корреляции шумов антенн и уменьшению эффективности обработки сигналов. В случае сильного взаимного влияния  $a_M \gg 1$  значения внедиагональных элементов матрицы  $Z_A$  стремятся к значениям ее диагональных элементов. Согласование с нагрузочными импедансами  $Z_L$  в данном случае проводится неэффективно. В результате при  $a_M = 100$  выходное ОСШ практически не зависит от количества каналов и равно ОСШ на выходе одноканальной приемной системы.

На рис. 2 приведены зависимости выходного ОСШ многоканальной приемной системы от количества каналов для весового вектора  $w_3$  при тех же значениях шумовых параметров и геометрии антенной системы.

Из зависимостей рис. 2 видно, что применение оптимального весового вектора  $w_3$  позволяет повысить устойчивость многоканальной приемной системы к увеличению степени взаимного влияния каналов. Значение ОСШ на выходе многоканальной приемной системы при  $N > 8$  и  $a_M = 1$  при оптимальной весовой обработке сигнала больше на 2 дБ по сравнению со случаем весового коэффициента  $w_1$ , не учитывающего изменение корреляции сигнала и шума. Это особенно актуально в миниатюрных приемных системах с большим количеством каналов, а также с реконфигурируемой пространственной структурой.

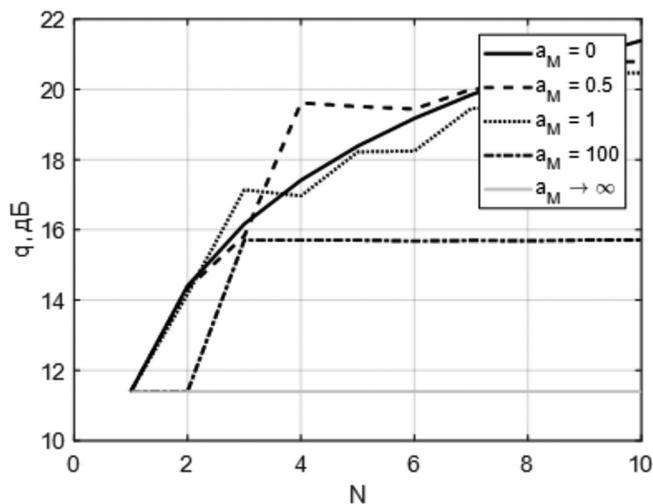


Рис. 2. Зависимость ОСШ на выходе многоканальной приемной системы от числа каналов для весового вектора  $w_3$

На рис. 3 показаны зависимости ОСШ на выходе многоканальной приемной системы от числа каналов для всех перечисленных выше вариантов весовой обработки. При расчетах использовались те же значения шумовых параметров и геометрии антенной системы,  $a_M = 1$ .

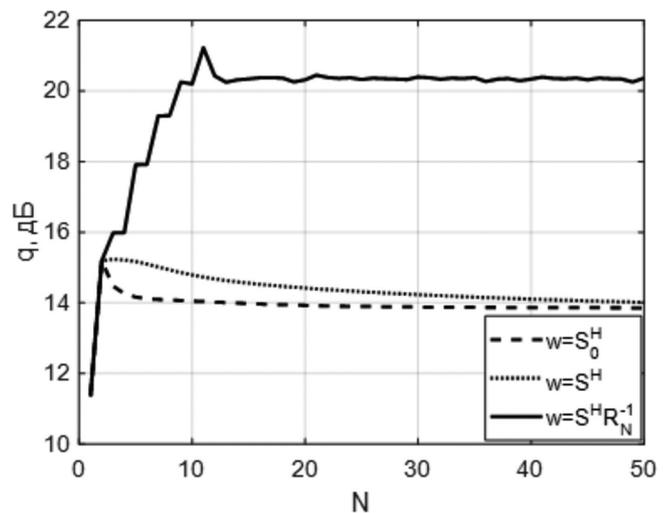


Рис. 3. Зависимость ОСШ на выходе многоканальной приемной системы от числа каналов для различных видов весовой обработки

При малом количестве каналов  $N < 4$  взаимное влияние несущественно из-за большого межэлементного расстояния, поэтому эффективность различных видов обработки одинаковая. При большом количестве каналов приемной системы учет искажений сигнала в весовом векторе  $w_2$  позволяет повысить эффективность обработки сигнала, выходное значение ОСШ больше, чем в случае обработки без учета искажений, на 1 дБ. Однако при дальнейшем увеличении количества каналов при заданной апертуре эффективность обработки сигналов в обоих случаях совпадают и стремятся к некоторому постоянному значению. В случае учета в весовом векторе  $w_3$  искажений шумов и сигнала значение ОСШ на выходе многоканальной приемной системы больше по сравнению с другими рассмотренными случаями на 6 дБ, однако также стремится к некоторому постоянному значению при увеличении числа каналов. Напомним, что в рассмотренных выше случаях размер апертуры антенной системы поддерживалась постоянной  $D/\lambda = 1$ .

#### Зависимость отношения сигнал-шум от размера апертуры

Рассмотрим влияние размера апертуры антенной системы на выходное отношение сигнал-шум. На рис. 4 показаны зависимости ОСШ на выходе многоканальной приемной системы от числа каналов для различных размеров апертуры при  $a_M = 1$ ,  $q_s = 11,4$  дБ и весовом векторе  $w_2$ . Нагрузочный импеданс согласован с импедансом изолированного тонкого вибратора  $Z_L = 73,07 - 42,5j$ . На рис. 5 показаны зависимости ОСШ на выходе многоканальной приемной системы от числа каналов для случая оптимального весового вектора  $w_3$ , учитывающего изменение корреляционных свойств сигнала, а также появление пространственной корреляции шумов за счет взаимного влияния каналов.

Рис. 4, 5 показывают, что увеличение размера апертуры приводит к уменьшению степени взаимного влияния, повышению эффективности приема сигналов. Од-

нако при большом количестве приемных каналов наблюдается рассогласование между элементами антенной системой и МШУ. Ранее было установлено [12], что зависимость диагональных элементов матрицы взаимных импедансов от межэлементного расстояния носит периодический характер, в связи с чем согласование может в некоторых случаях выполняться неточно. В соответствии с этим зависимость выходного ОСШ от числа каналов имеет колебательный характер, что особенно заметно для случая  $D/\lambda = 100$ .

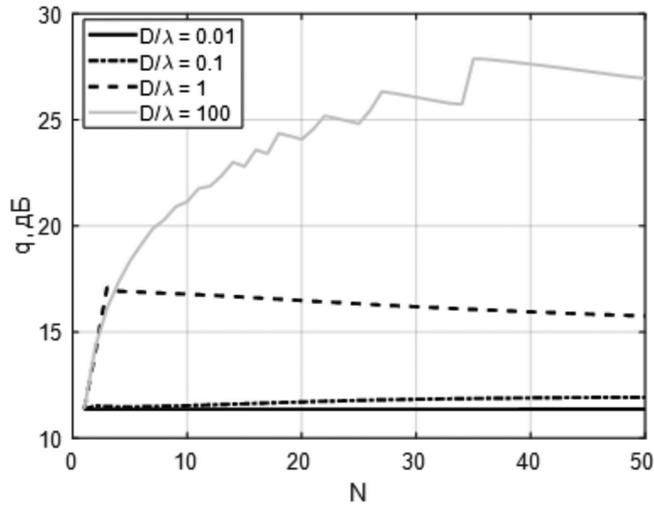


Рис. 4. Зависимость ОСШ на выходе многоканальной приемной системы от числа каналов для весового вектора  $w_2$

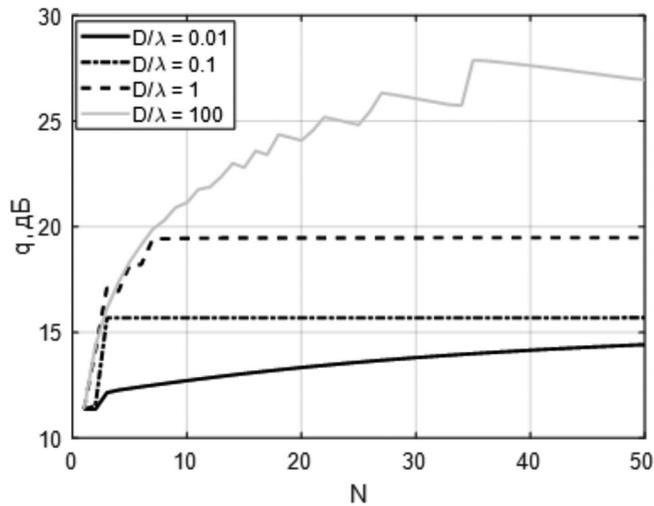


Рис. 5. Зависимость ОСШ на выходе многоканальной приемной системы от числа каналов для весового вектора  $w_3$

На рис. 6 показана зависимость ОСШ на выходе двухканальной  $N = 2$  приемной системы с взаимным влиянием от размера апертуры, на которой располагаются элементы антенной системы. Увеличение степени взаимного влияния каналов приводит к уменьшению ОСШ. Установлено, что максимальная эффективность обработки сигналов наблюдается при расстоянии между элементами антенной системы  $d = 0,66\lambda$ .

На рис. 7 показана зависимость ОСШ на выходе многоканальной  $N = 50$  приемной системы с взаимным влиянием от размера апертуры, на которой эквиди-

стантно располагаются элементы антенной системы. Для удобства сравнения зависимостей, изображенных на рис. 7 и 8, максимальное значение апертуры на графиках выбраны таким образом, чтобы межэлементное расстояние изменялось в одинаковых пределах

$$d = \frac{D}{N-1} = (0, \dots, 0,94)\lambda.$$

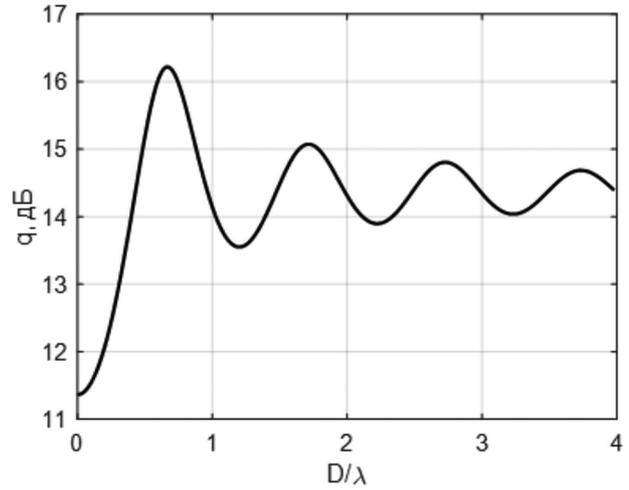


Рис. 6. Зависимость ОСШ на выходе многоканальной приемной системы от размера апертуры,  $N = 2$

При увеличении числа каналов приемной системы изменилась форма зависимости выходного ОСШ от размера апертуры антенной системы. Максимальная величина выходного ОСШ получена при межэлементном расстоянии  $d = 0,94\lambda$ .

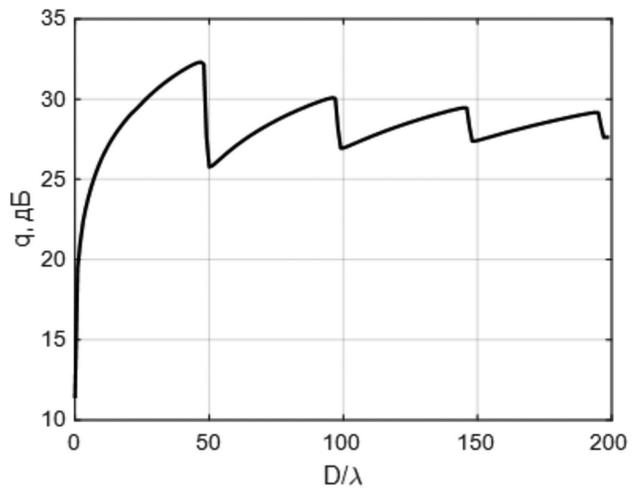


Рис. 7. Зависимость ОСШ на выходе многоканальной приемной системы от размера апертуры,  $N = 50$

### Заключение

Проведенный анализ показал необходимость учета взаимного влияния каналов в многоканальной приемной системе при выборе весового вектора обработки и пространственной структуры системы. В основном увеличение степени взаимного влияния каналов приводит к уменьшению значения ОСШ на выходе многоканальной приемной системы. Учет искажений сигнала и корреляции шумов, вызванных взаимным влиянием, при весовой обработке сигнала позволяет увеличить значение выходного ОСШ.



При сильном взаимном влиянии уменьшается ОСШ на выходе многоканальной приемной системы. В случае предельного увеличения степени взаимного влияния выходное значение ОСШ уменьшается до значения ОСШ в одноканальной приемной системе и не зависит от количества каналов. Уменьшение эффективности обработки связано с значительным рассогласованием между матрицей взаимных импедансов элементами антенной системы и нагрузочным импедансом  $Z_L$  изолированного тонкого вибратора. Возможность повышения эффективности обработки сигналов в многоканальной приемной системе с взаимным влиянием путем оптимизации нагрузочных импедансов установлена в работах [5, 8, 10, 12].

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2020-0003).*

### Литература

1. Сосулин Ю.Г. Оценочно-корреляционная обработка сигналов и компенсация помех / Костров В.В., Паршин Ю.Н. – М.: Радиотехника, 2014. – 632 с.
2. Hannula J., Lehtovuori A., Luomaniemi R., Saari-nen T.O., and Viikari V. Beneficial interaction of coupling and mismatch in a two-antenna system // Proceedings of the 3th European Conference on Antennas and Propagation. – 2019. Vol. EuCAP. – Pp. 1-4.
3. Korogodin I.V., Dneprov V.V. Impact of antenna mutual coupling on WiFi positioning and angle of arrival estimation // Proceedings of Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). – 2018. Pp. 1-6.
4. Parshin Yu.N., Grachev M.V. Efficiency of the angular coordinate estimation under the action of spatially correlated interferences and mutual influence of spatial channels // 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEMW. – 2019. Pp. 1-4.
5. Parshin Yu.N., Grachev M.V. Target detection using optimal load matching and interference nulling // Proceedings of the 19th Inter-national Radar Symposium. – 2018. DGON. – Pp.1-7.
6. Паршин Ю.Н., Колесников С.В., Грачев М.В. Анализ эффективности пространственной обработки сигналов в нелинейном приемном тракте различной архитектуры методом масштабирования // 27-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМи-Ко'2017). – 2017. – № 3. – С. 722-728.
7. Марков Г.Т. Антенны. Учебник для студентов радиотехнических специальностей вузов / Марков Г.Т., Сазонов Д.М. – М.: Энергия, 1975. – 528 с.
8. Warnick K.F., Jensen M.A., Optimal noise matching for mutually coupled arrays // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2007. – Vol. 55. – № 6. – Pp. 1726-1731.
9. Warnick K.F., Jeffs B.D. Gain and aperture efficiency for a reflector antenna with an array feed // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2006. – Vol. 5. – Pp. 499-502.
10. Warnick K.F., Belostotski L., Russer P. Minimizing the noise penalty due to mutual coupling for a receiving array // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2009. – Vol. 57. – № 6. – Pp. 1634-1644.
11. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию. – М.: Радио и связь, 1986. – 448 с.
12. Грачев М.В., Паршин Ю.Н. Сравнительный анализ алгоритмов поиска оптимального значения нагрузочных импедансов многоканальных радиосистем с взаимным влиянием // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2020. – № 73. – С. 10-18.