

РАДИОТЕХНИКА, РАДИОЛОКАЦИЯ И СИСТЕМЫ СВЯЗИ

УДК 621.396.2

**ИССЛЕДОВАНИЕ УГЛОВОГО СПЕКТРА МОЩНОСТИ ШУМОВ
МНОГОКАНАЛЬНОЙ ПРИЕМНОЙ СИСТЕМЫ
С ВЗАИМНЫМ ВЛИЯНИЕМ КАНАЛОВ
И ОПТИМИЗАЦИЕЙ НАГРУЗОЧНЫХ ИМПЕДАНСОВ**

М. В. Грачев, младший научный сотрудник кафедры РТУ РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0003-1725-9257, e-mail: grachev.m.v@rsreu.ru

Ю. Н. Паршин, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой РТУ РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0003-0061-7804, e-mail: parshin.y.n@rsreu.ru

Рассматривается многоканальная приемная система с взаимным влиянием каналов, в которой наблюдаются шумы антенной системы, а также внутренние шумы малошумящих усилителей. Преобразование тепловых шумов в многоканальной приемной системе с взаимным влиянием каналов приводит к возникновению их пространственной корреляции. Для шумового согласования каналов приемной системы с взаимным влиянием проводится оптимизация нагрузочных импедансов численным методом Нелдера – Мида по критерию минимума дисперсии шума. Целью работы является повышение эффективности обработки сигнала на фоне пространственно-коррелированных шумов в многоканальной приемной системе с взаимным влиянием каналов путем оптимизации нагрузочных импедансов. Проведен анализ угловых спектров мощности шумов многоканальной приемной системы с взаимным влиянием каналов при различных конфигурациях приемной системы. Показано, что оптимизация нагрузочных импедансов позволяет уменьшить уровень мощности пространственно-коррелированных шумов.

Ключевые слова: взаимное влияние каналов, метод масштабирования, многоканальная приемная система, оптимизация нагрузочных импедансов, пространственно-коррелированные шумы, угловой спектр мощности.

DOI: 10.21667/1995-4565-2022-82-3-12

Введение

Анализ работ [1, 2] показывает, что использование пространственного ресурса находит все более широкое применение в системах передачи информации. Распространенным подходом при конструировании приемных систем является реконфигурирование ее параметров на различных этапах обработки сигнала [2]. Техническая реализация многоканальных приемных систем во многом определяется размером антенной системы, который имеет тенденцию к уменьшению в современных применениях. Уменьшение размера антенной системы зачастую связано с уменьшением межэлементного расстояния, что, в свою очередь, приводит к появлению в приемной системе межканального электродинамического взаимного влияния, изменяющего характеристики как самой приемной системы, так и наблюдаемого процесса [3, 4].

Существуют различные методы уменьшения взаимного влияния. Большинство из них носит конструктивный характер, то есть их реализация возможна только на этапе конструирования многоканальной приемной системы, что противоречит основной идее реконфигурируемой приемной системы. В работе [5] предложен подход, позволяющий улучшить характеристики многоканальной приемной системы с взаимным влиянием каналов, а также параметры наблюдаемого в ней процесса путем оптимизации нагрузочных импедансов в каждом

канале. Также в работе [5] показано, что оптимизация нагрузочных импедансов позволяет увеличить отношение сигнал-шум на выходе многоканальной приемной системы с взаимным влиянием каналов, уменьшить коэффициент шума этой системы. В данной работе рассматривается изменение пространственных характеристик шумов, наблюдаемых в многоканальной приемной системе с взаимным влиянием, а также их изменение при оптимизации нагрузочных импедансов. **Целью работы** является повышение эффективности обработки сигнала на фоне пространственно-коррелированных шумов в многоканальной приемной системе с взаимным влиянием каналов путем оптимизации нагрузочных импедансов с использованием рассчитанных угловых спектров мощности шумов.

Постановка задачи

В работе рассматривается N -канальная приемная система с взаимным влиянием каналов. Напряжение разомкнутой цепи, создаваемое электромагнитной волной, в многоканальной приемной системе определяется вектором-столбцом $\mathbf{v}_{\text{PC}}$. Взаимное влияние в N -канальной приемной системе может быть охарактеризовано при помощи матрицы взаимных импедансов $\mathbf{Z}_A$ размером $N \times N$. Полагается, что сопротивления нагрузки каналов образуют вектор-столбец $\mathbf{Z}_H$. Как показано в работах [6, 7], матрица взаимных импедансов произвольной N -канальной приемной системы связывает напряжения $\mathbf{v} = \{v_n, n = 1, \dots, N\}$ на входах каналов приемной системы с токами $\mathbf{i} = \{i_n, n = 1, \dots, N\}$, протекающими на входе каждого канала:

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{A11} & Z_{A12} & \cdots & Z_{A1N} \\ Z_{A21} & Z_{A22} & \cdots & Z_{A2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{AN1} & Z_{AN2} & \cdots & Z_{ANN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{\text{PC1}} \\ v_{\text{PC2}} \\ \vdots \\ v_{\text{PCN}} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Уравнение (1) может быть представлено в более компактной векторной и матричной форме. Соотношение между вектором-столбцом напряжений $\mathbf{v}$, вектором-столбцом токов $\mathbf{i}$ и вектором-столбцом напряжений разомкнутой цепи $\mathbf{v}_{\text{PC}}$ в многоканальной приемной системе равно

$$\mathbf{v} = \mathbf{Z}_A \mathbf{i} + \mathbf{v}_{\text{PC}}.$$

Численный электродинамический расчет матрицы взаимных импедансов $\mathbf{Z}_A$ для элементов антенной системы произвольного вида является сложной задачей и производится с использованием специализированных программных средств. Поэтому при проведении исследований многоканальных приемных систем с взаимным влиянием каналов зачастую используют аналитический расчет взаимных импедансов. В работе [8] предложена модель связи между элементами антенной системы на основе изменения масштаба расстояний между элементами некоторой опорной антенной системы.

Для улучшения шумовых характеристик многоканальной приемной системы необходимо согласование малозумящих усилителей (МШУ) с импедансами антенны. В работе [9] предложено и исследовано использование активных импедансов для согласования. Особенно важный результат в теории шумового согласования многоканальных приемных систем на примере антенной решетки с электрическим формированием луча был получен Е.Е.М. Возстенбергом. В своей работе [10] он показал, что для уменьшения шума до минимального значения необходимо согласование усилителя многоканальной приемной системы с активным коэффициентом отражения антенной системы. Шумовое согласование позволяет получить минимальную эквивалентную температуру многоканальной приемной системы.

Согласно теореме Тевенина каналы рассматриваемой многоканальной приемной системы могут быть представлены как последовательно соединенные идеальный источник ЭДС и

внутреннее сопротивление, определяемое элементами матрицы взаимных импедансов $\mathbf{Z}_A$ [11]. Идеальный источник напряжения имеет ЭДС, созданную плоской электромагнитной волной с частотой ω и напряженностью электрического поля E_0 в точке приема. Напряжения идеальных источников в каналах приемной системы могут быть представлены как вектор-столбец $\mathbf{v}_{\text{PC}}$. Напряжение на входе разомкнутой цепи n -го канала связано с электрическим полем в окрестности приемной антенны соотношением [15]:

$$v_{\text{PC}} = \frac{E_0}{j\omega\mu} e_T,$$

где $e_T = 4\pi e^{jkr} \frac{r}{I_0} E(\mathbf{r})$ – нормированная диаграмма направленности антенны n -го канала, $E(\mathbf{r})$ – напряженность электрического поля, создаваемого антенной n -го канала в режиме излучения в точке, задаваемой радиусом-вектором $\mathbf{r} = (r, \gamma)$, при действии в антенне тока I_0 и разомкнутых остальных антенных элементах, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число, μ – магнитная проницаемость среды распространения.

Вектор напряжений $\mathbf{v}_H$ на нагрузочных импедансах $\mathbf{Z}_H = \{R_{Hn} + jX_{Hn}, n = 1, \dots, N\}$ приемных каналов определяется через напряжение на входе разомкнутой цепи $\mathbf{v}_{\text{PC}}$ [12]:

$$\mathbf{v}_H = \mathbf{Z}_H (\mathbf{Z}_A + \mathbf{Z}_H)^{-1} \mathbf{v}_{\text{PC}} = \mathbf{Q} \mathbf{v}_{\text{PC}},$$

где $\mathbf{Q} = \mathbf{Z}_H (\mathbf{Z}_A + \mathbf{Z}_H)^{-1}$.

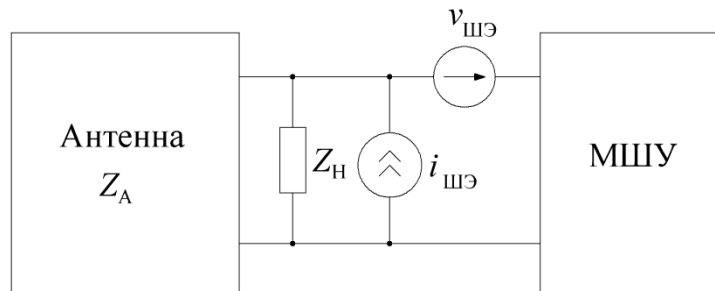


Рисунок 1 – Шумовая модель МШУ одного приемного канала
Figure 1 – LNA noise model for a receiving channel

На рисунке 1 изображена шумовая модель МШУ одного приемного канала. Напряжение шумового источника на входе МШУ равно $\mathbf{v}_{\text{ш}} = \mathbf{G} \mathbf{Z}_A^{-1} \mathbf{v}_{\text{шэ}} + \mathbf{G} \mathbf{i}_{\text{шэ}}$, где $\mathbf{i}_{\text{шэ}} = \{i_{\text{шэ}n}, n = 1, \dots, N\}$, $\mathbf{v}_{\text{шэ}} = \{v_{\text{шэ}n}, n = 1, \dots, N\}$ – ток и напряжение эквивалентных источников шумов на входах МШУ. Коэффициент $\mathbf{G} = \mathbf{Z}_A (\mathbf{Z}_A + \mathbf{Z}_H)^{-1} \mathbf{Z}_H$ имеет размерность сопротивления и осуществляет пересчет всех источников шума в шумовое напряжение на входе МШУ.

Шумовые ток и напряжение на входе МШУ являются коррелированными. Матрица пространственной корреляции шумов, пересчитанных в напряжение на входе МШУ, равна [12]:

$$\mathbf{R}_{\text{МШУ}} = \overline{\mathbf{v}_{\text{ш}} \mathbf{v}_{\text{ш}}^H} = \mathbf{G} (\mathbf{Z}_A^{-1} \mathbf{M}_V \mathbf{Z}_A^{-1H} + \mathbf{Z}_A^{-1} \mathbf{Y}_K \mathbf{M}_V + \mathbf{M}_V \mathbf{Y}_K^H \mathbf{Z}_A^{-1H} + \mathbf{M}_I) \mathbf{G}^H, \quad (2)$$

$\mathbf{Y}_K = \{\overline{i_{\text{шэ}n} v_{\text{шэ}n}} / M_{Vn}, n = 1, \dots, N\}$ – вектор комплексных проводимостей, $\mathbf{M}_V = \overline{\mathbf{v}_{\text{шэ}} \mathbf{v}_{\text{шэ}}^H}$, $\mathbf{M}_I = \overline{\mathbf{i}_{\text{шэ}} \mathbf{i}_{\text{шэ}}^H}$. Корреляционная матрица шумов антенной системы, пересчитанных к входу МШУ, определяется выражением [12]:

$$\mathbf{R}_A = 4k_B T \Delta f \mathbf{G} \text{Re} \mathbf{Z}_A \mathbf{G}^H. \quad (3)$$

где $k_B = 1,38 \times 10^{-23}$ Дж/°К – постоянная Больцмана, T – рабочая температура антенной системы, Δf – полоса рабочих частот.

Пространственные свойства шумов характеризуются их угловым спектром мощности, который определяется по методу Бартлетта следующим выражением [13]:

$$P(\gamma) = \frac{\mathbf{V}_{\text{оп}}(\gamma)^H \mathbf{R}_{\text{ш}} \mathbf{V}_{\text{оп}}(\gamma)}{R_{\text{н}}}, \quad (4)$$

где $\mathbf{R}_{\text{ш}} = \mathbf{R}_{\text{А}} + \mathbf{R}_{\text{МШУ}}$ – комплексная матрица пространственной корреляции исследуемых шумов многоканальной приемной системы с взаимным влиянием каналов,

$\mathbf{V}_{\text{оп}}(\gamma) = \left\{ e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} x_n \sin \gamma}, n=1, \dots, N \right\}$ – опорный вектор, характеризующий идеальную плоскую

волну, распространяющуюся в направлении наблюдения γ , где λ – длина волны, x_n – координаты элементов антенной системы. В случае, когда антенная система является настроенной, эффективность обработки сигнала можно повысить путем минимизации дисперсии выходного шума, которая для случая оптимальной весовой обработки и ограничения $\mathbf{1} \times |\mathbf{V}_{\text{оп}}(\gamma)| = N$ определяется выражением [14]:

$$D_{\text{ш}} = \frac{N^2}{\mathbf{1} \mathbf{R}_{\text{ш}}^{-1} \mathbf{1}^T}, \quad (5)$$

где $\mathbf{1}$ – единичный вектор-строка.

Угловой спектр мощности шумов многоканальной приемной системы с взаимным влиянием каналов

На рисунке 2 представлены результаты анализа углового спектра мощности (4) шумов антенны и МШУ 4-канальной приемной системы с взаимным влиянием и антенными элементами в виде тонких вибраторов, расположенных линейно и эквидистантно на расстоянии $d = 0,5\lambda$ друг от друга. Степень взаимного влияния задается масштабирующим коэффициентом $a_{\text{м}}$. Параметры МШУ равны: шумовое сопротивление $R_{\text{ш}} = 200$ Ом, входное сопротивление МШУ $R_{\text{МШУ}} = 50$ Ом. Шумовые источники МШУ в схеме замещения являются некоррелированными $Y_{\text{к}} = 0$. Полоса рабочих частот $\Delta f = 50$ МГц, рабочая температура антенной системы $T = 300$ К.

Так как входное сопротивление МШУ не совпадает с требуемым нагрузочным импедансом $Z_{\text{н}}$, то предлагается согласование действительной части нагрузочного импеданса с входным импедансом МШУ $R_{\text{МШУ}}$ производить при помощи трансформатора без потерь. Диагональная матрица коэффициентов трансформации всех каналов:

$$\mathbf{K}_{\text{тр}} = \left\{ K_{\text{тр}n} = \sqrt{\frac{R_{\text{МШУ}}}{R_{\text{н}n}}}, n=1, \dots, N \right\},$$

где $R_{\text{н}}$ – действительная часть согласующего импеданса. Для компенсации реактивной составляющей импеданса последовательно на входе трансформатора включено реактивное сопротивление, величина которого $\mathbf{X}_{\text{н}} = \{X(n, n), n=1, \dots, N\}$. Изменяется также взаимный импеданс пространственных каналов со стороны МШУ $\mathbf{Z}_{\text{АТР}} = \mathbf{K}_{\text{тр}}^2 (\mathbf{Z}_{\text{А}} + j\mathbf{X}_{\text{н}})$.

Исследуются угловые спектры для различных вариантов согласования импедансов антенной системы и МШУ:

1) без учета взаимного влияния каналов приемной системы, когда во всех каналах выбраны значения нагрузочных импедансов, необходимые для согласования изолированного тонкого вибратора $Z_{\text{н}} = Z_{\text{А}}^* = 73,1 - j42,5$ Ом; *точечный график*;

2) с учетом взаимного влияния каналов приемной системы и самосогласованием каналов, когда во всех каналах выбраны значения нагрузочных импедансов, необходимые для согласования изолированного тонкого вибратора $Z_H = Z_A^* = 73,1 - j42,5$ Ом, и эти значения не изменяются в процессе функционирования системы; *пунктирный график*;

3) с учетом взаимного влияния каналов приемной системы и оптимизацией вектора нагрузочных импедансов Z_H численным методом Нелдера – Мида по критерию минимума дисперсии шума (5); *сплошной график*.

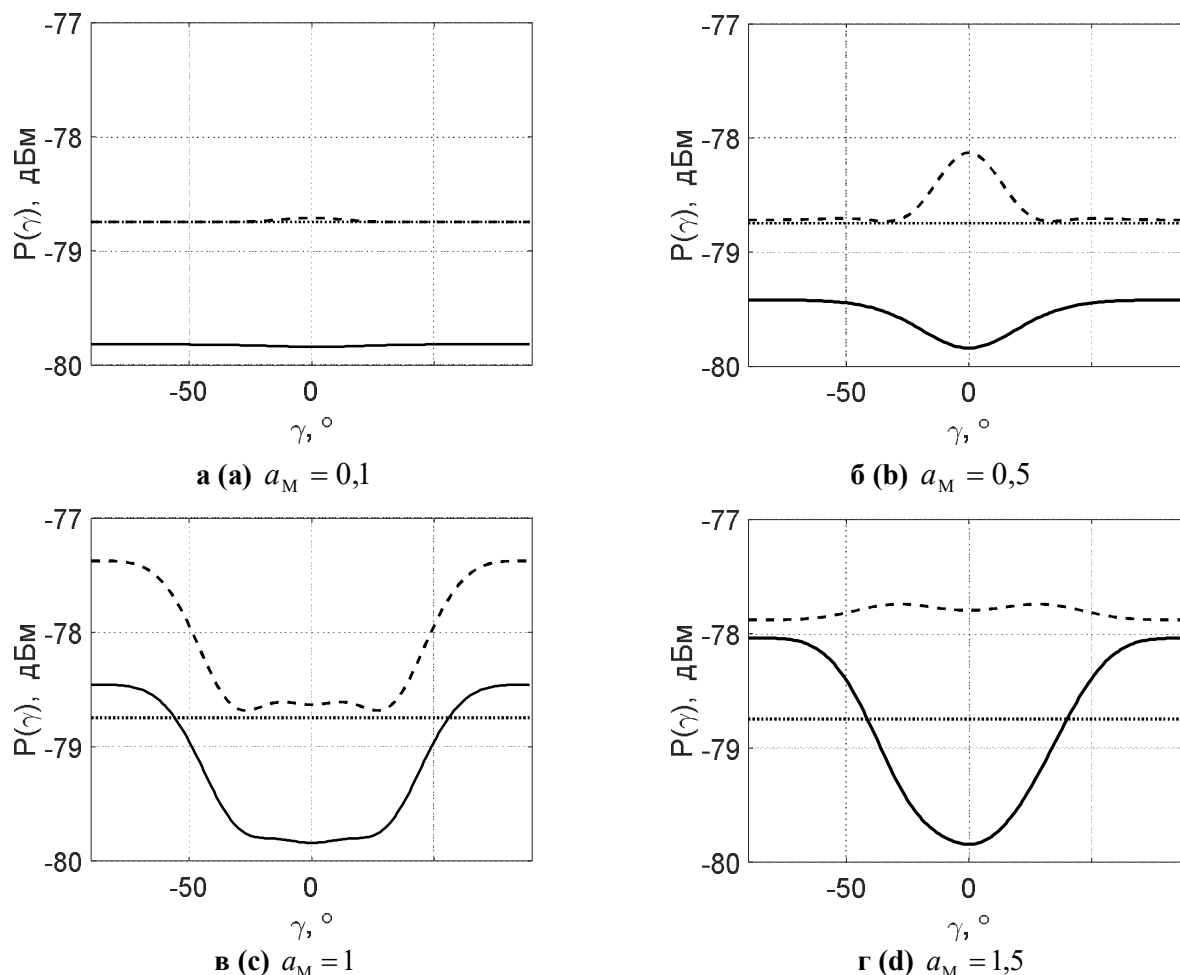


Рисунок 2 – Угловой спектр мощности шумов многоканальной приемной системы с взаимным влиянием каналов при различной величине взаимного влияния
Figure 2 – Noise angular power spectrum of a coupled multi-channel receiving system for different scaling factors

Анализ показанных на рисунке 2 угловых спектров мощности пространственно-коррелированных шумов показывает зависимость мощности шумов на выходе многоканальной приемной системы с взаимным влиянием каналов от угловой координаты. Для сравнения показаны угловые спектры мощности на выходе многоканальной приемной системы без взаимного влияния, имеющие равномерное распределение мощности шумов в исследуемом угловом секторе (точечный график). Взаимное влияние каналов приемной системы приводит к появлению пространственной корреляции шумов, наблюдающейся на графиках угловых спектров мощности в виде виртуальных помех, имеющих определенное направление прихода, ограниченную протяженность и мощность. Уровень помех при сильном взаимном влиянии превышает уровень некоррелированных шумов на 0,9...1,3 дБ. При сильном взаимном влиянии наблюдается увеличение количества виртуальных помех и расширение углового сектора, занимаемого помехой. Для уменьшения уровня мощности виртуальных помех про-

водится оптимизация нагрузочных импедансов. Выигрыш, получаемый при оптимизации нагрузочных импедансов, увеличивается с увеличением степени взаимного влияния, при $a_M = 1,5$ составляет 0,9...2 дБ по сравнению со случаем самосогласования.

Практическое значение имеет исследование вклада шумов антенной системы и шумов МШУ в общий уровень шумов многоканальной приемной системы с взаимным влиянием каналов. На рисунке 3 представлены угловые спектры мощности только шумов антенной системы. Для их расчета в выражении (4) в качестве комплексной матрицы пространственной корреляции используется выражение (3) $\mathbf{R}_{Ш} = \mathbf{R}_A$.

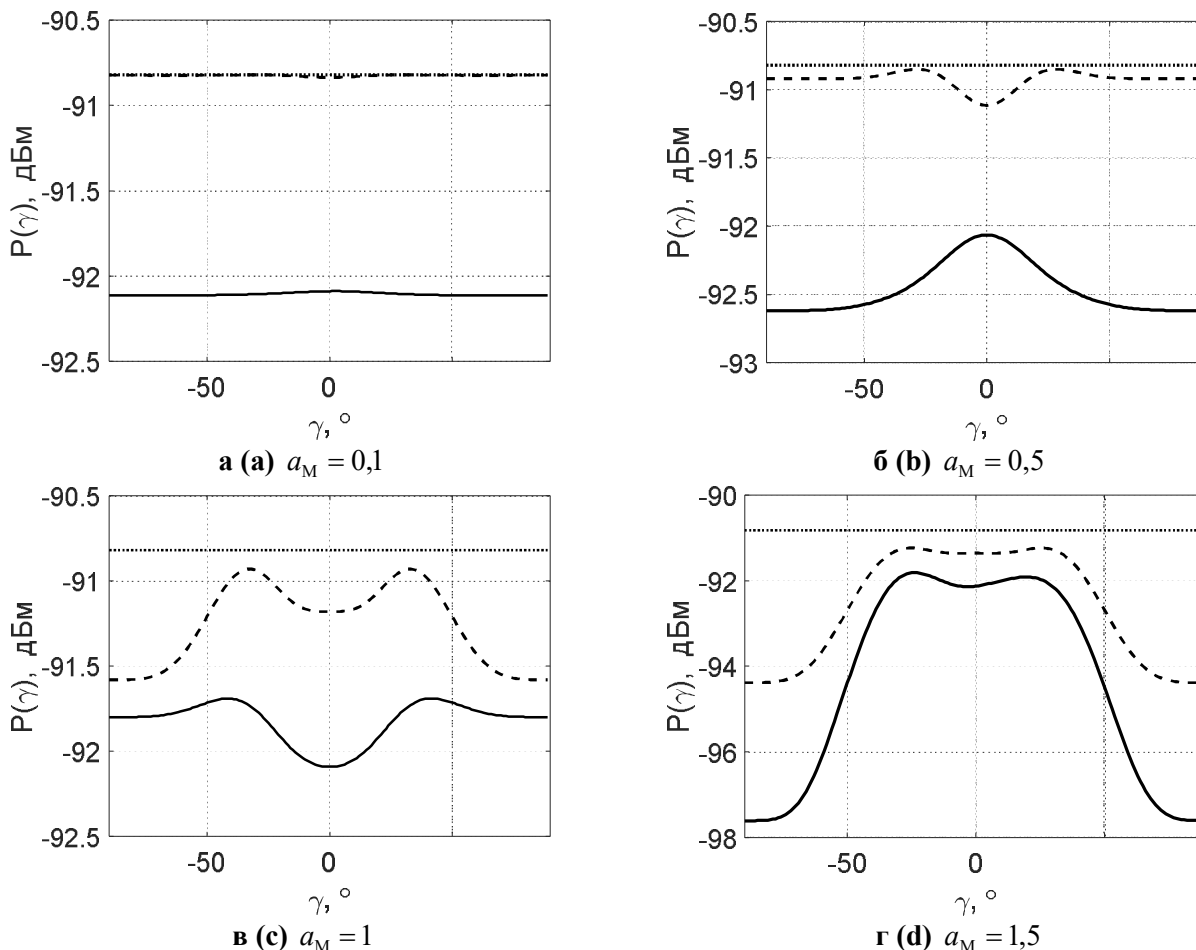


Рисунок 3 – Угловой спектр мощности шумов антенной системы при различной величине взаимного влияния
Figure 3 – Antenna system noise angular power spectrum of a coupled multi-channel receiving system for different scaling factors

Построенные графики углового спектра мощности показывают, что в антенной системе с взаимным влиянием мощность шума уменьшается на 0,1...0,8 дБ по сравнению с антенной системой без взаимного влияния. Это связано с ухудшением излучающих свойств элементов антенной системы вследствие влияния соседних элементов, что приводит к уменьшению сопротивления излучения антенны, уровня шумов. Оптимизация нагрузочных импедансов позволяет уменьшить мощность шумов на 0,1...2 дБ по сравнению со случаем самосогласования.

На рисунке 4 представлены угловые спектры мощности только шумов МШУ, полученные в результате подстановки корреляционной матрицы (2) в выражение (4) $\mathbf{R}_{Ш} = \mathbf{R}_{МШУ}$.

Угловые спектры мощности, изображенные на рисунке 4, показывают, что взаимное влияние каналов приемной системы увеличивает мощность шумов МШУ на 0,5...1,5 дБ. Сравнение графиков рисунков 3 и 4 показывает, что мощность шумов МШУ при заданных шумовых параметрах больше на 11,8 дБ мощности шумов антенной системы без взаимного влия-

ния, поэтому изменение корреляционных свойств шумов МШУ оказывает основное влияние на угловой спектр мощности шумов многоканальной приемной системы.

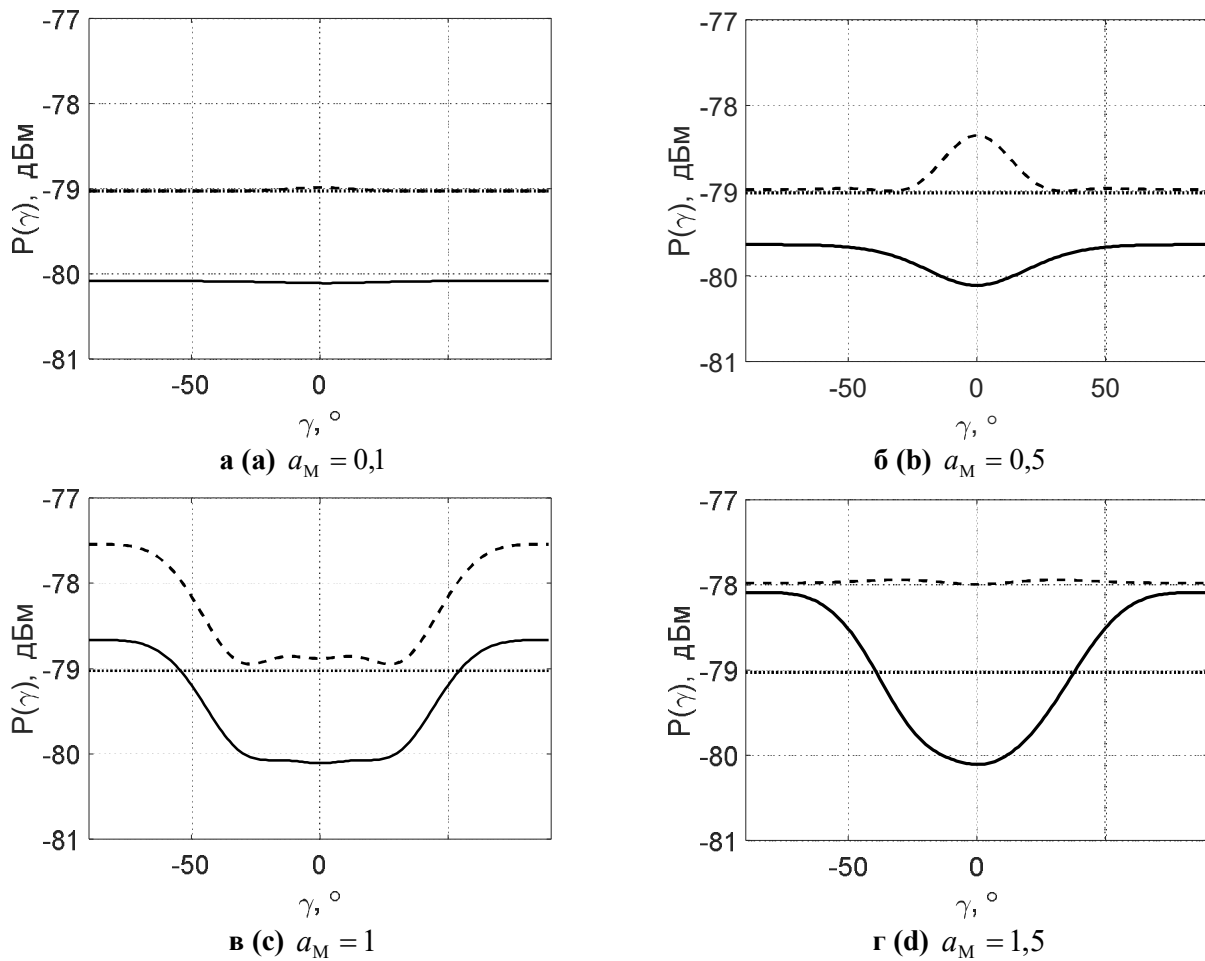
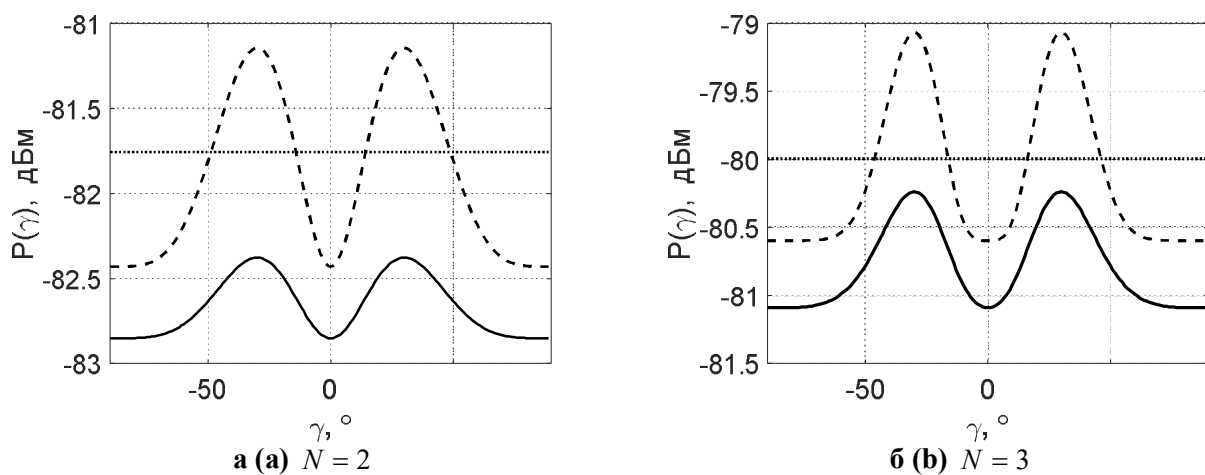


Рисунок 4 – Угловой спектр мощности шумов МШУ при различной величине взаимного влияния
Figure 4 – LNA noise angular power spectrum
of a coupled multi-channel receiving system for different scaling factors

Изменение шумовых параметров и параметров антенной системы приводит к изменению корреляционных свойств исследуемых шумов, их соотношения. На рисунке 5 показаны угловые спектры мощности шумов многоканальной приемной системы при различном значении числа каналов. Антенная система является линейной и эквидистантной с межэлементным расстоянием $d/\lambda = 1$, масштабирующий коэффициент равен $a_M = 1,5$.



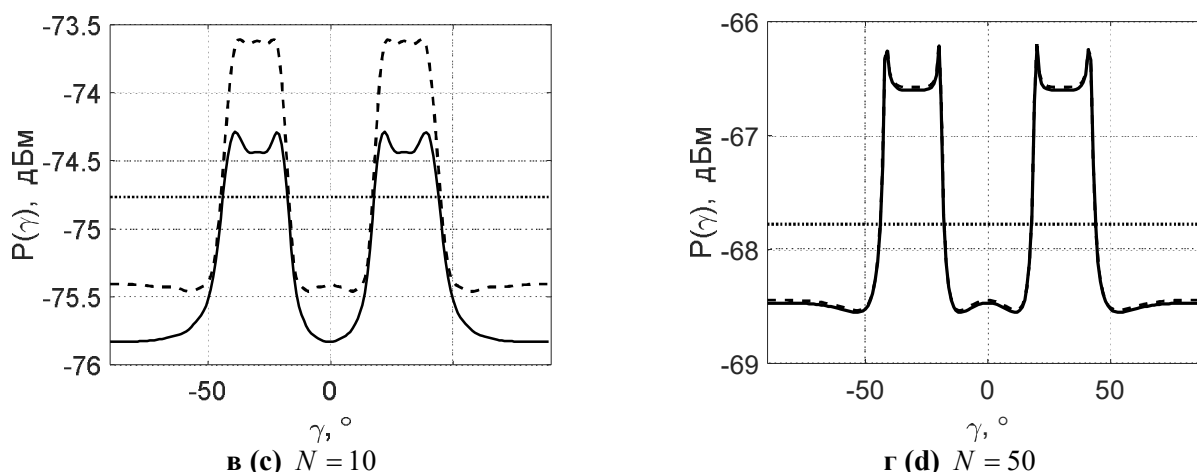


Рисунок 5 – Угловой спектр мощности шумов многоканальной приемной системы с взаимным влиянием каналов при различном числе каналов
Figure 5 – Noise angular power spectrum of a coupled multi-channel receiving system for different number of channels

Анализ полученных зависимостей показывает, что взаимное влияние каналов приемной системы может приводить как к увеличению, так и уменьшению мощности шумов по сравнению с многоканальной приемной системой без взаимного влияния. Это связано с перетеканием шумов в соседние каналы через элементы антенной системы. Амплитуда и фаза этих шумов определяется недиагональными элементами матрицы взаимных импедансов, которые зависят от конфигурации элементов антенной системы, используемого типа антенных элементов, их конструкции. Увеличение числа каналов приводит к увеличению числа виртуальных помех, наблюдаемых в угловом спектре мощности, увеличению их мощности на 7 дБ при $N = 50$ по сравнению с многоканальной приемной системой с $N = 2$. Вычислительная эффективность оптимизации нагрузочных импедансов уменьшается при увеличении N , так как пропорционально увеличивается сложность оптимизационной задачи.

Заключение

Анализ угловых спектров мощности помех и шумов показал, что шумы на выходе многоканальной приемной системы становятся коррелированными, в спектре появляются виртуальные помехи с конечной мощностью и протяженностью по угловой координате. При увеличении степени взаимного влияния каналов происходит увеличение количества виртуальных помех, расширение области, занимаемой каждой помехой в отдельности. Их уровень при сильном взаимном влиянии превышает уровень некоррелированных шумов на 0,9...1,3 дБ. Для уменьшения мощности виртуальных помех предложена оптимизация нагрузочных импедансов, которая позволяет уменьшить уровень мощности пространственно-коррелированных шумов на 0,9...2 дБ.

На количество виртуальных помех, наблюдаемых в угловом спектре мощности шумов многоканальной приемной системы с взаимным влиянием каналов, существенное влияние оказывают параметры МШУ и параметры используемой антенной системы. Увеличение числа каналов приводит к увеличению числа виртуальных помех, увеличению их мощности, уменьшению вычислительной эффективности оптимизации нагрузочных импедансов.

Проведенные исследования доказали, что конфигурирование многоканальной приемной системы необходимо производить с учетом взаимного влияния пространственных каналов на угловой спектр мощности шумов. Выбор антенной системы, метода ее технической реализации зависит от поставленной задачи, выбранного критерия качества и технических ограничений, накладываемых на проектируемую многоканальную приемную систему. Достижению данной цели способствуют результаты, полученные в данной работе, позволяющие уменьшить взаимное влияние между каналами приемной системы путем оптимизации нагрузочных импедансов.

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

Библиографический список

1. **Zheng K., Ou S., Yin X.** Massive MIMO channel models: A survey. International Journal of Antennas and Propagation. 2014, vol. 2, pp. 1-10.
2. **Bird T. S.** Mutual coupling between Antennas by Trevor S. Bird (Editor). John Wiley & Sons, Ltd, 2021. 480 p.
3. **Svendsen S. C., Gupta I. J.** The effect of mutual coupling on the nulling performance of adaptive antennas. IEEE Antennas and propagation magazine. 2012, vol. 54, no. 3, pp. 17-38.
4. **Паршин Ю. Н., Гусев С. И., Фролов И. И. и др.** Влияние взаимных импедансов элементов антенной решетки на эффективность пространственной обработки сигналов. Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2017. № 2 (60). С. 17-26.
5. **Паршин Ю. Н., Грачев М. В.** Многоэтапная реконфигурируемая обработка сигналов в пространственно распределенной радиосистеме. Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2019. № 67. С. 3-10.
6. **Сазонов Д. М.** Антенны и устройства СВЧ: Учебник для радиотехнических специальностей вузов. М.: Высш. шк., 1988. 432 с.
7. **Gupta I., Ksienski A.** Effect of mutual coupling on the performance of adaptive arrays. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1983, vol. 31, no. 5, pp. 785-791.
8. **Грачев М. В., Паршин Ю. Н.** Анализ характеристик пространственно-коррелированных шумов в многоканальной приемной системе с взаимным влиянием. Сборник научных трудов 30-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2020), г. Севастополь. 2020. Т. 2. С. 94-95.
9. **Craeye C., Parvais B., Dardenne X.** MoM simulation of signal-to-noise patterns in infinite and finite receiving antenna arrays. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2004, vol. 52, pp. 3245-3256.
10. **Woestenburg E. E. M.** Noise matching in dense phased arrays. Technical Representation RP-083, ASTRON. 2005, pp. 1634-1644.
11. **Kildal P. S.** Equivalent circuits of receive antennas in signal processing arrays. Microwave and Optical Technology Letters. 1999, vol. 21, no. 4, pp. 244-246.
12. **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, no 6, pp. 1634-1644.
13. **Воскресенский Д. И., Гостюхин В. Л., Максимов В. М. и др.** Антенны и устройства СВЧ: Учебник под ред. Д. И. Воскресенского. М.: МАИ, 1993. 528 с.
14. **Монзинго Р. А., Миллер Т. У.** Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию: пер. с англ. М.: Радио и связь, 1986. 448 с.
15. **Maaskant R.** Analysis of Large Antenna Systems – Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2010. 273 p. DOI: 10.6100/IR674892.

UDC 621.396.2

RESEARCH OF THE NOISES' ANGULAR POWER SPECTRUM IN A MULTI-CHANNEL RECEIVING SYSTEM WITH MUTUAL COUPLING AND LOAD IMPEDANCES' OPTIMIZATION

M. V. Grachev, junior researcher, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0003-1725-9257, e-mail: grachev.m.v@rsreu.ru

Yu. N. Parshin, Dr. Sc. (Tech.), full professor, Department of Radio Engineering Devices, Head of the Department, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0003-0061-7804, e-mail: parshin.y.n@rsreu.ru

The article considers a multi-channel receiving system with channel mutual coupling where antenna system external noises as well as low-noise amplifier internal noises are observed. Thermal noise changes in multichannel receiving system with mutual channel coupling leads to their spatial correlation. For noise

matching in receiving system channels load impedances are optimized by numerical Nelder-Mead method according to the criterion of minimum noise variance. **The aim of the article** is to increase the efficiency of signal processing in the presence of spatially correlated noise in a coupled multichannel receiving system by optimizing load impedances. The research of noise angular power spectra in a coupled multichannel receiving system for various configurations of a receiving system is carried out. The optimization of load impedances is shown to be capable to reduce the power of spatially correlated noise.

Key words: mutual coupling, scaling method, multichannel receiving system, load impedances matching, space-correlated noises, angular power spectrum.

DOI: 10.21667/1995-4565-2022-82-3-12

References

1. **Zheng K., Ou S., Yin X.** Massive MIMO channel models: A survey. *International Journal of Antennas and Propagation*. 2014, vol. 2, pp. 1-10.
2. **Bird T. S.** *Mutual coupling between Antennas by Trevor S. Bird (Editor)*. John Wiley & Sons, Ltd, 2021. 480 p.
3. **Svendsen S. C., Gupta I. J.** The effect of mutual coupling on the nulling performance of adaptive antennas. *IEEE Antennas and propagation magazine*. 2012, vol. 54, no. 3, pp. 17-38.
4. **Parshin Yu. N., Gusev S. I., Frolov I. I. et al.** Vliyanie vzaimnykh impedansov elementov antennoj reshetki na effektivnost' prostranstvennoy obrabotki signalov. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radio-tehnicheskogo universiteta*. 2017, no. 2 (60), pp. 17-26. (in Russian).
5. **Parshin Yu. N., Grachev M. V.** Mnogoetapnaya rekonfiguriruemaya obrabotka signalov v prostranstvenno raspredelennoj radiosisteme. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2019, no. 67, pp. 3-10. (in Russian).
6. **Sazonov D. M.** *Antenny i ustrojstva SVCH: Uchebnik dlya radiotekhnicheskikh special'nostej vuzov* (Antennas and microwave devices: A textbook for radio engineering specialties of universities). Moscow: Vyssh. shk. 1988. 432 p. (in Russian).
7. **Gupta I., Ksienski A.** Effect of mutual coupling on the performance of adaptive arrays. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1983, vol. 31, no. 5, pp. 785-791.
8. **Grachev M. V., Parshin Yu. N.** Analiz harakteristik prostranstvenno-korrelirovannykh shumov v mnogokanal'noj priemnoj sisteme s vzaimnym vliyaniem. *Sbornik nauchnykh trudov 30-j Mezhdunarodnoj Krymskoj konferencii «SVCH-tehnika i telekommunikacionnye tekhnologii» (CriMiCo'2020)*. 2020, vol. 2, pp. 94-95. (in Russian).
9. **Craeye C., Parvais B., Dardenne X.** MoM simulation of signal-to-noise patterns in infinite and finite receiving antenna arrays. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2004, vol. 52, pp. 3245-3256.
10. **Woestenburg E. E. M.** Noise matching in dense phased arrays. *Technical Representation RP-083, ASTRON*. 2005, pp. 1634-1644.
11. **Kildal P. S.** Equivalent circuits of receive antennas in signal processing arrays. *Microwave and Optical Technology Letters*. 1999, vol. 21, no. 4, pp. 244-246.
12. **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, no 6, pp. 1634-1644.
13. **Voskresensky D. I., Gostyukhin V. L., Maksimov V. M. et al.** *Antenny i ustrojstva SVCH: Uchebnik pod red. D. I. Voskresenskogo* (Antennas and microwave devices: Textbook, ed. D. I. Voskresensky). Moscow: MAI. 1993. 528 p. (in Russian).
14. **Monzingo R. A., Miller T. W.** *Adaptivnye antennye reshetki: vvedenie v teoriyu* (Adaptive antenna arrays: an Introduction to theory). Moscow: Radio i svyaz'. 1986. 448 p. (in Russian).
15. **Maaskant R.** *Analysis of Large Antenna Systems – Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven*. 2010, 273 p. DOI: 10.6100/IR674892.