

**К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ АВТОКОМПЕНСАТОРА
АКТИВНЫХ ШУМОВЫХ ПОМЕХ ПРИ ПРОСТРАНСТВЕННОМ ПЕРЕМЕЩЕНИИ
ПОМЕХОПОСТАНОВЩИКА**

Фитасов Евгений Сергеевич

доктор технических наук, доцент кафедры радиотехники радиофизического факультета
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского» (ННГУ)¹.
E-mail: fitasoves@mail.ru.

Насонов Василий Васильевич

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиотехнического вооружения ФГКОУ ВО
«Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны» Министерства обороны
Российской Федерации (ЯВВУ ПВО)².
E-mail: patriot457@mail.ru.

Гусева Юлия Сергеевна

ассистент кафедры радиотехники радиофизического факультета ФГАОУ ВО
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского» (ННГУ)¹.
E-mail: yulia@ipmras.ru.

Козлов Сергей Александрович

ассистент кафедры радиотехники радиофизического факультета ФГАОУ ВО
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского» (ННГУ)¹.
E-mail: kozlsergei@yandex.ru.

¹Адрес: 603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.

²Адрес: 150001, г. Ярославль, Московский пр., 28.

Аннотация: Для реальных условий работы радиолокационных систем характерна нестационарная помеховая обстановка, которая существенно ограничивает применение известных методов компенсации активных шумовых помех, позволяющих успешно разрабатывать системы для стационарной помеховой обстановки. Нестационарность может быть обусловлена целым рядом факторов, таких как перемещение радиолокационных объектов наблюдения, а также перемещение локатора на подвижном объекте. В данной ситуации необходимо учитывать и компенсировать несоответствие параметров весовых коэффициентов автокомпенсатора пространственному положению диаграммы направленности антенны и источника помехи. В настоящей работе приведён алгоритм линейной интерполяции коэффициентов настройки автокомпенсации шумовых активных помех, приведены результаты моделирования алгоритма интерполяции для трёхканального компенсатора с непосредственным обращением корреляционной матрицы помех. Также установлен угол перемещения помехопостановщика, при котором коэффициент подавления помехи снижается до нуля. Результатом использования алгоритма линейной интерполяции весовых коэффициентов может стать рост коэффициента подавления в среднем на 5–10 дБ.

Ключевые слова: радиолокационные системы, активные шумовые помехи, автокомпенсаторы помех, интерполяция весовых коэффициентов.

Одним из широко применяемых видов помех радиолокационным системам различного назначения являются активные шумовые помехи [1]. Наличие помех в каналах приёма радиолокационной системы существенно затрудняет, а

в ряде случаев может сорвать решение задач по радиолокационному обнаружению, измерению координат и сопровождению воздушных объектов. Поэтому помехозащищённость является важной задачей, от решения которой за-

висит работоспособность радиолокационной системы [2, 3]. Применение фазированных антенных решёток (ФАР) и средств цифровой обработки сигналов позволило радиолокационным станциям (РЛС) вести одновременное наблюдение за значительным числом воздушных целей, удалённых на различные расстояния и выполняющих полёт на различных высотах и скоростях. Однако процесс радиолокационного наблюдения существенно затрудняется в условиях ведения радиолокационной борьбы, например постановкой преднамеренных помех [4, 5]. На этапах обнаружения, захвата и сопровождения воздушных целей наиболее вероятными преднамеренными помехами для радиолокационных систем являются активные многоточечные помехи, которые могут быть маскирующими и имитирующими, и действовать как по основному, так и по боковым лепесткам диаграммы направленности (ДН) антенны. Маскирующие помехи затрудняют обнаружение, либо полностью подавляют сигнал РЛС, а имитирующие помехи приводят к перегрузке вычислительной системы РЛС. В связи с этим в существующих РЛС приняты меры по защите от многоточечных по пространству помех, так называемых локальных помех.

Одним из направлений в борьбе с многоточечными помехами является формирование провалов (нулей) ДН антенны РЛС по направлению к постановщику помех (ПП), реализуемое либо при помощи адаптивных ФАР, либо широко применяемых автокомпенсаторов помех (АКП) [6].

Однако наличие в РЛС АКП, принимаемых по боковым лепесткам ДН антенны, не гарантирует эффективную работу (защиту от помех), если изменяется число, мощность и вид помеховых колебаний, скачкообразное изменение несущей частоты с программной перестройкой рабочей частоты, сканирования ДН антенны при запомнившихся (выставленных) весовых коэффициентах, а также перемещение в пространстве ПП относительно ДН РЛС [7]. Перемещение в пространстве помехопостановщика, а также радиолокационных объектов

наблюдения, связанное с динамикой их движения или перемещение локатора на подвижном объекте можно охарактеризовать одним из основных факторов нестационарности сигнально-помеховой обстановки. Нестационарность может вызываться также режимом обзора радиолокационной системы, так как в процессе обзора изменяются угловые соотношения между лучом антенны и ПП, а, следовательно, и угловое положение нулей диаграммы направленности относительно максимума основного лепестка. Это означает, что нестационарность связана с эффектом несоответствия параметров весовых коэффициентов АКП пространственному положению диаграммы направленности антенны и источника помехи, связанным с вращением антенны радиолокационной системы (т. н. «устаревание» параметров весовых коэффициентов АКП).

Рассмотрим воздействие активной шумовой помехи (АШП), созданной одним ПП, на приёмное устройство, состоящее из антенн и приёмных трактов основного и компенсационных каналов. Будем считать, что каналы приёмных трактов некоррелированы. Помеха и собственный шум представляют собой гауссовский шум. Настройка весовых коэффициентов w осуществляется перед этапом начала излучения и приёма полезного сигнала.

Предполагаем, что одномерная ФАР, состоящая из N излучателей (линейка фазовращателей), расположенных на расстоянии dA друг от друга, в любой момент времени t принимает k помеховых колебаний суммарной мощностью 60 дБ относительно собственного шума приёмного устройства, составляющего 4 дБ.

Таким образом, принятое антенной решёткой (АР) колебание y можно записать в комплексном виде [8]:

$$y_t = \sum_{i=1}^k H_i S_{it} + n_t, \quad (1)$$

где H_i – n -вектор комплексных усилений АР для i -го ПП; n_t – вектор внутренних шумов; S_{it} ($i = 1, k$) – комплексная амплитуда колеба-

ния от i -го ПП в момент t .

Как известно, принцип действия АКП основан на вычитании из помехи в основном канале её оценки, формируемой как функция от значений помехи в компенсационных каналах. При этом в качестве адаптивной оценки вектора w , обеспечивающего, например, минимум выходной мощности

$$\sigma_{\text{exit}}^2 = \langle |z(t) - w^H x(t)|^2 \rangle \quad (2)$$

и имеющего оптимальное значение $w_{\text{opt}} = R_{xx}^{-1} R_{xz}$, может быть рассмотрено решение \hat{w} , минимизирующее эмпирический риск

$$\sigma_{\text{exit}}^2 = \sum |z(t_i) - w^H x(t_i)|^2. \quad (3)$$

Это решение в соответствии с [1–3] может быть представлено в виде

$$\hat{w} = \hat{R}_{xx}^{-1} \hat{R}_{xz}; \quad \hat{R}_{xx} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K x(t_i) x^H(t_i); \quad (4)$$

$$\hat{R}_{xz} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K z(t_i) x(t_i); \quad \langle \hat{R}_{xx} \rangle = R_{xx}; \quad \langle \hat{R}_{xz} \rangle = R_{xz} \quad (5)$$

Здесь $z(t_i)$ – сигнал на выходе основного (защищаемого) канала в момент t ; $x(t_i)$ – M -мерный вектор выходных сигналов компенсационных каналов; $w(t_i)$ – M -мерный оптимизируемый вектор ВК АКП; K – объем обучающей выборки (ООБ); R_{xx} – выборочная корреляционная матрица (КМ) сигналов компенсационных каналов размером $M \times M$; R_{xz} – M -мерный вектор взаимной корреляции основного и компенсационных каналов; H – надстрочный индекс, обозначающий сопряжение по Эрмиту.

В качестве выборочной КМ при $K \geq M$ обычно используется максимально правдоподобная оценка. В теории адаптивных антенных решёток в общем случае имеют дело с выборочной КМ размером $N \times N$, где N – число элементов АР. Энергетические потери при применении КМ \hat{R} вместо R не превышают 3 дБ, если объём $K \geq 2N$. Так как N может быть достаточно велико, то и ООБ будет большим.

На рис. 1 приведена схема автокомпенсатора

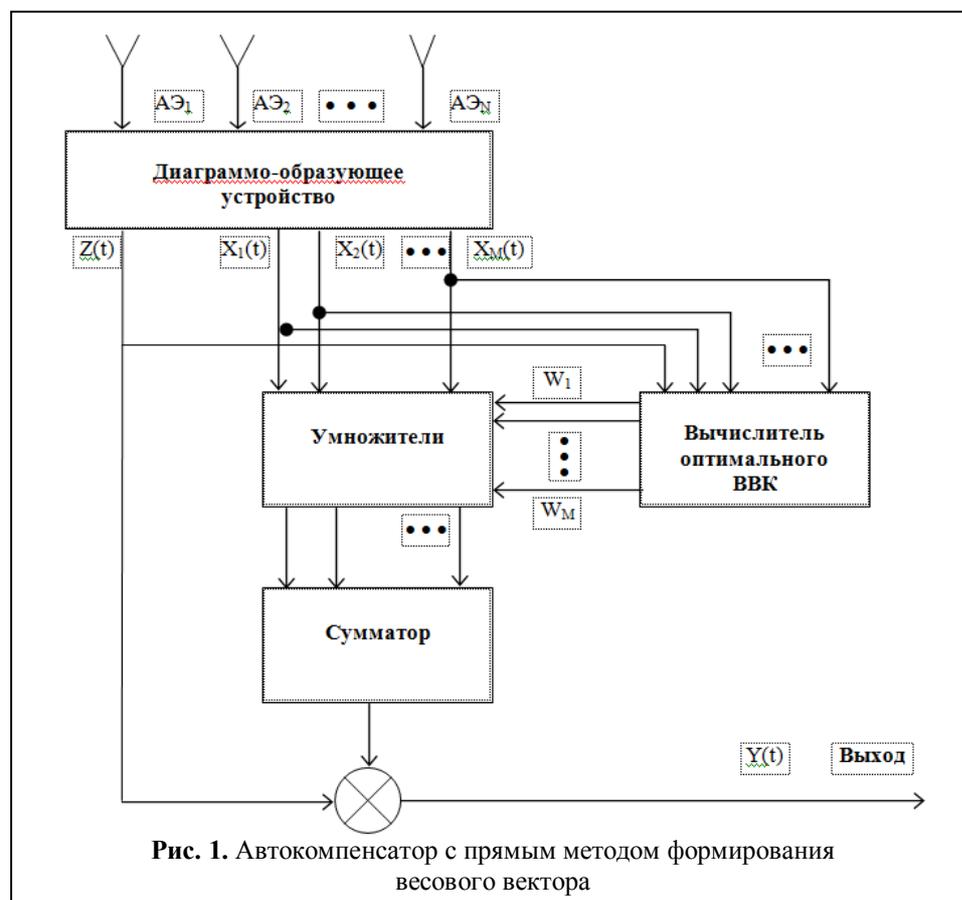


Рис. 1. Автокомпенсатор с прямым методом формирования весового вектора

с использованием прямого метода формирования весового коэффициента.

По выражениям (1)–(5) построена математическая модель одноканального компенсатора помех с непосредственным обращением корреляционной матрицы помех.

Результат моделирования показан на рис. 2, где представлена зависимость входного и выходного колебания помехи, а также собственный шум автокомпенсатора помех. По оси X от-

ложены продискретизированные отсчёты дальности отражённых эхо-сигналов (k , кванты). Максимальный результат работы АКП достигается при полном подавлении колебания помехи до уровня собственных шумов, что отражено на рис. 2.

Весовой коэффициент, рассчитанный по выражению (4), формируется на этапе анализа помеховой обстановки и режима выбора рабочей частоты. Однако вследствие перемещения в пространстве помехопостановщика запомнившийся весовой коэффициент «устаревает». Данное обстоятельство подтверждают результаты моделирования.

На рис. 3–5 представлены семейства графиков величин $U_{вх}$ и $U_{вых}$ от перемещения помехового колебания на угол $\theta_{скан}$. Из приведённых графиков следует, что вследствие перемещения ПП эффективность работы АКП ухудшается, так как снижается коэффициент подавления (если при $\theta_{скан} = 0^\circ$ $K_{под} = 27$ дБ, то при $\theta_{скан} = 1^\circ$ $K_{под} \approx 5$ дБ). Этому событию способствует запомнившийся (выставленный) весовой коэффициент w .

На рис. 6 показана зависимость коэффициента подавления помехи от угла перемещения постановщика. Видно что, при перемещении ПП на угол, соответствующий 1/3 диаграммы направленности антенны, коэффициент подавления помехи снижает-

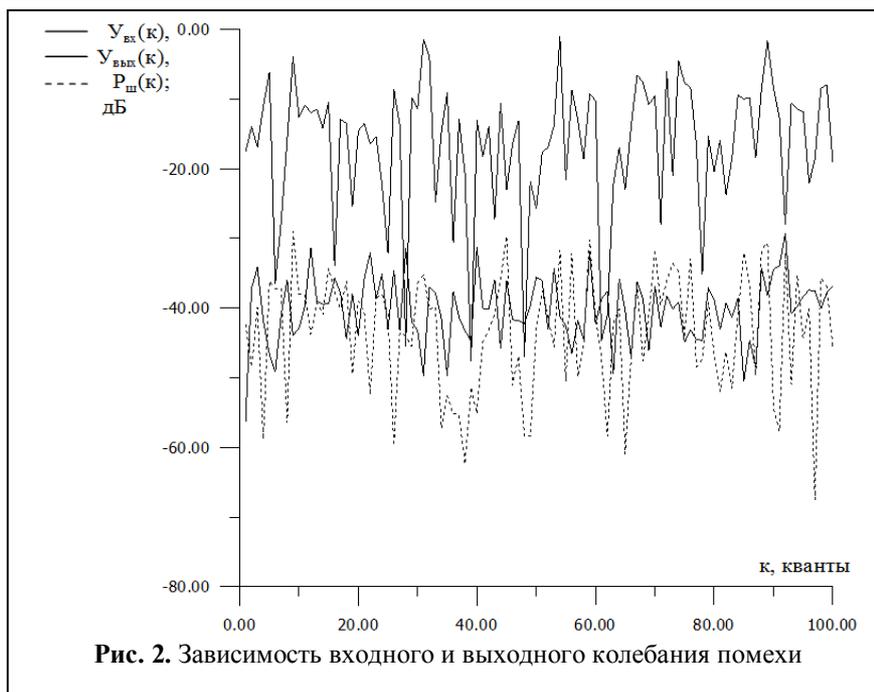


Рис. 2. Зависимость входного и выходного колебания помехи

ся до нуля.

Возникает необходимость периодического обновления вектора весового коэффициента w . Это значит, что на протяжении всей дистанции нужно прекращать этап излучения и приёма

полезного сигнала, открывать приёмный тракт компенсационных каналов и настраивать АКП, т.е. «выставлять» весовой коэффициент. Данный способ можно охарактеризовать как метод

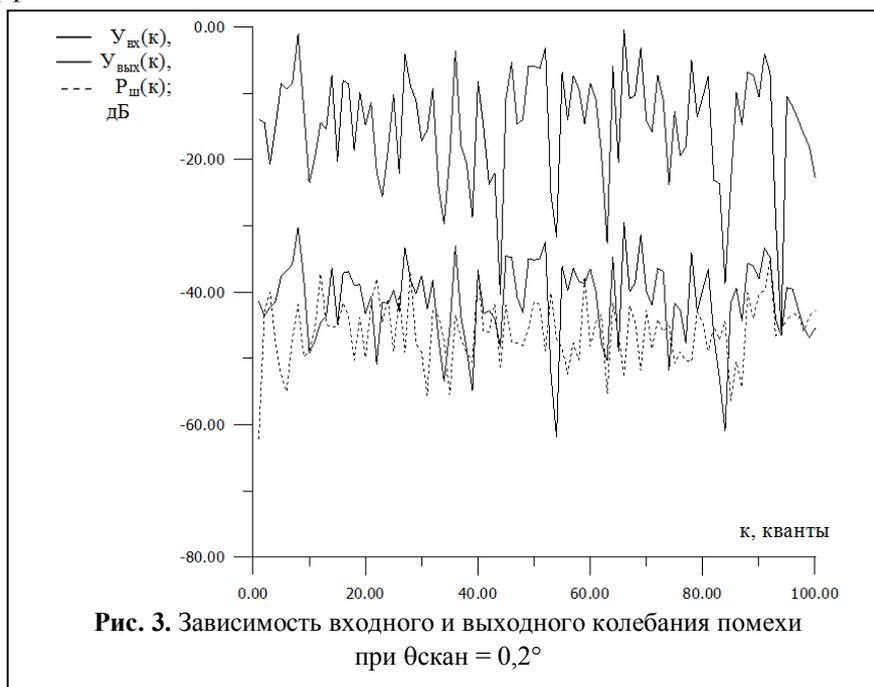


Рис. 3. Зависимость входного и выходного колебания помехи при $\theta_{скан} = 0,2^\circ$

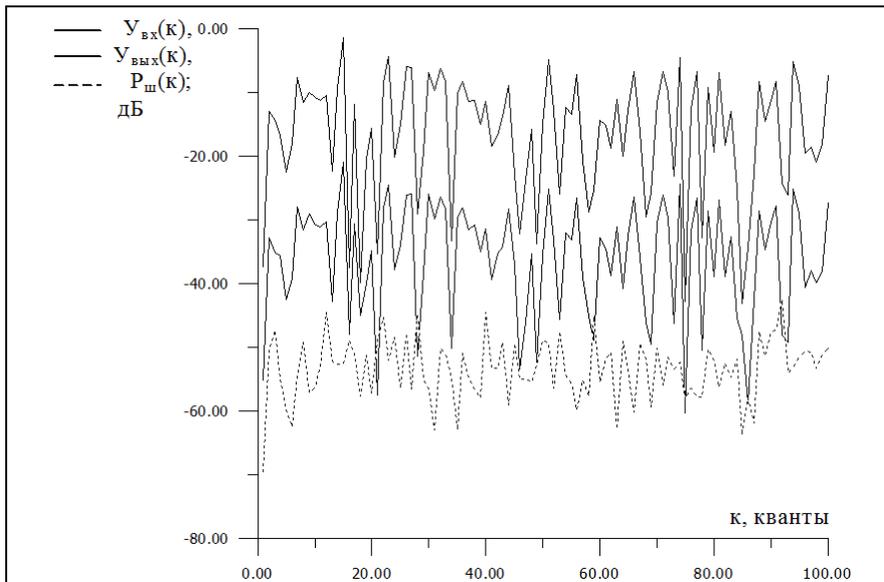


Рис. 4. Зависимость входного и выходного колебания помехи при $\theta_{\text{скан}} = 0,6^\circ$

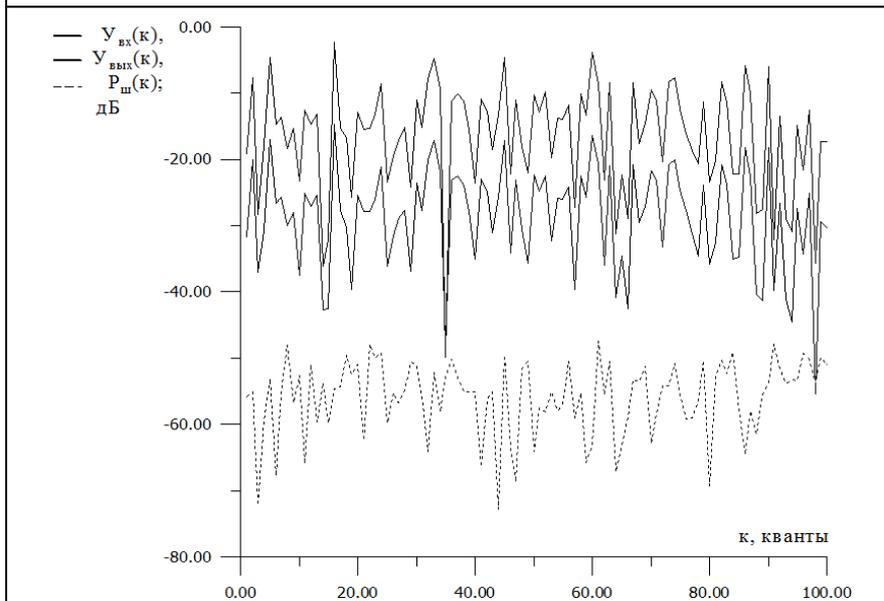


Рис. 5. Зависимость входного и выходного колебания помехи при $\theta_{\text{скан}} = 1^\circ$

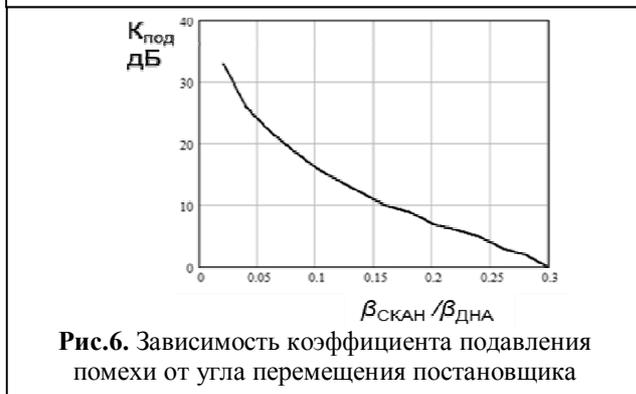


Рис.6. Зависимость коэффициента подавления помехи от угла перемещения постановщика

скользящего окна настройки АКП. Это приведёт к улучшению работы АКП, но при этом будет нарушена пространственно-временная обработка сигнала.

Добиться обновления весового коэффициента можно при использовании интерполяции весовых коэффициентов [9, 10]. В настоящей работе рассматривается процедура линейной интерполяции.

Пусть работа РЛС осуществляется по следующей временной диаграмме (рис. 7): 1 этап – анализ помеховой обстановки и выбор рабочей частоты; 2 этап – излучение полезного сигнала, приём и компенсация помехи. Эти этапы соответствуют одному такту дальности работы РЛС. На втором такте работы РЛС будет также реализовано два аналогичных этапа и т.д.

В 1 такте на 1 этапе весовые коэффициенты W_1 настраиваются и запоминаются. Излучается и принимается полезный сигнал на 2 этапе. Далее во 2 такте происходит очередная настройка и запоминание весовых коэффициентов W_2 . Чтобы скомпенсировать помеху в первой рабочей зоне, необходимо из весового коэффициента W_2 вычесть весовой коэффициент W_1 и разделить на весь интервал рабочей зоны D .

$$\Delta W = \frac{|W_2 - W_1|}{D} \quad (6)$$

Способ 1. Полученную разницу весов («весовую добавку») необходимо умножить на количество отсчетов настройки i и прибавить к весовому коэффициенту $W1$:

$$W = W_1 + \Delta W \cdot i. \quad (7)$$

Способ 2. Полученную разницу весов необходимо умножить на количество отсчетов настройки $i/2$ и прибавить к весовому коэффициенту $W1$ до середины рабочей зоны $D/2$, а после середины рабочей зоны умножить на следующие $i/2$ отсчетов в обратном порядке (от i до $i/2$) и прибавить уже к весовому коэффициенту $W2$:

$$\begin{cases} W = W_1 + \Delta W \cdot i/2, D \leq D/2 \\ W = W_2 + \Delta W \cdot i/2, D > D/2 \end{cases} \quad (8)$$

В результате полученных выражений построим математическую модель автокомпенсатора, учитывающую «весовую добавку» при условии воздействия многоточечных помех.

Пусть на одномерную фазированную антенную решётку приходят колебания активных шумовых помех от различных ПП с различных угловых направлений. Количество помехопостановщиков $N_{пп} = 3$, мощность каждого ПП $P_{пп} = 60$ дБ, азимуты ПП $\beta_{1пп} = 8^\circ$, $\beta_{2пп} = 12^\circ$, $\beta_{3пп} = 15^\circ$, вид помехи – АШП.

На рис. 8 и 9 представлены кривые зависимостей входного и выходного колебания помехи при различном значении угла перемещения $\theta_{скан}$ и выходного колебания помехи с «весовой добавкой».

Результаты показывают, что при различном перемещении ПП в про-

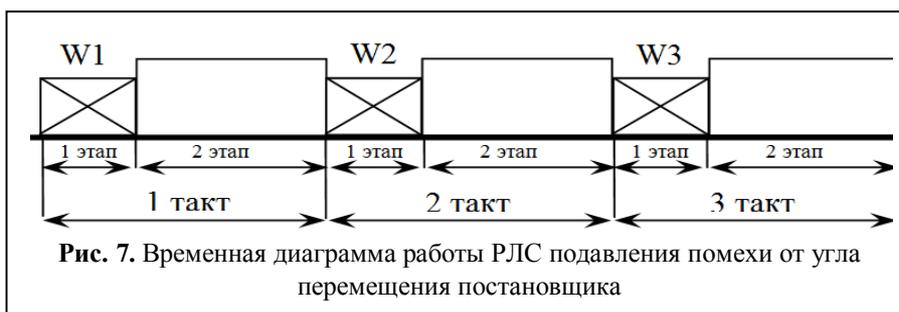


Рис. 7. Временная диаграмма работы РЛС подавления помехи от угла перемещения постановщика

странстве АКП с «весовой добавкой» подавляет помеховый сигнал до уровня собственных шумов приёмного тракта основного канала.

На рис. 10 показана ДН антенны РЛС основного канала, адаптивная ДН, адаптивная ДН с «весовой добавкой» при воздействии трёх ПП с различных азимутальных направлений. Из рис. 10 видно, что без применения «весовой добавки» компенсация помех ухудшается.

На рис. 11 показаны результаты моделирования зависимости коэффициента подавления АШП ($K_{под}$) от величины интервала между служебными зонами для рассматриваемого случая (количества служебных зон) по отношению к ширине диаграммы направленности антенны основного канала: без линейной интерполяции ВК (кривая 1), с линейной интерполяцией ВК, выполненной 1 способом (кри-

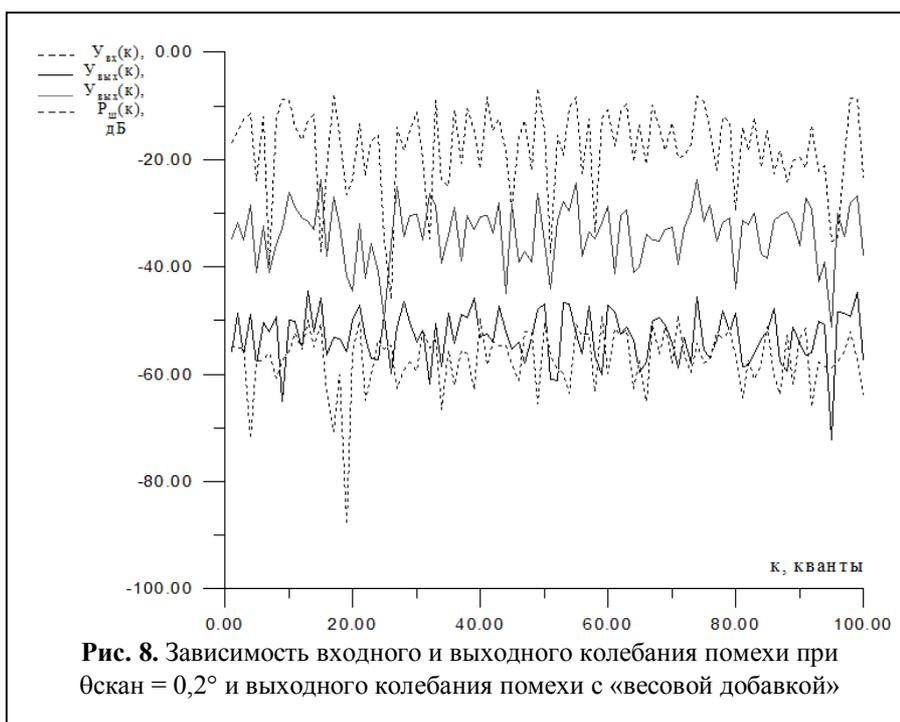


Рис. 8. Зависимость входного и выходного колебания помехи при $\theta_{скан} = 0,2^\circ$ и выходного колебания помехи с «весовой добавкой»

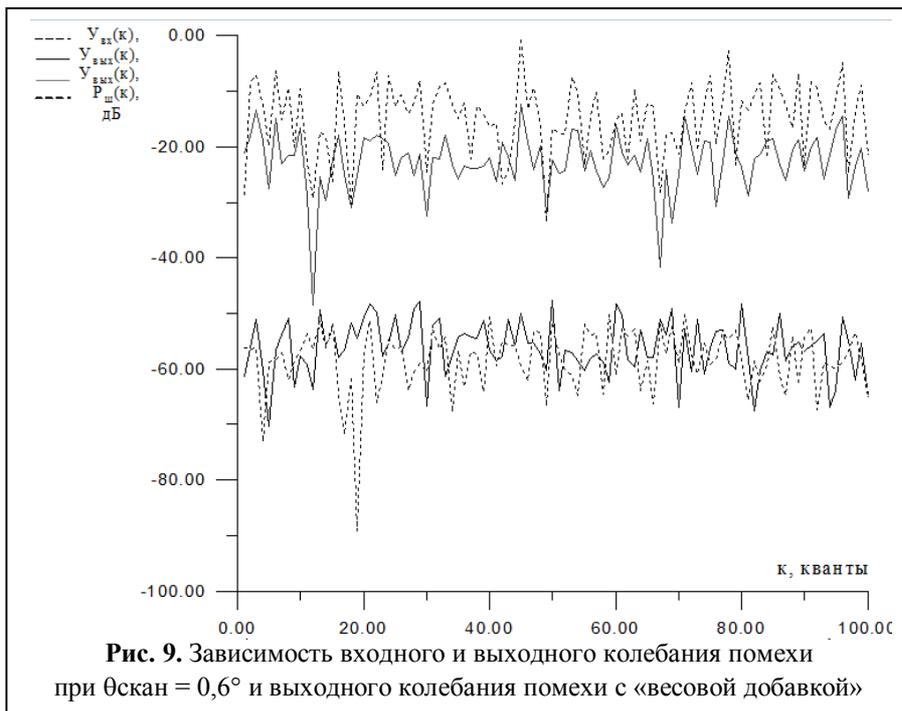


Рис. 9. Зависимость входного и выходного колебания помехи при $\theta_{скан} = 0,6^\circ$ и выходного колебания помехи с «весовой добавкой»

антенны основного канала по уровню минус 3 дБ; $\beta_{сз}$ – интервал между служебными зонами.

Как видно из рис. 11, без использования процедуры линейной интерполяции весовых коэффициентов коэффициент подавления АШП в среднем не превышает 15 дБ. Использование процедуры линейной интерполяции весовых коэффициентов позволяет увеличить коэффициент подавления АШП в среднем с 5 до 15 дБ.

вая 2) и выполненной 2 способом (кривая 3), где $\beta_{дна}$ – ширина диаграммы направленности

эффективность работы РЛС в условиях активных шумовых помех зависит от способов и методов

Таким образом, эф-

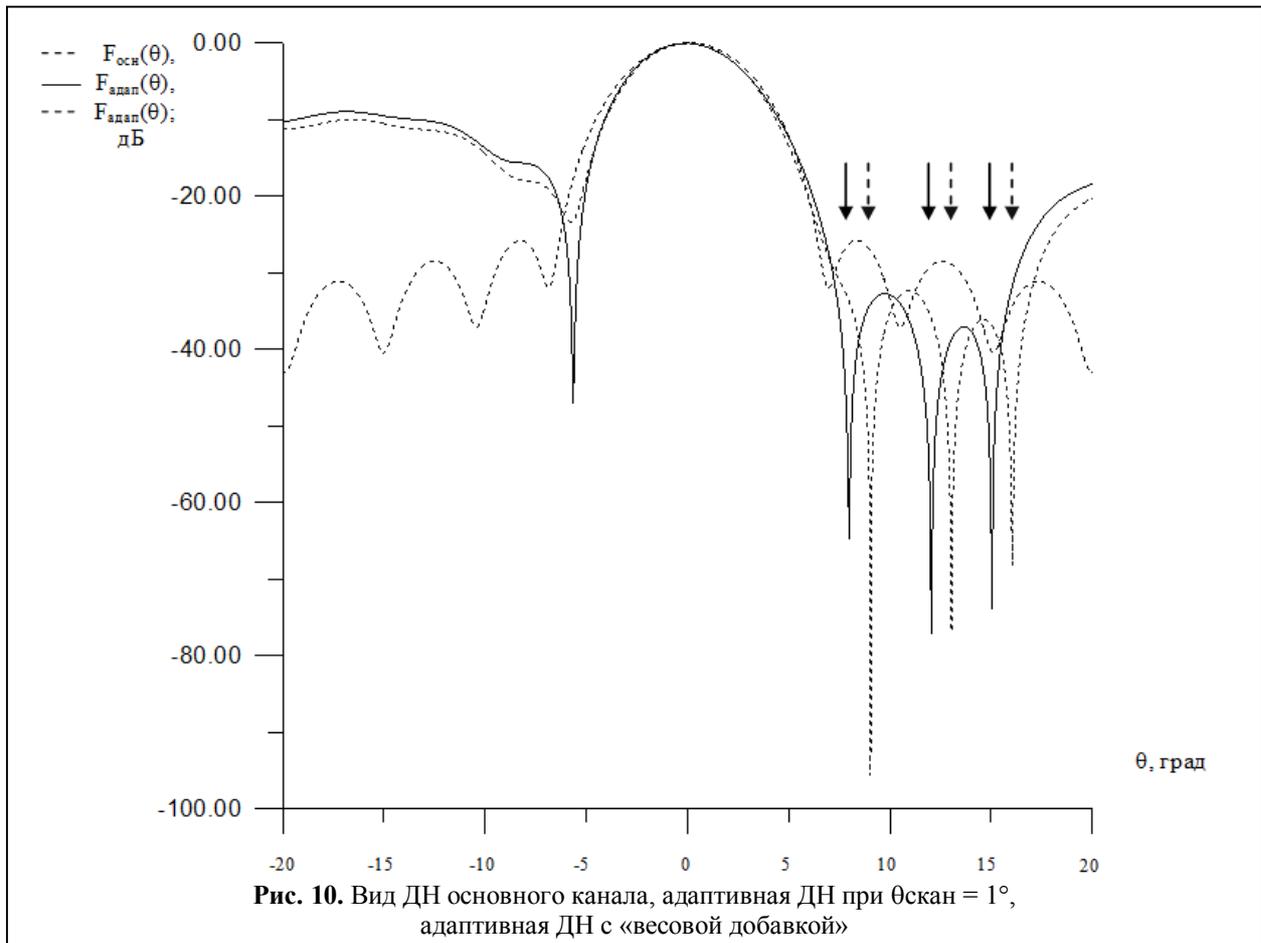


Рис. 10. Вид ДН основного канала, адаптивная ДН при $\theta_{скан} = 1^\circ$, адаптивная ДН с «весовой добавкой»

защиты. Построение системы защиты РЛС от АШП и параметры качества её работы во многом определяются характеристиками ДН антенной системы. Применение автокомпенсаторов с непосредственным обращением корреляционной матрицы помех позволяет получить более высокий коэффициент подавления, но для их применения необходима программная реализация с использованием ЭВМ высокой разрядности.

Применение «весовой добавки» позволяет повысить эффективность работы АКП при перемещении ПП в течение одного такта дальности, что подтверждают результаты математического моделирования.

Литература

1. Максимов М.В., Бобиев М.П., Кривицкий Б.Х., Горгонов Г.И., Степанов Б.М., Шустов Л.Н., Ильин В.А. Защита от радиопомех // Под ред. М.В. Максимова. М.: Сов. Радио. 1976. 496 с.
2. Алексеев Д.Ю., Гвоздев А.Б. Состояние и перспективы развития радиолокационного вооружения ПВО СВ // Вооружение, политика, конверсия. 2012. № 4. С. 45–48.
3. Соколов А.В. Вопросы перспективной радиолокации. М.: Изд. Радиотехника, 2003. 512 с.
4. Защита радиолокационных систем от помех. Состояние и тенденции развития / Под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова. М.: Радиотехника. 2003. 416 с.
5. Борисов Е.Г., Евдокимов В.И. Высокоточное оружие и борьба с ним. Учеб. пособие. СПб.: Изд. Лань, 2013. 496 с.

Поступила 4 апреля 2019 г.

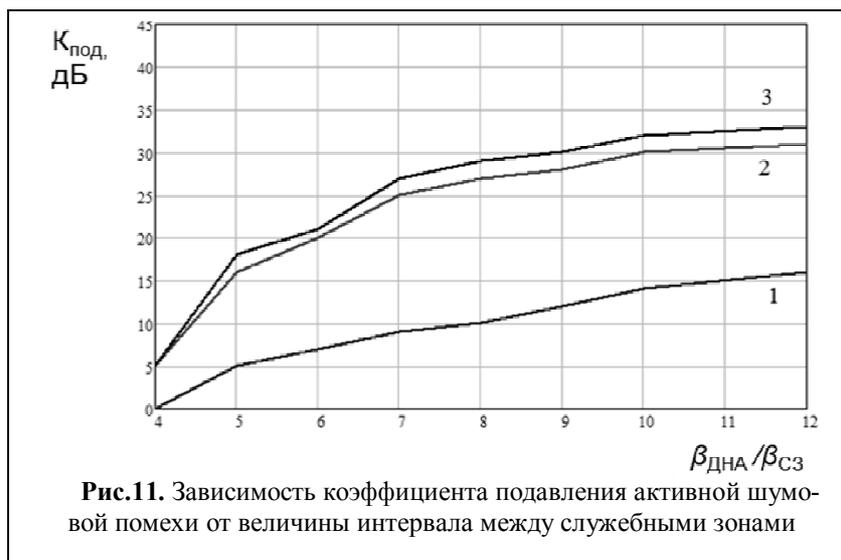


Рис. 11. Зависимость коэффициента подавления активной шумовой помехи от величины интервала между служебными зонами

6. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решётки: Введение в теорию. М.: Радио и связь, 1986. 448 с.

7. Ермолаев В.Т. Эффективность методов адаптивной обработки сигналов в многоэлементных антенных решётках / Ермолаев В.Т. [и др.] // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2014. Вып. 3. С. 15–19.

8. Лосев Ю.И., Бердников А.Г., Гойхман Э.Ш., Сизов Б.Д. Адаптивная компенсация помех в каналах связи // Под ред. Ю.И. Лосева. М.: Радио и связь, 1988. 209 с.

9. Насонов В.В., Журавлев И.В., Фитасов Е.С. Разработка адаптивных алгоритмов компенсации помех для многофункциональных обзорных радиолокационных станций в условиях воздействия декоррелирующих факторов и нестационарной помеховой обстановки: Монография. Ярославль. Изд-во ЯГПУ им Ушинского, 2014. 154 с.

10. Фитасов Е.С., Козлов С.А., Василенко Е.В., Насонов В.В. Повышение эффективности автокомпенсации шумовых активных помех в радиолокационных станциях малой дальности // Вестник концерна ПВО «Алмаз-Антей». 2013. №1 (9). С. 45–49.

English

ON EFFICIENCY EVALUATION OF ACTIVE NOISE JAMMING AUTOCOMPENSATOR WITH JAMMER MOVING OVER DISTANCE

Evgeniy Sergeyevich Fitasov – Doctor of Engineering, Associate Professor, Radio Engineering Department, Radio Physics Faculty, Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod – National Research University (UNN)¹.

E-mail: fitasoves@mail.ru.

Vasily Vasilyevich Nasonov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Radioelectronic Weapons Department, Yaroslavl Air Defence Military Academy².

E-mail: patriot457@mail.ru.

Yulia Sergeevna Guseva – Assistant Lecturer, Radio Engineering Department, Radio Physics Faculty, Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod – National Research University (UNN)¹.

E-mail: yulia@ipmras.ru.

Sergey Alexandrovich Kozlov– Assistant Lecturer, Radio Engineering Department, Radio Physics Faculty, Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod – National Research University (UNN)¹.

E-mail: kozlsergei@yandex.ru.

¹*Address:* 603950, Nizhny Novgorod, Gagarin Ave., 23.

²*Address:* 150001, Yaroslavl, Moskovskiy Ave., 28.

Abstract: The known methods of active noise jamming compensation enable to successfully develop radar systems for stationary jamming environment. However, in real-life operating conditions of radar systems it comes to deal with non-stationary jamming environment, which is due to a number of factors. One of the key factors of non-stationarity is relocation of radar surveillance objects as well as the radar relocation in mobile object. Non-stationarity is also due to radar scanning mode, since angular correlations between the antenna beam and the jammer change during scanning mode, and, hence, the angular position of pattern zero relative to the main lobe maximum. This means that non-stationarity is related to discrepancy effect between weight coefficient parameters of the autocompensator and spatial position of the antenna pattern and noise source, mainly due to the rotation of radar antenna (so-called. "obsolescence" of weight coefficient parameters of the autocompensator). Thus, there arises a need for periodic refreshing of weight coefficient vector. The article presents linear interpolation algorithm of autocompensation tuning coefficients for noise active jamming, and simulation results of interpolation algorithm for three-channel compensator with direct converse of jamming correlation matrix, as long as there is multipoint jamming effect. Jamming suppression rate dependence on the jammer movement angle was obtained with the aid of the developed mathematical model. It is shown that jamming suppression rate goes down to zero when moving the jammer to the angle equivalent to 1/3 of the antenna pattern. The simulation results demonstrated that the ratio of active noise jamming suppression does not exceed 15 dB on the average without using linear interpolation of weight coefficients. Using the procedure of linear interpolation of weight coefficients can increase the suppression ratio by 5–10 dB on average.

Keywords: radar systems, active noise jamming, jamming autocompensators, weight coefficient interpolation.

References

1. *Maksimov M.V., Bobiev M.P., Krivitsky B.H., Gorgonov G.I., Stepanov B.M., Shustov L.N., Ilyin V.A.* Protection against radio jamming. Ed. by *V.M. Maksimov*. Moscow: Sov. Radio. 1976. 496 p.
2. *Alekseev D.Yu., Gvozdev A.B.* Status and development trends of Air Defence radar systems in the Ground Forces. Armament, policy, conversion. 2012. No. 4. Pp. 45–48.
3. *Sokolov A.V.* Issues of promising radar detection. Moscow: Publ. H. Radio engineering, 2003. 512 p.
4. Radar system antijamming protection. Status and development trends. Ed. by *A.I. Kanashenkov and V.I. Merkulov*. Moscow: Radio Engineering. 2003. 416 p.
5. *Borisov E.G., Evdokimov V.I.* Precision weapons and combatting it. Manual. Saint-Petersburg: Publ. H. Lan, 2013. 496 p.
6. *Monzingo R.A., Miller T.U.* Adaptive antenna arrays: Introduction to the theory. Transl. from English. Moscow: Radio and communication, 1986. 448 p.
7. *Yermolaev V.T.* Method efficiency of adaptive signal processing in multi-element antenna arrays. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2014. Iss. 3. Pp. 15–19.
8. *Losev Yu.I., Berdnikov A.G., Goikhman E.Sh., Sizov B.D.* Adaptive compensation of communication channel interference. Ed. by *Yu.I. Losev*. Moscow: Radio and communication, 1988. 209 p.
9. *Nasonov V.V., Zhuravlev I.V., Fetosov E.S.* Adaptive algorithm development of interference compensation for multi-surveillance radars amidst decorrelate factors and non-stationary jamming situation.: Monograph. Yaroslavl Publ. H. of Yaroslavl State Pedagogical University named after Ushinsky, 2014. 154 p.
10. *Fitasov E.S., Kozlov S.A., Vasilenko E.V., Nasonov V.V.* Autocompensation efficiency enhancement of noise active jamming in shorter-range radars. News of Almaz-Antey Corporation. 2013. No. 1 (9). Pp. 45–49.