

УДК 621.396.962.38

Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-652-662

Для цитирования: Каткова В. П., Вяхирев В. А., Кринталь А. Н. Математическое моделирование автокомпенсационных устройств // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 4. С. 652–662. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-652-662.

For citation: Katkova V. P., Vyakhirev V. A., Krintal A. N. [Mathematical modeling of autocompensation devices]. *Siberian Aerospace Journal*. 2023, Vol. 24, No. 4, P. 652–662. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-652-662.

Математическое моделирование автокомпенсационных устройств

В. П. Каткова^{1*}, В. А. Вяхирев², А. Н. Кринталь²

¹Войсковая часть 58133-5

Российская Федерация, 659300, Алтайский край, г. Бийск

²Сибирский федеральный университет, Военно-Инженерный институт
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 13а

*E-mail: Lesoedova.2011@mail.ru

Статья посвящена порядку разработки и описанию математических моделей автокомпенсационных устройств радиолокационных станций кругового обзора. Разработка алгоритмов пространственной обработки сигналов в радиолокационных системах с фазированными антенными решетками является важным этапом проектирования радиолокационных станций. В данной статье будет рассмотрен порядок создания математических моделей автокомпенсационных устройств, которые разнятся способами реализации, а именно: количеством компенсационных каналов, положением основного и компенсационных (дополнительных) каналов радиолокационной станции (стационарное или динамическое), амплитудно-фазовым распределением основной и дополнительных антенн, представлением фазированной антенной решетки, алгоритмами нахождения вектора весового коэффициента. Адекватность работы моделей проверена методом вычислительного эксперимента и результатами, сравнимыми с реализованными автокомпенсаторами в радиолокационных станциях. Результаты вычислительного эксперимента, представленные в виде графиков сигнала на выходе автокомпенсационного устройства, а также прохождения согласованного фильтра, показывают, насколько эффективен алгоритм вычисления вектора весового коэффициента, позволяют наглядно, быстро и экономично сравнить эффективность работы автокомпенсационных устройств в зависимости от способа их реализации. В статье рассматривается алгоритм непосредственного формирования вектора весового коэффициента и алгоритм формирования вектора весового коэффициента через обратную корреляционную переоблающую матрицу. Математические модели автокомпенсационных устройств и результаты вычислительного эксперимента могут применяться для обучения будущих специалистов, разрабатывающих и эксплуатирующих радиолокационные станции.

Ключевые слова: математическая модель, активная шумовая помеха, корреляционный автокомпенсатор, вектор весового коэффициента, быстроедействие.

Mathematical modeling of autocompensation devices

V. P. Katkova^{1*}, V. A. Vyakhirev², A. N. Krintal²

¹Military unit 58133-5

Altai Territory, Biysk, 659300, Russian Federation

²Siberian Federal University, Military Engineering Institute
13a, Akademgorodok St., Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

*E-mail: Lesoedova.2011@mail.ru

The article is devoted to the order of development and description of mathematical models of automatic compensation devices of all-round radar stations. The development of algorithms for spatial processing of signals in radar systems with phased antenna arrays is an important stage in the design of radar stations. This article will consider the procedure for creating mathematical models of automatic compensation devices that differ in implementation methods, namely: the number of compensation channels, the position of the main and compensation (additional) channels of the radar station (stationary or dynamic), the amplitude-phase distribution of the main and additional antennas, the representation phased antenna array, algorithms for finding the weight vector. The adequacy of the operation of the models was verified by the method of computational experiment and the results are comparable with the implemented automatic compensation devices in radar stations. The results of the computational experiment, presented in the form of graphs of the signal at the output of the automatic compensation device, as well as the passage of the matched filter, show how effective the algorithm for calculating the weight vector, allow you to visually, quickly and economically compare the efficiency of the automatic compensation devices, depending on the method of their implementation. The article discusses the algorithm for the direct formation of the weight vector and the algorithm for the formation of the weight vector through the inverse correlation whitening matrix. Mathematical models of automatic compensation devices and the results of a computational experiment can be used to train future specialists who develop and operate radar stations.

Keywords: mathematical model, active noise interference, correlation automatic compensation, weight coefficient vector, speed.

Введение

Вопрос обнаружения воздушных объектов и точного определения их характеристик был и остаётся актуальным [1]. Радиолокационные станции (РЛС) кругового обзора, предназначенные для решения этого вопроса, выполняют информационные задачи в условиях воздействия внешних помех. Источники помех маскируют или имитируют сигналы и затрудняют извлечение полезной информации. Существенное влияние на обнаружение и правильность определение плоскостных координат воздушного объекта оказывают ответная импульсная помеха (ОИП) и активная шумовая помеха (АШП) [2].

Влияние на работу РЛС АШП в настоящее время вызвано стремительным развитием методов и средств радиопротиводействия, а также разнообразием видов преднамеренных радиопомех, понижающих эффективность выделения полезных сигналов [3]. ОИП негативно сказывается на качественном приёме полезного сигнала, оказывая воздействие на боковые лепестки диаграммы направленности антенны основного канала. Именно поэтому разработка устройств, предназначенных для компенсации различных шумов и помех при приёме полезного сигнала является одной из важнейших задач радиолокации [4]. Для решения такой задачи в РЛС применяются системы автокомпенсации, реализующие алгоритмы компенсации АШП и подавления ОИП по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны основного канала.

Математическое моделирование – мощный инструмент для исследования сложных технических систем, какими и являются системы автокомпенсации помех, обладающий рядом преимуществ по сравнению с другими методами исследования [5]. Разработка различных математических моделей алгоритмов и систем в настоящее время является актуальной задачей [6].

Целью данной работы является рассмотрение порядка моделирования автокомпенсатора и алгоритма подавления ответа, принятого боковыми лепестками диаграммы направленности антенны основного канала.

Автокомпенсатор (АКП) предназначен для снижения влияния АШП, воздействующих на приемный канал РЛС. Основная идея компенсации АШП по боковым лепесткам заключается в сложении в противофазе сигналов, принятых антенной основного канала с сигналами с дополнительных каналов, умноженными на весовой коэффициент. При точном и быстром вычисленном весовом коэффициенте осуществляется успешное подавление АШП без существенного ослабления полезного сигнала [7]. Для успешного подавления АШП необходимо точное и быстрое вычисление вектора весового коэффициента.

Алгоритм подавления ОИП по боковым лепесткам диаграммы направленности основного канала заключается в вычитании из сигналов основной антенны сигналов, принятых дополнительной антенной. При этом уровень сигналов, принятых дополнительной антенной в направлении боковых лепестков диаграммы направленности антенны основного канала, превышает сигналы, принятые основной антенной в направлении главного лепестка.

Порядок создание математической модели автокомпенсационных устройств

Блок-схема системы автокомпенсации представлена на рис. 1.

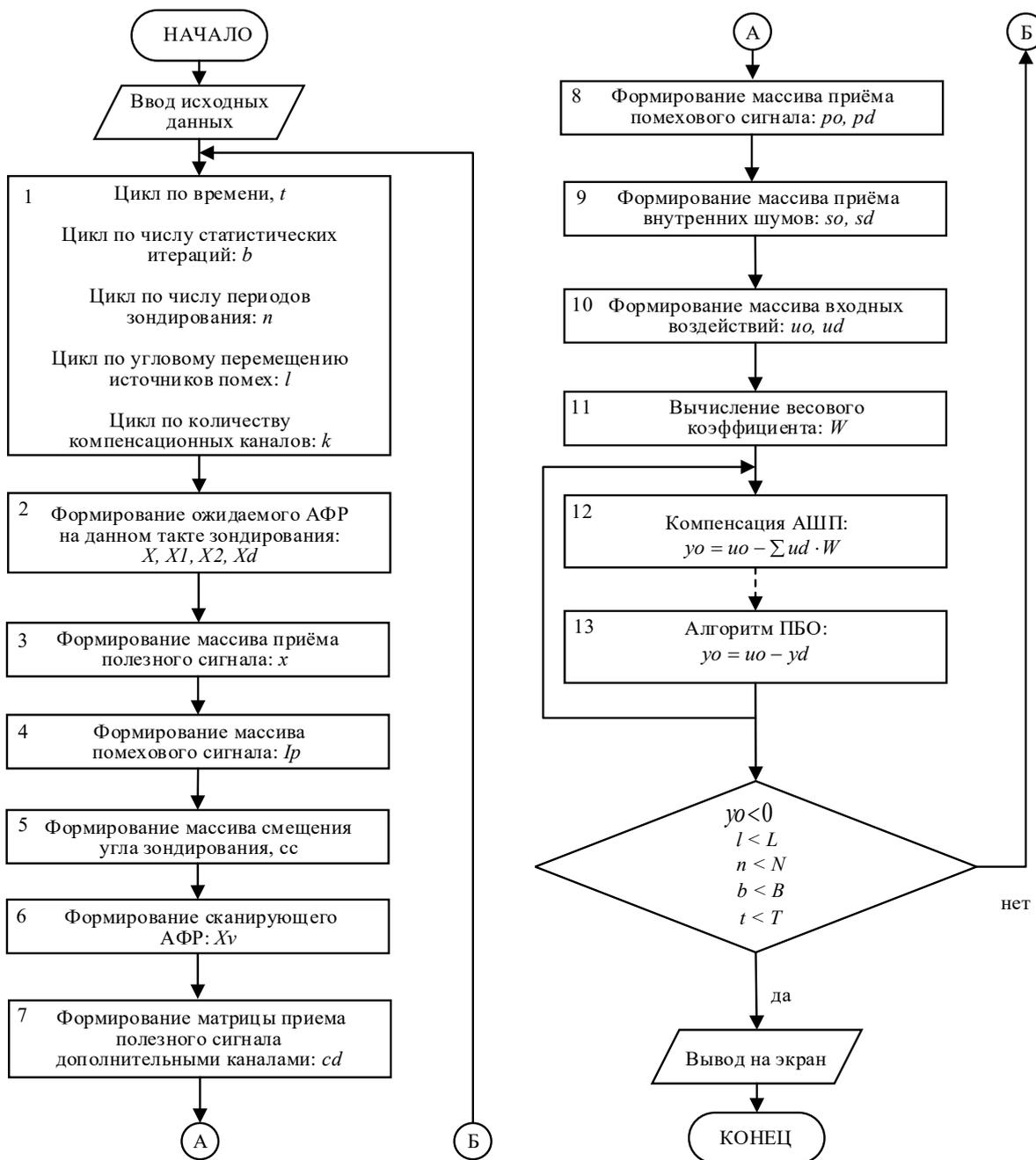


Рис. 1. Блок-схема системы автокомпенсации

Fig. 1. Block diagram of the autocompensation system

Чтобы приступить к процессу моделирования систем автокомпенсации необходимо задать исходные данные, а также циклы, обозначенные блоком 1 на рис. 1.

Моделирование системы автокомпенсации начинается с формирования амплитудно-фазовых распределений антенн основного и компенсационных каналов (блок 2 на рис. 1). Амплитудно-фазовое распределение антенны основного канала, в зависимости от вида антенны основного канала, формируется согласно выражению [8]

$$X(m, l) = e^{-i(2(m+1)-M-1) \cdot L(l) \cdot \frac{\pi}{M}} \cdot d(m), \quad (1)$$

где m – порядковый номер антенного элемента решётки основного канала; M – количество ненаправленных элементов антенной решётки; l – порядковый номер углового параметра источников помех; L – номер отсчёта углового параметра; $d(m)$ – составляющая амплитудно-фазового распределения антенны в зависимости от вида антенны.

Формирование массива амплитудно-фазового распределения компенсационных каналов осуществляется согласно выражению

$$X1(m1, l) = e^{-i(2(m1+1)-M1-1) \cdot L(l) \cdot \frac{\pi}{M1 \cdot p}},$$

где $m1$ – порядковый номер антенного элемента решётки компенсационного канала, $M1$ – количество ненаправленных элементов антенной решётки компенсационного канала, p – коэффициент нормирования диаграммы направленности антенны по азимуту.

Далее происходит формирование массива приёма полезного (x) (блок 3 на рис. 1) [9]

$$x(m, t) = A \cdot e^{-i(2(m+1)-M-1) \cdot a \cdot \frac{\pi}{M \cdot p}} \cdot e^{-i(\omega t + \varphi_0 + \varphi)},$$

где A – амплитуда полезного сигнала; a – направление прихода полезного сигнала; ω – частота сигнала; φ_0 – начальная фаза сигнала; φ – межпериодный набег фаз сигнала.

Амплитуда полезного сигнала может быть постоянная, быстро или медленно флуктуирующая по одному из известных законов [10].

Формирование массива помехового сигнала (Ip) (блок 4 на рис. 1)

$$ap(n, t) = ip \cdot rnorm(1, 0, 1)_0,$$

$$fp(n, t) = rnd(2\pi),$$

$$Ip(n, t) = ap(n, t) \cdot (\cos(fp(n, t)) + i \cdot \sin(fp(n, t))),$$

где ip – интенсивность помехи; n – порядковый номер периода зондирования; t – порядковый номер отсчёта по времени.

Далее происходит моделирование вращения основной антенны, т. е. формирование массива смещения (блок 5 на рис. 1),

$$cc(m, n) = e^{-i(2(m+1)-M-1) \cdot aa(n) \cdot \frac{\pi}{M \cdot p}}, \quad (2)$$

где aa – шаг поворота антенны за период зондирования.

При умножении (1) и (2) получаем результат сканирования (nc).

На основе выражения сканирования формируется массив сканирующего амплитудно-фазового распределения (Xv) (блок 6 на рис. 1)

$$Xv_n^{(l)} = X^{(l)} \cdot \left(nc^{(n)} \right)_i.$$

Обозначение (l) указывает, что берутся значения вектор-столбца матрицы.

Моделирование вращения антенн дополнительных каналов зависит от РЛС. Их положение может быть стационарным, или компенсационные каналы могут вращаться вместе с антенной основного канала. Формирование амплитудно-фазового распределения для каждого компенсационного канала при их вращении (в данной статье приведён пример для двух компенсационных каналов) осуществляется согласно выражениям [11; 12]

$$X1(m1, l) = e^{-i \cdot (2 \cdot (m1+1) - M1-1) \cdot (L(l)+a1) \cdot \frac{\pi}{M1 \cdot p}},$$

$$X2(m1, l) = e^{-i \cdot (2 \cdot (m1+1) - M1-1) \cdot (L(l)-a1) \cdot \frac{\pi}{M1 \cdot p}},$$

где $a1$ – поправка на разнос электрических центров антенн.

На основе полученных амплитудно-фазовых распределений для каждого канала формируется амплитудно-фазовое распределение системы дополнительных антенн:

$$Xd = [X1 \ X2]^T.$$

где T – операция транспонирования.

Далее формируется массив приёма полезного сигнала компенсационными каналами согласно выражению (блок 7 на рис. 1)

$$cd(m1, t) = Yc(m1) \cdot A \cdot e^{-i \cdot (2 \cdot (m1+1) - M1-1) \cdot (a \pm a1) \cdot \frac{\pi}{M1 \cdot p}} \cdot e^{-i \cdot (\omega \cdot t + \varphi_0)}.$$

где Yc – амплитудно-фазовый множитель на принятый полезный сигнал дополнительными каналами; k – порядковый номер дополнительного канала.

С учетом ошибок АФР антенны, вызванных различными составляющими, и перемещения антенны основного канала, в результате чего формируется матрица помех основного и дополнительных каналов (po, pd) (блок 8 на рис. 1),

$$po(m, t) = Ip(n, t) \cdot e^{-1i \cdot (2 \cdot (m+1) - M-1) \cdot np \cdot \frac{\pi}{M \cdot p}},$$

где np – направление прихода помехового сигнала.

$$pd(t, m1) = \left(YN^{(k)} \right)_{m1} \cdot Ip(n, t) \cdot e^{-1i \cdot (2 \cdot (m1+1) - M1-1) \cdot (np \pm a1) \cdot \frac{\pi}{M1 \cdot p}},$$

где $YN^{(k)}$ – амплитудно-фазовый множитель на принятый помеховый сигнал дополнительных каналов.

Матрица внутренних шумов основного канала so формируется согласно выражению (блок 9 на рис. 1)

$$so(m, t) = as(m, t) \cdot (\cos(fs(m, t)) + i \cdot \sin(fs(m, t))), \quad (3)$$

где as и fs – случайные амплитуда и фаза внутренних шумов соответственно, формируются аналогично ap и fp . Матрица шумов $sd(m1, t)$ дополнительного канала формируется аналогично (3).

Из массивов полезного сигнала, помех и собственных шумов формируется аддитивная смесь входных воздействий, поступающих на вход антенн основного и компенсационных каналов (uo, ud) (блок 10 на рис. 1), представляющая собой смесь шумов, пересчитанных на вход антенной решётки, полезного сигнала и помех. В случае вращения компенсационных каналов выражение (4) примет иной вид (5)

$$uo(n) = po(n) + so(n) + x(n),$$

$$ud(n, k) = pd(n, k) + sd(n, k) + cd(n, k), \quad (4)$$

$$ud := [ud1 \ ud2]^T, \quad (5)$$

где $ud1, ud2$ – аддитивная смесь входных воздействий, поступающих на вход антенн двух компенсационных каналов, формирующихся аналогично ud .

При формировании плоской антенной решётки к исходным данным добавится количество элементов решётки в плоскости a ($M1$), количество элементов решётки в плоскости b ($M2$), направление источника полезного сигнала в плоскости a (a), направление источника полезного

сигнала в плоскости b (b), количественный отсчёт параметра в плоскости a (LL), количественный отсчёт параметра в плоскости b (KK), а также погрешности положений элементов в плоскости a, b ($r1, r2$), случайная составляющая к амплитуде полезного сигнала (AA).

Формируется массив погрешности, вызванной запаздыванием прихода полезного сигнала из-за расположения элементов в нормали к антенне ($r3$).

Затем происходит формирование массива полезного сигнала (x)

$$x(m1, m2) = e^{-i(2(m1+1)-M1-1) \cdot a \cdot \frac{\pi}{M1}} \cdot e^{-i(2(m2+1)-M2-1) \cdot a \cdot \frac{\pi}{M2}} \cdot e^{-i(r3(n))_{m1, m2}}.$$

Следом формируется массив случайно составляющей амплитуды сигнала (An).

Далее формируется массив распределения сигнала во временной области с учётом случайной составляющей амплитуды (xt)

$$xt(t, m1, m2) = e^{-i \cdot t \cdot \psi} \cdot An(n) \cdot (x(n))_{m1, m2},$$

где ψ – множитель частоты; An – амплитуда полезного сигнала со случайной составляющей.

Выражения для формирования амплитудно-фазового распределения для каждой из плоскостей примет следующий вид в плоскости a ($X1$):

$$X1(m1, l) = e^{-i(2(m1+r1(n, m1)+1)-M1-1) \cdot L(l) \cdot \frac{\pi}{M1}}. \quad (6)$$

Для плоскости b выражение (6) примет аналогичный вид, за исключением составляющей $M1, r1, L$ которые заменятся аналогичными им $M2, r2, K$.

Затем задаем направление прихода помехового сигнала в плоскости a ($N1$), направление прихода полезного сигнала в плоскости b ($N2$), количество отсчётов по направлению прихода помехового сигнала (r).

На основе $N1$ и $N2$ формируется матрица направлений источников помех для двух плоскостей (np)

$$np(m1, m2) = e^{-i(2(m1+1)-M1-1) \cdot N1(r) \cdot \frac{\pi}{M1}} \cdot e^{-i(2(m2+1)-M2-1) \cdot N2(r) \cdot \frac{\pi}{M2}} \cdot e^{-i(r3(n))_{m1, m2}}.$$

Существует множество методов нахождения вектора весового коэффициента. Рассмотрим некоторые из них, а именно: непосредственное формирование вектора весового коэффициента и формирование вектора весового коэффициента через обратную корреляционную переоблающую матрицу.

На практике, как правило, параметры АШП и пространственная корреляционная матрица неизвестна. И, к тому же, они меняются во времени из-за движения источников ШП и обзора пространства РЛС. Поэтому обеспечить защиту основного канала РЛС заранее выбранными фиксированными параметрами не является возможным [13; 14].

Именно поэтому большое значение для систем автокомпенсации имеет способность адаптироваться к постоянно изменяющейся помеховой обстановке. Важнейшим параметром качества адаптивных систем является их быстродействие [14].

Быстродействие системы автокомпенсации во многом зависит от скорости вычисления вектора весового коэффициента. Аддитивная смесь полезного сигнала и шума умножается на вектор весовых коэффициентов и происходит суммирование сигнала, пришедшего с основного канала и сигналов, принятых дополнительными каналами и умноженных на вектор весовых коэффициентов. На выходе автокомпенсатора получаем сигнал с компенсированными АШП. На основе этого сигнала осуществляется вычисление вектора весовых коэффициентов повторно, что обеспечивает увеличение отношения сигнал/(шум + помеха).

Непосредственное формирование вектора весового коэффициента осуществляется согласно выражению (блок 11 на рис. 1) [15]

$$W_k(n, k) = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} \left((y_{o_{n-1}})_t \cdot \left(ud_{n-1, k}^{(t)} \cdot \overline{X1} \right) \right), \quad (7)$$

где $y_{o_{n-1}}$ – коэффициент обратной связи; T – количество отсчётов по времени; $\overline{}$ – операция комплексного сопряжения.

Выражение (7) применимо для случая, когда вращение антенны основного канала не включено. При включённом вращении выражение (7) примет следующий вид:

$$W(n, k) = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} \left(\left(\frac{1}{1 + yB_{n-1}} \right)_t \cdot \left(\left((ud_b)_{n-1, k} \right)^{(t)T} \cdot \overline{X1_n^{(k)}} \right) \right),$$

где yB – результат разности сигналов основного и компенсационных каналов.

Алгоритм непосредственного нахождения вектора весового коэффициента (W) заключается в суммировании по времени произведения коэффициента обратной связи на предыдущем периоде зондирования на аддитивную смесь входных воздействий, поступающих на вход антенн дополнительных каналов и ожидаемое комплексно-сопряженное амплитудно-фазовое распределение дополнительных каналов.

Формирование вектора весового коэффициента через обратную корреляционную переоблающую матрицу осуществляется согласно выражению [10]:

$$W_k(n, k) = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} \left(\frac{1}{1 + (y_{o_{n-1}})_t} \cdot \left((ud_{n-1, k}^{(t)})^T \cdot \overline{X1^{(Nc)}} \right) \right), \quad (8)$$

где Nc – количественный отсчёт направления прихода полезного сигнала.

При включённом вращении выражение (8) примет следующий вид:

$$W_k(n, k) = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} \left(I - \frac{1}{1 + (ud^{(t)})^T \cdot \overline{ud^{(t)}}} \cdot ud^{(t)} \cdot \overline{ud^{(t)}}^T \right), \quad (9)$$

где I – единичная матрица; $ud(k, t) = \left((ud_b)_{n-1, k} \right)^{(t)T} \cdot \overline{X1_{n-1}^{(k)}}$.

На втором и последующих периодах зондирования выражение (9) примет следующий вид:

$$W_k(n) = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} \left(W_k(n-1) - \frac{1}{1 + (ud^{(t)})^T \cdot \overline{ud^{(t)}}} \cdot ud^{(t)} \cdot \overline{ud^{(t)}}^T \right).$$

В отличие от алгоритма непосредственного нахождения вектора весового коэффициента, происходит оценка корреляционной матрицы помех.

После вычисления вектора весового коэффициента (W) на нулевом шаге итерации массив входных воздействий умножается на вектор весовых коэффициентов (W), который вычисляется в зависимости от применяемого алгоритма. Вычисляется таким образом, чтобы после суммирования сигналов, пришедших с компенсационных каналов, происходило компенсирование АПП (блок 12 на рис. 1)

$$y_o(n) = u_o(n) \cdot X_v - \sum (ud \cdot X_d \cdot W).$$

Подавление ОИП происходит согласно алгоритму (блок 13 на рис. 1)

$$y_o(n) = |u_o(n) \cdot X_v| - \sum |ud \cdot X_d|.$$

Если сумма значений сигналов, пришедших на антенны компенсационных каналов, больше, чем сигнал, пришедший на основной канал, то принимается, что $u_0(n) = 0$. Таким образом происходит подавление ОИП.

Результаты моделирования

Результаты моделирования представлены в виде графиков. На рис. 2 отображен результат моделирования при выключенном автокомпенсаторе. Наблюдается отсутствие полезного сигнала. Следует учитывать, что на рис. 2 и 3 амплитуда аддитивной смеси полезного сигнала, помехи и собственных шумов нормирована к среднему квадратическому отклонению шума.

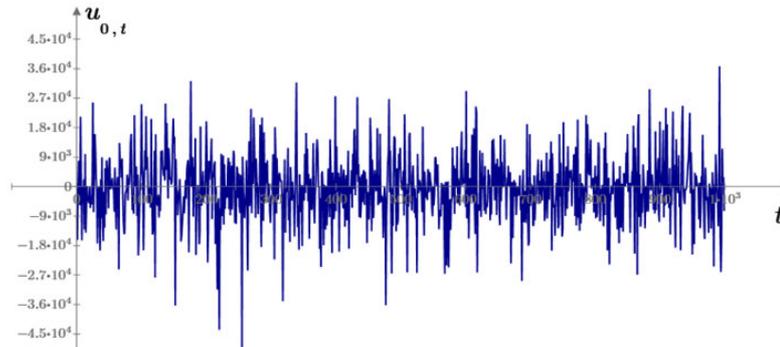


Рис. 2. Сигнал на выходе антенны основного канала при выключенном автокомпенсаторе

Fig. 2. The signal at the output of the antenna of the main channel when the automatic compensation devices is turned off

На рис. 3 представлен график сигнала на выходе автокомпенсатора и после прохождения согласованного фильтра для двух алгоритмов нахождения вектора весового коэффициента. Из результатов вычислительного эксперимента можно сделать заключение, что алгоритм нахождения вектора весового коэффициента через обратную корреляционную переобеляющую матрицу быстрее компенсирует АШП.

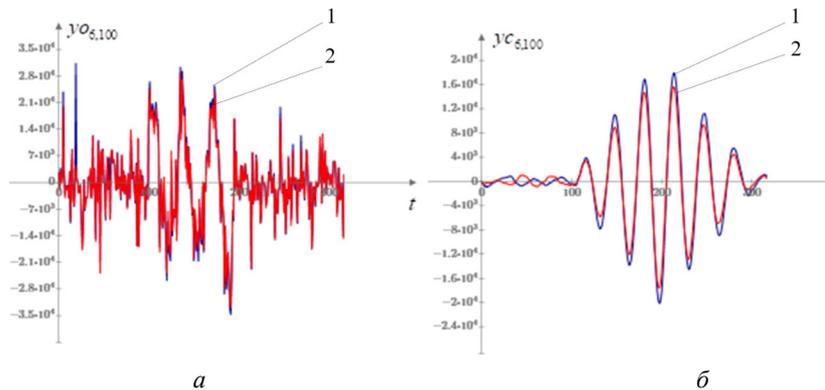


Рис. 3. График сигнала:

а – на выходе автокомпенсатора; *б* – после прохождения согласованного фильтра для двух алгоритмов. 1 – алгоритм непосредственного формирования вектора весового коэффициента; 2 – алгоритм вычисления вектора весового коэффициента через обратную корреляционную переобеляющую матрицу

Fig. 3. The graph of the signal:
a – at the output of the automatic compensation devices; *b* – the graph of the signal after passing the matched filter for two algorithms. In 1 – the algorithm for the direct formation of the vector of the weighting coefficient; in 2 – the algorithm for calculating the vector of the weighting coefficient through the inverse correlation re-whitewashing matrix

Заключение

В статье рассмотрена математическая модель автокомпенсатора и алгоритма подавления ОИП по боковым лепесткам. Результаты вычислительных экспериментов представлены в виде графиков. Разработанная модель позволяет провести вычислительные эксперименты в зависимости:

- от выбранных алгоритмов адаптации к помеховым сигналам по критериям: максимального отношения сигнал/шум и скорости адаптации к помехам;
- работы системы вращения основной антенны: вращение отключено или вращение включено;
- положения компенсационных каналов (динамическое или стационарное);
- реализованного в РЛС алгоритма вычисления вектора весового коэффициента.

Математическая модель автокомпенсатора и алгоритма подавления ОИП по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны основного канала позволяет лучше понять принцип работы автокомпенсационных устройств и поэтому может применяться для обучения будущих специалистов, эксплуатирующих РЛС.

Библиографические ссылки

1. Синтез обобщенного алгоритма обработки и формирования данных по отраженным сигналам от сложных целей / Х. В. Сунг, К. Н. Трунг, Б. Н. Фунг, Х. Д. Куанг // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26. № 1. С. 44–57. Doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-1-44-57.
2. Рябуха В. П., Семеняка А. В., Катюшин Е. А. Математические модели взаимнокоррелированных и некоррелированных гауссовых шумовых помех от внешних источников // Изв. Вузов. Радиоэлектроника. 2021. Т. 64. № 3. С. 172–180. Doi: 10.20535/S0021347021030043.
3. Ширман Я. Д., Манжос В. Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М. : Радио и связь, 1981. 416 с.
4. Чухломин И. Е., Файзулин Н. А., Павлик В. В. Анализ межпериодной обработки при нестационарном влиянии пассивных гауссовских помех // Вестник Южно-Уральского гос. ун-та. Серия: компьютерные технологии, автоматическое управление и радиоэлектроника. 2020. № 20. С. 79–88. Doi: 10.14529/ctcr200108.
5. Шеннон Р., Масловский Е. К. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. М. : Мир, 1978. 411 с.
6. Дятко А. А. Моделирование пассивных помех в виде отражений от облаков дипольных отражателей // Информационные технологии : материалы 86-й науч.-техн.й конф. профес.-препод. сост., науч. сотруд. и аспирантов. Минск, 31 января – 12 февраля 2022 г. Минск : БГТУ, 2022. С. 115–117.
7. Елагина К. А. Адаптивные алгоритмы обнаружения и разрешения ЧМ сигналов в РЛС обзора при сложном помеховом воздействии: дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2017. 157 с.
8. Ботов М. И., Вяхирев В. А. Основы теории радиолокационных систем и комплексов. Красноярск : СФУ, 2013. 530 с.
9. Бородин М. А. Моделирование формы эхосигнала радиовысотомера // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25. № 4. С. 52–62. Doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-4-52-62.
10. Моделирование информационных систем на основе законов распределения случайных величин: Монография / Ю. Ю. Громов, И. Г. Карпов, И. Н. Ищук и др. Тамбов : Нобелистика, 2019. 202 с.
11. Свид. о гос. рег. программы для ЭВМ. РФ. Математическая модель вращения антенны основного канала РЛС / Вяхирев В. А., Лесоедова В. П., Соболева М. А. № 2021665483, заявл. 20.09.2021; опубл. 27.09.2021.
12. Свид. о гос. рег. программы для ЭВМ. РФ. Математическая модель двухканального автокомпенсатора РЛС с разнесённым положением компенсационных каналов / Вяхирев В. А., Каткова В. П., Кринталь А. Н. № 2022661902, заявл. 14.07.2022; опубл. 28.07.2022.

13. Рябуха В. П., Адаптивные системы защиты РЛС от шумовых помех. 1. Корреляционные автокомпенсаторы на основе стохастических градиентных алгоритмов адаптации // Прикладная радиоэлектроника. 2016. Т. 15, № 1. С. 11–25.

14. Защита когерентно-импульсных РЛС от комбинированных помех. 3. Цифровая адаптивная система последовательной защиты РЛС программного обзора от комбинированных помех на основе АРФ / В. П. Рябуха, А. В. Семяника, Е. А. Катюшин, Д. В. Атаманский // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 65, № 2. С. 84–94. Doi: 10.20535/S0021347022020029.

15. Свид. о гос. рег. программы для ЭВМ. РФ. Математическая модель алгоритма оценки переобеляющей корреляционной матрицы помех / Вяхирев В. А., Каткова В. П. № 2022615816, заявл. 16.03.2022; опубл. 04.04.2022.

References

1. Sung Kh. V., Trung K. N., Fung B. N., Kuang Kh. D. [Synthesis of a generalized algorithm for processing and generating data on reflected signals from simple targets]. *Izv. vuzov Rossii. Radioelektronika*. 2023, Vol. 26, No. 1, P. 44–57. Doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-1-44-57 (In Russ.).

2. Ryabukha V. P., Semenyaka A. V., Katyushin E. A. [Mathematical models of cross-correlated and uncorrelated Gaussian noise interference from external sources]. *Izv. Vuzov. Radioelektronika*. 2021, Vol. 64. No. 3, P. 172–180. Doi: 10.20535/S0021347021030043 (In Russ.).

3. Shirman Ya. D, Manzhos V. N. *Teoriya i tekhnika obrabotki radiolokatsionnoy informatsii na fone pomekh* [Theory and technique of processing radar information against the background of interference]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1981, 416 p.

4. Chukhlomin I. E., Fayzulin N. A., Pavlik V. V. [Analysis of interperiod processing under non-stationary influence of passive Gaussian noise]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: komp'yuternye tekhnologii, avtomaticheskoe upravlenie i radioelektronika*. 2020, No. 20, P. 79–88. Doi: 10.14529/ctcr200108 (In Russ.).

5. Shannon R. *Imitatsionnoe modelirovanie sistem – iskusstvo i nauka* [Simulation modeling of systems – art and science]. Moscow, Mir Publ., 1978, 411 p.

6. Dyatko A. A. [Modeling passive interference in the form of reflections from clouds of dipole reflectors]. *Informatsionnye tekhnologii : materialy 86-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professor-sko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov* [Information technologies: materials of the 86th scientific and technical conference of faculty, researchers and graduate students]. Minsk, 2022, P. 115–117 (In Russ.).

7. Elagina K. A. *Adaptivnye algoritmy obnaruzheniya i razresheniya ChM signalov v RLS obzora pri slozhnom pomekhovom vozdeystvii* [Adaptive algorithms for detecting and resolving FM signals in surveillance radar under complex interference]. Krasnoyarsk, 2017, 157 p.

8. Botov M. I., Vyakhirev V.A. *Osnovy teorii radiolokatsionnykh sistem i kompleksov* [Fundamentals of the theory of radar systems and complexes]. Krasnoyarsk, Sibirskiy federal'nyy universitet, 2013, 530 p.

9. Borodin M. A. [Modeling the form of the echo signal of a radio altimeter]. *Izvestiya vuzov Rossii. Radioelektronika*. 2022, Vol. 25, No. 4, P. 52–62. Doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-4-52-62 (In Russ.).

10. Gromov Yu. Yu., Karpov I. G., Ishchuk I. N., Minin Yu. V., Ivanov O. G., Tyutyunnik V. M. *Modelirovanie informatsionnykh sistem na osnove zakonov raspredeleniya sluchaynykh velichin* [Modeling of information systems based on the laws of distribution of random variables]. Tambov, Nobelistika Publ., 2019, 202 p.

11. Vyakhirev V. A., Lesoedova V. P., Soboleva M. A. *Matematicheskaya model' vrashcheniya anteny osnovnogo kanala RLS* [Mathematical model of rotation of the antenna of the main channel of the radar]. Certificate of state registration of the computer program RF, No. 2021665483, 2021.

12. Vyakhirev V. A., Katkova V. P., Krintal' A.N. *Matematicheskaya model' dvukhkanal'nogo avtokompensatora RLS s raznesennym polozheniem kompensatsionnykh kanalov* [Mathematical model of a two-channel auto-compensator radar with a spaced position of compensation channels]. Certificate of state registration of the computer program RF, No. 2022661902, 2022.

13. Ryabukha V. P. [Adaptive systems for protecting radar from noise interference. 1. Correlation autocompensators based on stochastic gradient adaptation algorithms]. *Prikladnaya radioelektronika*. 2016, Vol. 15, No. 1, P. 11–25 (In Russ.).

14. Ryabukha V. P., Semyanika A. V., Katyushin E. A., Atamanskiy D. V. [Protection of coherent-pulse radars from combined interference. 3. Digital adaptive system for sequential protection of the radar of a program review from combined interference based on an active notch filter]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Rossii. Radioelektronika*. 2022, Vol. 65, No. 2, P. 84–94. Doi: 10.20535/S0021347022020029 (In Russ.).

15. Vyakhirev V. A., Katkova V. P. *Matematicheskaya model' algoritma otsenki pereobelyayushchey korrelyatsionnoy matritsy pomekh* [Mathematical model of the algorithm for estimating the whitening correlation matrix of interference]. Certificate of state registration of the computer program RF, No. 2022615816, 2022.

© Каткова В. П., Вяхирев В. А., Кринताल А. Н., 2023

Каткова Вера Павловна – инженер, войсковая часть 58133-5. E-mail: Lesoedova.2011@mail.ru.

Вяхирев Виктор Александрович – кандидат технических наук, доцент, профессор Военного учебного центра; Сибирский федеральный университет. E-mail: vyakhirev@yandex.ru.

Кринताल Андрей Николаевич – студент; Сибирский федеральный университет. E-mail: Andrey-krintal@yandex.ru.

Katkova Vera Pavlovna – engineer, military unit 58133-5. E-mail: Lesoedova.2011@mail.ru.

Vyakhirev Viktor Aleksandrovich – Cand. Sc., associate professor, professor of the Military Training Center; Siberian Federal University. E-mail: vyakhirev@yandex.ru.

Krintal Andrey Nikolaevich – student; Siberian Federal University. E-mail: Andrey-krintal@yandex.ru.
