

УДК: 621.396

**ИССЛЕДОВАНИЕ АДАПТИВНОГО КОНТУРА УПРАВЛЕНИЯ  
АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ С ЛИНЕЙНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ  
В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОМЕХ**

**STUDY OF THE ADAPTIVE CONTROL CIRCUIT  
OF AN ANTENNA ARRAY WITH LINEAR  
POLARIZATION UNDER INTERFERENCE**

*Д-р. техн. наук А.В. Панкратов, канд. техн. наук А.В. Демьянов,  
канд. техн. наук В.И. Джунь, А.А. Бородюк*

*D.Sc. A.V. Pankratov, Ph.D. A.V. Dem'janov, Ph.D. V.I. Dzhun', A.A. Borodjuk*

*ВКА им. А.Ф. Можайского*

В статье представлена методика исследования адаптивного контура управления антенной решеткой с пропорционально-интегрирующим фильтром в условиях воздействия активных шумовых помех. Проведен анализ влияния параметров пропорционально-интегрирующего фильтра на характеристики адаптивного контура управления, получены зависимости, позволяющие выбирать постоянную времени адаптивного контура управления, а также скорость адаптации к помеховой обстановке за счет вариации параметров элементов пропорционально-интегрирующего фильтра. Представлены результаты исследования скорости процесса адаптации контура управления антенной решеткой с разными типами фильтров к воздействию активных шумовых помех.

**Ключевые слова:** адаптивный контур управления, адаптивная антенная решетка, переходная характеристика, весовой коэффициент, быстродействие.

The article presents a technique for studying an adaptive control loop of an antenna array with a proportional-integrating filter under conditions of active noise interference. The analysis of the influence of the parameters of the proportional-integrating filter on the characteristics of the adaptive control loop was carried out, dependencies were obtained that allow choosing the time constant of the adaptive control loop, as well as the speed of adaptation to the noise environment due to the variation of the parameters of the elements of the proportional-integrating filter. The results of the study of the rate of adaptation of the control loop of the antenna array with different types of filters to the effect of active noise interference are presented.

**Keywords:** adaptive control loop, adaptive antenna array, transient response, weight factor, speed.

Неотъемлемой частью современных и перспективных радиолокационных систем являются адаптивные антенные решетки (ААР), применение которых позволяет решить одну из важнейших задач военных систем — их устойчи-

вое функционирование в условиях воздействия преднамеренных помех [1–3]. Использование в составе ААР пространственного и поляризационного фильтров, кроме того, обеспечивает возможность определения местопо-

жения источников радиоизлучения. в том числе несанкционированных, при решении различных задач радиоэлектронного наблюдения, например, вскрытие возможных нарушений режимов излучений с высокой точностью [2].

Адаптивная антенная решетка представляет собой систему, состоящую из антенной решетки и взаимовязанного с ней адаптивного контура управления (АКУ), в котором для формирования главного лепестка диаграммы направленности антенны в направлении полезного сигнала и «нулей», в направлении прихода помех, вычисляется вектор весовых коэффициентов по определенным алгоритмам с помощью аналоговых либо цифровых устройств. К таким алгоритмам относятся рекурсивные алгоритмы (Хауэлса-Аппельбаума и градиентные), а также алгоритмы прямого решения (последовательной декорреляции, рекурсивного обращения матрицы, непосредственного обращения матрицы) [3–5]. При этом каждый из перечисленных алгоритмов имеет свои достоинства и недостатки.

В условиях, когда направления прихода сигналов неизвестны, в качестве устройства пространственно-временной обработки сигналов целесообразно применить ААР с оптимизацией вектора весовых коэффициентов по схеме Хауэлса-Аппельбаума [6–8]. АКУ Хауэлса-Аппельбаума содержит в своем составе RC-фильтр нижних частот (ФНЧ) первого порядка, скорость адаптации и интегрирующие свойства которого ограничены принципиальной схемой и параметрами фильтра.

В отличие от работ, в которых синтезируются оптимальные по быстродействию алгоритмы адаптивного управления [9–10], существенно усложняющие структуру и техническую реализацию адаптивного контура, в данной статье рассматривается АКУ с пропорционально-интегрирующим RC-фильтром (ПИФ) заданной структуры, определяемой описывающим его динамические характеристики дифференциальным уравнением и соответствующей передаточной функцией.

Целью работы является исследование влияния выбора параметров пропорционально-интегрирующего фильтра на повышение скорости сходимости переходного процесса в АКУ, определяющей быстродействие ААР, при воздействии активных шумовых помех

### Методика исследования адаптивного контура управления антенной решеткой с пропорционально-интегрирующим фильтром

Для проведения исследования представим АКУ Хауэлса-Аппельбаума с ФНЧ в виде эквивалентной схемы следящего устройства нулевого типа в ортонормированной системе координат (рис. 1). На данной схеме представлены:  $W_{ok}$  и  $W_k$  — оптимальные и текущие значения весовых коэффициентов АКУ в ортонормированной системе координат; коэффициент передачи АКУ  $\mu_k = \gamma \lambda_k$ ;  $\lambda_k$  — собственное значение ковариационной матрицы помех ААР [11].

Введение эквивалентной схемы позволяет рассматривать оптимальный весовой коэффициент  $W_{ok}$  в качестве входного воздействия, выходную величину  $W_k$  — как степень приближения значения текущего весового коэффициента к оптимальному в процессе адаптации. Важно отметить, что коэффициент передачи  $\mu_k$  пропорционален средней мощности помех  $\lambda_k$ .

Известно [6], что переходная характеристика АКУ с ФНЧ первого порядка при нулевых начальных условиях описывается соотношением:

$$W_k(t) = \frac{\mu_k}{1 + \mu_k} W_{ok} (1 - e^{-\frac{t}{T}}), \quad (1)$$

где  $T = \frac{T_0}{1 + \mu_k}$  — постоянная времени АКУ с ФНЧ;

$T_0$  — постоянная времени ФНЧ.

В этом случае переходная характеристика имеет следующие особенности:

- постоянная времени АКУ зависит от  $\mu_k$  (мощности помехи);
- с увеличением  $\mu_k$  ухудшаются интегрирующие свойства АКУ;
- в силу инерционности действий АКУ антенная решетка в начальный момент времени

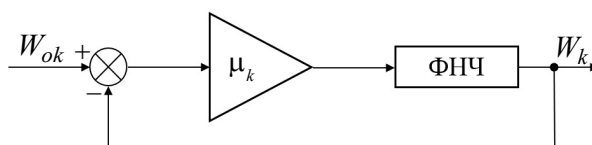


Рис. 1. Эквивалентная схема следящего устройства нулевого типа в ортонормированной системе координат

$t = 0$  не защищена от воздействия помех, т.к.  $W_k(0) = 0$ .

Рассмотрим АКУ с ПИФ, принципиальная схема которого с учетом коэффициента передачи  $\mu_k$  представлена на рис. 2.

Для оценки влияния параметров пропорционально-интегрирующего фильтра на характеристики АКУ воспользуемся операторным методом.

Передачная функция пропорционально-интегрирующего фильтра:

$$K(p) = \mu_k \frac{1 + p\tau_0}{1 + pT_0} \text{ при } T_0 > \tau_0,$$

где  $\tau_0 = R_2C$ ,  $T_0 = (R_1 + R_2)C$  — постоянные времени ПИФ.

Передачная функция АКУ с ПИФ с учетом обратной связи при нулевых начальных условиях определяется выражением:

$$K_{oc}(p) = \frac{W_k(p)}{W_{ok}(p)} = \frac{\mu_k(1 + p\tau_0)}{1 + \mu_k + p(T_0 + \mu_k\tau_0)}.$$

Этой передачной функции соответствует дифференциальное уравнение в операторной форме:

$$p(T_0 + \mu_k\tau_0)W_k(p) + (1 + \mu_k)W_k(p) = \mu_k(1 + p\tau_0)W_{ok}(p).$$

Принимая воздействие на входе в виде ступенчатой функции  $W_{ok} \cdot 1(t)$  и используя обратное преобразование Лапласа [12], получим переходную характеристику АКУ с ПИФ в виде:

$$W_k(t) = \frac{\mu_k}{1 + \mu_k} W_{ok} (1 - e^{-\frac{t}{T}}) + \alpha W_{ok} e^{-\frac{t}{T}}, \quad (2)$$

где  $T = \frac{T_0(1 + \mu_k \frac{\tau_0}{T_0})}{1 + \mu_k}$  — постоянная времени АКУ с ПИФ;

$$\alpha = \frac{\tau_0 \mu_k}{T_0(1 + \mu_k \frac{\tau_0}{T_0})}.$$

Из выражения (2) следует, что переходная характеристика АКУ с ПИФ состоит из двух слагаемых переходного процесса (рис. 3). Асимп-

тотический характер переходного процесса при  $t \rightarrow \infty$  указывает на то, что АКУ с ПИФ удовлетворяет критерию устойчивости. При этом формирование оптимального весового коэффициента происходит с постоянной времени АКУ с ПИФ, которая зависит не только от коэффициента передачи  $\mu_k$ , но и от выбора параметров пропорционально-интегрирующего фильтра.

Графики зависимости постоянной времени АКУ с ПИФ от соотношения  $\frac{\tau_0}{T_0}$  при заданном значении постоянной времени фильтра  $T_0$  и  $\mu_k$  представлены на рис. 4.

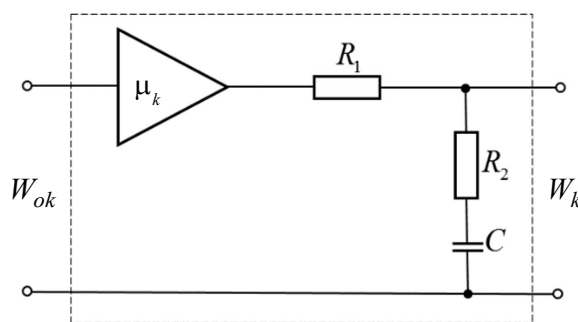


Рис. 2. Принципиальная схема АКУ с ПИФ

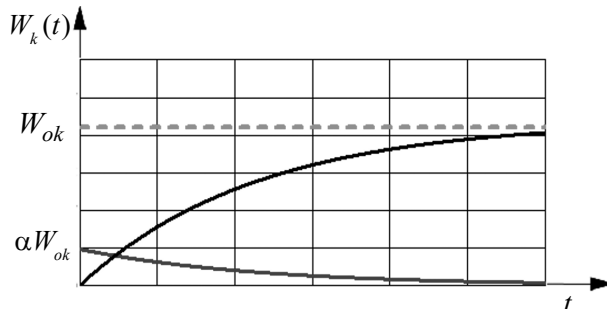


Рис. 3. Переходная характеристика АКУ с ПИФ

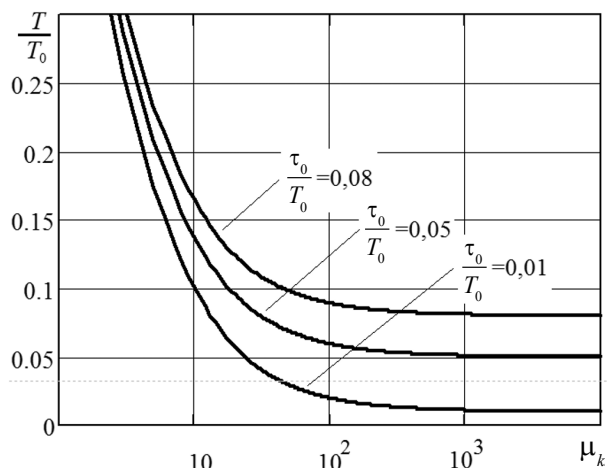


Рис. 4. Графики зависимости постоянной времени АКУ от параметров ПИФ

Как видно из рис. 4, при  $\mu_k = 10$  и  $\mu_k = 10^3$  постоянная времени АКУ с ПИФ зависит от  $\frac{\tau_0}{T_0}$  и при изменении этого значения в пределах 0,01–0,08 постоянная времени изменяется в 1,6 и 4 раза соответственно.

По мере увеличения мощности помех постоянная времени АКУ уменьшается, интегрирующие свойства ухудшаются и на значения весовых коэффициентов  $W_k$  начинают оказывать влияние быстрые флуктуации помех. Для того, чтобы значения весовых коэффициентов не зависели от флуктуации сигналов помех, минимально допустимое значение постоянной времени контура управления должно быть не меньше чем [6]:

$$T_d = \frac{10}{2\pi B_c},$$

где  $B_c$  — полоса пропускания канала отдельного элемента антенной решетки.

Тогда постоянная времени АКУ с ПИФ должна удовлетворять следующему соотношению:

$$\frac{T_0(1 + \mu_{km} \frac{\tau_0}{T_0})}{1 + \mu_{km}} \geq \frac{10}{2\pi B_c} = T_d, \quad (3)$$

где  $\mu_{km}$  — максимально допустимое значение коэффициента передачи.

При этом необходимая величина постоянной времени фильтра определяется из (3) как:

$$T_0 = T_d \frac{1 + \mu_{km}}{(1 + \mu_{km} \frac{\tau_0}{T_0})}. \quad (4)$$

Выражение (4) однозначно устанавливает взаимосвязь между выбором необходимой постоянной времени фильтра при максимальном коэффициенте передачи  $\mu_{km}$  и параметрах фильтра  $\tau_0$  и  $T_0$ . Например, для АКУ Хауэлса-Аппельбаума с ФНЧ ( $\tau_0 = 0$ ) при  $\mu_{km} = 1000$  постоянная времени фильтра равна  $T_0 = 1000 \cdot T_d$ . Для АКУ с ПИФ при  $\tau_0 = 0,001 \cdot T_0$  и  $\mu_{km} = 1000$  необходимое значение постоянной времени, удовлетворяющей усредняющему действию фильтра, будет равно  $T_0 = 500 \cdot T_d$ , что в два раза меньше предыдущего случая. Графики зависимости  $\lg \frac{T_0}{T_d}$  при заданных значениях  $\frac{\tau_0}{T_0}$  в функции от  $\mu_{km}$  представлены на рис. 5.

Как следует из рис. 5, выигрыш в выборе необходимой постоянной времени пропорционально-интегрирующего фильтра за счет вариации значений параметров его элементов может быть получен в два и более раз.

Анализ переходного процесса в АКУ с ПИФ, определяемого выражением (2), показывает, что второе слагаемое участвует в формировании весового коэффициента и равно  $\alpha \cdot W_{ok}$ , при  $t = 0$ . Следовательно, сигнал помехи при воздействии на ААР в начальный момент времени будет частично подавлен в отличие от переходного процесса, определяемого по формуле (1) для АКУ с ФНЧ. Степень подавления при этом зависит от коэффициента  $\alpha$ , величина которого также определяется выбором параметров  $\tau_0$  и  $T_0$  ПИФ, и максимальным коэффициентом передачи  $\mu_{km}$ . Графики зависимости коэффициента  $\alpha$  представлены на рис. 6.

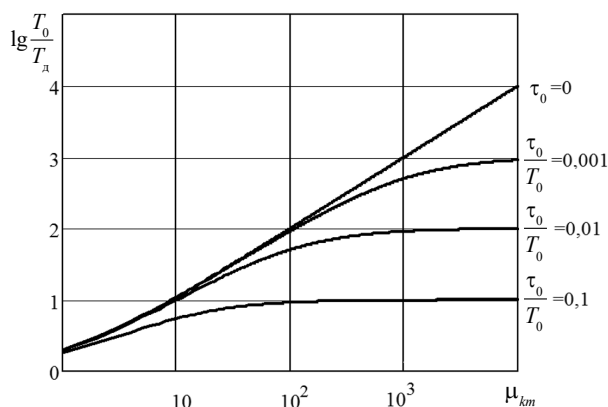


Рис. 5. Графики зависимости  $\lg \frac{T_0}{T_d}$  при заданных значениях  $\frac{\tau_0}{T_0}$  от  $\mu_{km}$

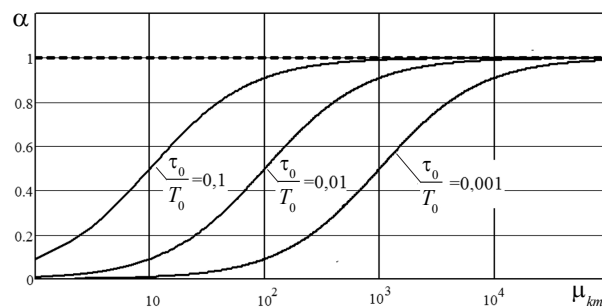


Рис. 6. Графики зависимости коэффициента  $\alpha$  при заданных значениях  $\frac{\tau_0}{T_0}$  от  $\mu_{km}$

За счет второго слагаемого выражения (2) в АКУ с ПИФ происходит ускорение процесса адаптации в переходном режиме. Так за время  $t = T$  и  $\mu_k \gg 1$  весовой коэффициент (2) принимает значение  $W_k(T) = W_{ок}(0,63 + \alpha 0,37)$ . Полагая  $\mu_{km} = 1000$ ,  $\frac{\tau_0}{T_0} = 0,001$ , получим  $\alpha = 0,5$ , а  $W_k(T) \approx 0,82$ , что заметно больше 0,63, при  $\alpha = 0$  для АКУ с ФНЧ.

Взаимосвязь между весовыми коэффициентами  $W_k$  адаптивного контура управления ААР в ортонормированной системе координат с комплексными весовыми коэффициентами  $W_k^*$  реальной системы определяются следующим соотношением:

$$W_k^* = (e_{1k}W_1 + e_{2k}W_2 + e_{3k}W_3 + \dots + e_{kk}W_k),$$

где  $e_{kk}$  — собственные векторы ковариационной матрицы принимаемых сигналов помех  $k$ -элементной антенной решеткой.

### Результаты исследования адаптивного контура управления антенной решеткой с пропорционально-интегрирующим фильтром

Одной из основных характеристик АКУ является скорость сходимости процесса адаптации (или длительность переходного процесса),

что определяет быстродействие системы [13]. Для исследования возможности повышения характеристик АКУ антенной решетки с линейной поляризацией и пропорционально-интегрирующим фильтром, за счет выбора его параметров в условиях воздействия помех, была разработана программа в среде MathCad. Данная программа состоит из следующих блоков: ввод исходных данных, моделирование переходного процесса в АКУ ААР, который оценивается количеством накопленных выборок, а также исследование переходного процесса в АКУ при воздействии помех различного уровня.

На рис. 7 представлены (кривые 1, 2) значения активной шумовой помехи (АШП) на входе и выходе ААР с контуром управления Хауэлса-Аппельбаума с ФНЧ и контуром управления с ПИФ. При этом в качестве помехи выбран случайный гауссовский процесс с нулевым средним, а ее уровень на входе соответствует отношению помеха/шум 30 дБ. Размер накопленной выборки представляет собой временные отсчеты. Кривая 1 соответствует реакции на воздействие помехи АКУ с ФНЧ, кривая 2 — для АКУ с ПИФ.

Анализ результатов показал, что время настройки АКУ с разными типами фильтров различное —  $t_1$  и  $t_2$ . АКУ с пропорционально-интегрирующим фильтром успевает настроиться по АШП к моменту времени  $t_1$ , в то время как АКУ с ФНЧ продолжает настраиваться по АШП

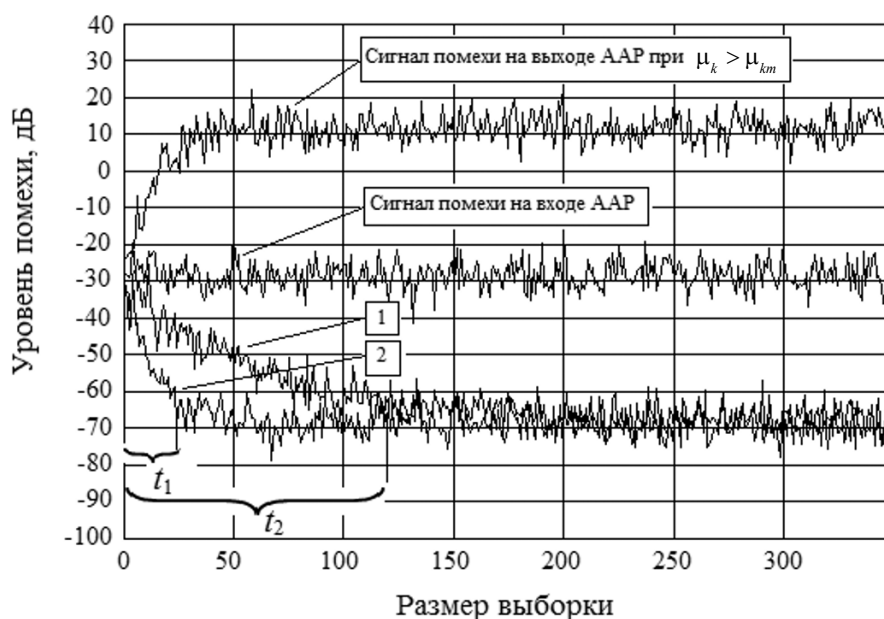


Рис. 7. Влияние параметров АКУ с разными типами фильтров на уровень мощности помехи

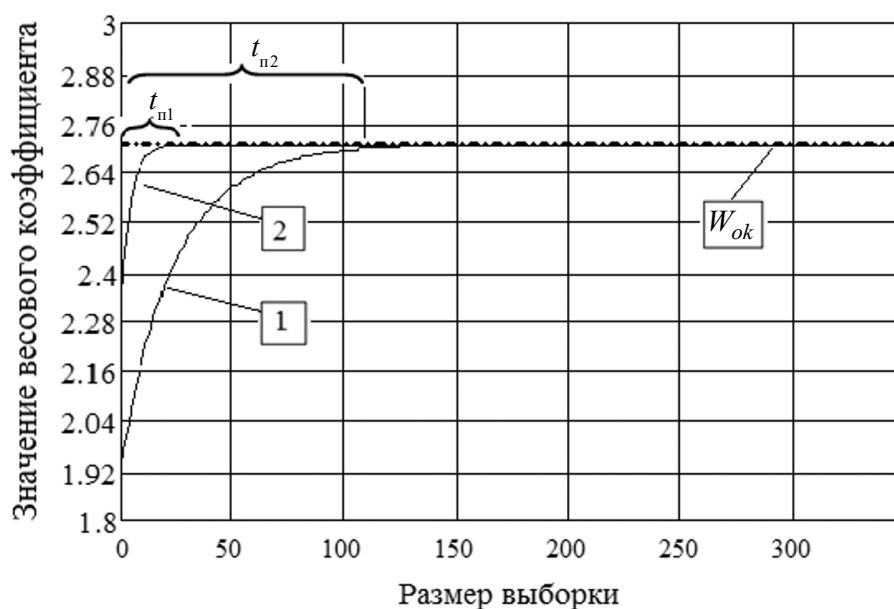


Рис. 8. Влияние выбора параметров ПИФ на длительность переходного процесса АКУ

до момента времени  $t_2$ . При неправильном выборе параметров  $\tau_0$  и  $T_0$  ФНЧ и  $\mu_k > \mu_{km}$  (значение  $\mu_{km}$  определяется условием (3)) АКУ с ПИФ будет возбуждаться.

На рис. 8 показан процесс настройки (длительность переходного процесса) АКУ с ПИФ для случая  $\alpha=0,714$  (кривая 1) и  $\alpha=0,85$  (кривая 2) при  $\mu_{km}=1000$  за счет выбора параметров  $\tau_0$  и  $T_0$  фильтра, определяющих также различное значение постоянной времени.

По результатам проведенного моделирования можно сделать следующие выводы:

- при одинаковом уровне мощности помехи, но меньшем значении коэффициента  $\alpha$  длительность переходного процесса  $t_{n2}$  занимает больше времени (кривая 1, рис. 8);

- при большем значении коэффициента  $\alpha$  процесс адаптации к воздействию помехи занимает меньше времени  $t_{n1}$  (кривая 2, рис. 8), т.е. работа ААР будет более скоростной;

- выбор параметров ПИФ с учетом мощности помехи позволяет уменьшить время адаптации АКУ к ее воздействию, что обеспечивает повышение быстродействия АКУ.

Таким образом, проведенные исследования показали, что применение пропорционально-интегрирующего фильтра позволит повысить качество работы АКУ за счет выбора его параметров в условиях воздействия помех. Вариация параметров адаптивного контура управления

возможна, например, за счет изменения соотношения между частями активного сопротивления ПИФ с помощью элементов с управляемыми параметрами. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании адаптивных антенных решеток, применяемых в составе современных и перспективных помехозащищенных радиолокационных систем.

### Литература

1. Бакулев П.А. Радиолокационные системы: учебник для вузов. Изд. 3-е. перераб. и доп. — М.: Радиотехника. 2015. 440 с.
2. Лепин В.Н. Помехозащита радиоэлектронных систем управления летательными аппаратами и оружием / В.Н. Лепин, В.Н. Антипов, А.Ю. Викентьев и др.; [под редакцией В.Н. Лепина]. — М.: Радиотехника. 2017. 411 с.
3. Григорьев В.А., Щесняк С.С., Гулюшин В.Л., Распаев Ю.А., Лагутенко О.И., Щесняк А.С. Адаптивные антенные решетки: учебное пособие в 2-х частях. Часть 1. Под общ. ред. В.А. Григорьева. — СПб: Университет ИТМО. 2016. 179 с.
4. Пистолькорс А.А., Литвинов О.С. Введение в теорию адаптивных антенн. — М.: Наука. 1991. 200 с.
5. 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. 208 с.

6. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию. — М.: Радио и связь. 1989. 448 с.

7. Applebaum S.P., Chapman D.J. Adaptive arrays with main beam constrains // IEEE Transact. on Antennas and Propagation. 1976. Vol. AP-24. № 5. P. 650–662.

8. Applebaum S. P. Adaptive arrays // IEEE Transact. on Antennas and Propagation. 1976. Vol. AP-24. № 5. P. 585–598.

9. Александров А.Г. Оптимальные и адаптивные системы. — М.: Высш. Школа. 1989. 263 с.

10. Лукьянов Д.П., Корниенко А.А., Рудницкий Б.Е. Оптические адаптивные системы. — М.: Радио и связь. 1989. 240 с.

11. Уиндрю Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов. — М.: Радио и связь. 1989. 440 с.

12. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров: Определения, теоремы. — М.: Книга по Требованию. 2014. 832 с.

13. Арсеньев Г.Н., Замуруев С.Н. Радиоавтоматика: учебник. — М.: ИД «ФОРУМ»: ИНФРА-М. 2017. 592 с.

### References

1. Bakulev P.A. Radar systems: a textbook for universities. Ed. 3rd. revised and add. — М.: Radio engineering. 2015. 440 p.

2. Lepin V.N., Antipov V.N., Vikent'ev A.Ju., and etc. Interference protection of electronic control systems of aircraft and weapons. Ed. Lepin V.N. — М.: Radiotekhnika. 2017. 411 p.

3. Grigoriev V.A., Schesnyak S.S., Gulyushin V.L., Raspaev Yu.A., Lagutenko O.I., Shchesnyak A.S. Adaptive Antenna Arrays: A Tutorial in 2 Parts. Part 1. Under total. ed. V.A. Grigoriev. — SPb: ITMO University. 2016. 179 p.

4. Pistol'kors A.A., Litvinov O.S. Introduction to adaptive antenna theory. — М.: Nauka. 1991. 200 p.

5. Losev Yu.I., Berdnikov A.G., Goikhman E.Sh., Sizov B.D. Adaptive compensation of interference in communication channels. Ed. Yu.I. Losev. — М.: Radio and communication. 1988. 208 p.

6. Monzingo R.A., Miller T.U. Adaptive antenna arrays: An introduction to the theory. — М.: Radio and communication. 1989. 448 p.

7. Applebaum S.P., Chapman D.J. Adaptive arrays with main beam constrains // IEEE Transact. on Antennas and Propagation. 1976. Vol. AP-24. № 5. P. 650–662.

8. Applebaum S.P. Adaptive arrays // IEEE Transact. on Antennas and Propagation. 1976. Vol. AP-24. № 5. P. 585–598.

9. Aleksandrov A.G. Optimal and adaptive systems. — М.: Higher. School. 1989. 263 p.

10. Lukyanov D.P., Kornienko A.A., Rudnitskiy B.E. Optical adaptive systems. — М.: Radio and communication. 1989. 240 p.

11. Windrow B., Stearns S. Adaptive signal processing. — М.: Radio and communication. 1989. 440 p.

12. Korn G. A Handbook of Mathematics for Scientists and Engineers: Definitions, Theorems. — М.: Книга по Trebovaniju. 2014. 832 p.

13. Arsen'ev G.N., Zamuruev S.N. Radio-automatics: textbook. — М.: ИД «ФОРУМ»: ИНФРА-М. 2017. 592 p.