

УДК 621.396.626

ЦИФРОВОЕ ФОРМИРОВАНИЕ НУЛЕЙ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ФАР ПРИ ПЕРЕМЕЩЕНИИ ПОСТАНОВЩИКА АКТИВНЫХ ПОМЕХ

Штрунова Екатерина Сергеевна

кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВПО

«Рязанский государственный радиотехнический университет».

E-mail: shtrunova.e.s@rsreu.ru.

Адрес: 390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Аннотация: В условиях радиоэлектронного противодействия угловое перемещение постановщика активных помех за интервал времени между этапами адаптации приводит к изменению направления прихода активной шумовой помехи. В связи с этим помеха выходит из зоны ранее сформированных нулей диаграммы направленности приемной фазированной антенной решетки радиолокационной системы. В статье оценено снижение коэффициента улучшения отношения сигнал – (помеха+шум) оптимального алгоритма непосредственного обращения выборочной межканальной корреляционной матрицы помехи при приращении направляющих косинусов активной помехи за время между этапами адаптации по сравнению с неподвижной помехой. При угловой скорости перемещения постановщика активных помех на эффективность алгоритмов адаптивной обработки наибольшее влияние оказывает активная помеха по ближнему лепестку диаграммы направленности фазированной антенной решетки при приближении ее углового направления к области главного лепестка. Для уменьшения влияния угловой скорости постановщика целесообразно минимизировать время между интервалами адаптации таким образом, чтобы можно было пренебречь изменением углового положения помехи либо же подстраивать положение нуля диаграммы направленности в зависимости от угловой скорости постановщика с учетом максимизации отношения сигнал – (помеха+шум).

Ключевые слова: активные шумовые помехи, адаптация фазированной антенной решетки, угловая скорость постановщика помех.

Введение

Задача адаптивной антенной решетки – обеспечение эффективного функционирования систем радиолокации, радионавигации в условиях радиоэлектронного противодействия, в частности, на фоне многоточечных по пространству активных шумовых помех (АШП). Применение фазированных антенных решеток (ФАР) и устройств цифрового запоминания пространственных частот (DRFM-S) в станциях постановки помех позволяет с высокой скоростью изменять направление прихода, количество АШП, их мощность; поддерживая определенный закон переключения АШП, формировать мерцающие активные помехи [1, 2].

Поэтому к адаптивным алгоритмам формирования диаграммы направленности (ДН) антенны РЛС предъявляют жесткие требования по времени адаптации, частоте настройки вектора весовых коэффициентов (ВВК), характеризующих амплитудно-фазовое распределение на раскрытии приемной ФАР. Дополнительным

фактором, влияющим на эффективность алгоритмов помехозащиты на основе пространственной обработки сигналов, является движение постановщика активных помех (ПАП), так как происходит смещение направления прихода АШП за интервал времени между этапами адаптации относительно предварительно сформированного нуля ДН ФАР.

Одним из методов борьбы с данным недостатком является применение алгоритмов формирования ДН с расширенными нулями в направлении действия источников АШП. Основой этих алгоритмов является введение дополнительных условий получения ВВК.

Применительно к линейной адаптивной ФАР в литературе рассмотрены следующие подходы по формированию расширенных нулей ДН:

1) в [3] вносится предположение о наличии дополнительных дискретных равномошных ПАП, расположенных на одной линии, а в [4] о непрерывном распределении источников;

2) весовое оконное сглаживание направляющих векторов [5];

3) условие равенства нулю производной ДН [6];

4) усреднение пространственной межканальной корреляционной матрицы (МКМ) по угловым координатам сигналов за интервал времени [7].

К недостаткам алгоритмов формирования ДН с расширенными нулями относится снижение глубины формируемого нуля при увеличении ширины зоны подавления АШП, а при действии АШП по ближним боковым лепесткам может произойти подавление полезного сигнала. В [8] перемещение ПАП учитывалось путем изменения МКМ помехи во времени, но точного закона изменения модели МКМ при движении не предложено.

Цель работы – исследование влияния угловой скорости постановщика помех на эффективность адаптации цифровой антенной решетки.

Пространственно-временное представление сигнала и АШП

В общем случае АШП представляет собой широкополосный в пространственно-временном смысле процесс. При условии нормальности и стационарности принимаемого воздействия распределение сигнала и АШП полностью определяется функцией пространственно-временной корреляции (ФПВК) $R(t_1, t_2, \mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2)$, которая связана обратным четырехмерным преобразованием Фурье с частотно-волновым спектром, характеризующим распределение мощности по временной f и пространственным \mathbf{q} частотам [1]:

$$R(\tau, \mathbf{p}) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int \int \int G(f, \mathbf{q}) \exp(i2\pi(f\tau - \mathbf{q}\mathbf{p})) df dq_x dq_y dq_z \\ = \int_{-\infty}^{+\infty} \int \int \int G(f, \mathbf{q}) \exp(i2\pi f\tau - \mathbf{k}\mathbf{p}) df dk_x dk_y dk_z,$$

где \mathbf{q} – вектор линейных пространственных частот с проекциями $q_x = v_x/\lambda$, $q_y = v_y/\lambda$, $q_z = v_z/\lambda$, v_x, v_y – направляющие векторы (проекции единичного вектора на оси x и y), $v_x = \cos u_x$, $v_y = \cos u_y$, $u_{x,y} = x, y/\lambda$ – угловая пространственная частота линейного раскрытия по

координате x и y соответственно; \mathbf{k} – волновой вектор, $\mathbf{k} = 2\pi \mathbf{q}$, $\mathbf{k} = (k_x, k_y, k_z)$; \mathbf{p} – разность координат двух точек наблюдения, $\mathbf{p} = (p_x, p_y, p_z)$, $\mathbf{p} = \mathbf{d}_2 - \mathbf{d}_1$, \mathbf{d}_i – радиус-вектор, определяющий положение i -го антенного элемента на апертуре ФАР.

Для обработки узкополосных пространственно-временных сигналов входной реализации возможна факторизация [9, 10], поэтому функцию пространственно-временной корреляции представляют отдельно как временную и пространственную: $R(\tau, \mathbf{p}) = R(\tau)R(\mathbf{p})$. Функция пространственной корреляции с учетом обобщения теоремы Винера – Хинчина на пространственный случайный процесс [1]

$$R(\mathbf{p}) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int \int G(\mathbf{q}) \exp(i2\pi\mathbf{q}\mathbf{p}) d^3\mathbf{q},$$

где $G(\mathbf{q})$ – угловой спектр мощности принимаемого процесса, характеризующий распределение мощности по пространственным частотам.

В адаптивных алгоритмах пространственной обработки сигналов, основанных на прямом обращении выборочной МКМ и рекуррентном оценивании обратной МКМ [11], регуляризованных, проекционных [12, 13] алгоритмах определение оценки ВВК $\hat{\mathbf{W}}$ основано на предварительном нахождении выборочной МКМ или обратной МКМ.

Для адаптации N -элементной ФАР N -мерная оцениваемая МКМ аддитивной смеси коррелированной по пространству АШП и собственного шума приемных каналов представляется через вектор \mathbf{f}_n , характеризующий пространственное положение помехи, как [11]

$$\hat{\mathbf{R}}_{\text{шн}} = \mathbf{I} + \gamma \hat{\mathbf{f}}_n \hat{\mathbf{f}}_n^H, \quad (1)$$

где γ – отношение АШП – шум по мощности; \mathbf{I} – N -мерная корреляционная матрица собственного шума приемных каналов ФАР (единичная); $\hat{\mathbf{f}}_n = \{\exp(iv_{n0,0}), \dots, \exp(iv_{nk,j1}), \dots, \exp(iv_{nN-1,N-1})\}^T$ – направляющий вектор помехи для N -элементной плоской ФАР прямоугольного раскрытия при условии совпадения начала координат с расположением нулевого элемента; $v_{nk,j}$ – фаза помехи, пришедшей на kj -й элемент ФАР, $v_{nk,j} = 2\pi f_{n0} \Delta t_{nk,j}$; f_{n0} – частота излучения АШП; $\Delta t_{nk,j}$ – время запаздывания фрон-

та волны АШП, принимаемой kj -м элементом относительно начала координат для угловых координат α_n, θ_n прихода АШП, $\Delta t_{nk,j} = [k d_x v_x + j d_y v_y] / c$, d_x, d_y – межэлементное расстояние по координате x и y соответственно, v_x, v_y – направляющие косинусы (проекции единичного вектора на оси x и y), $v_x = \sin \theta_n \cos \alpha_n, v_y = \sin \theta_n \sin \alpha_n$; α_n, θ_n – азимут и угол места АШП соответственно, i – мнимая единица.

На рис. 1 представлено изменение координат ПАП при его перемещении.

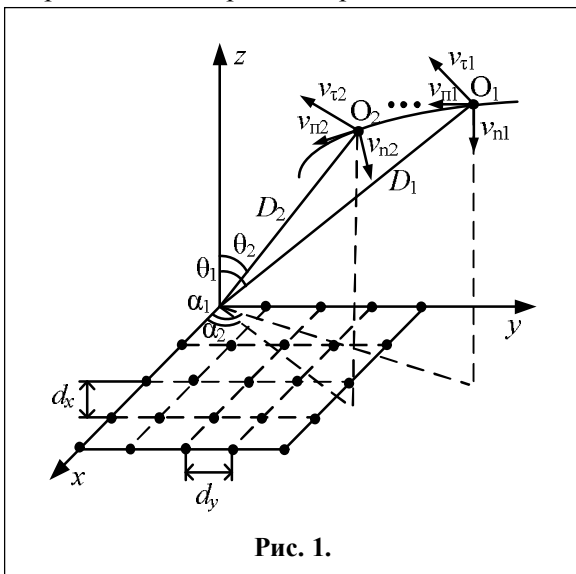


Рис. 1.

С учетом влияния угловой скорости ПАП оценка МКМ помехи примет вид:

$$\tilde{\mathbf{R}}_{nm} = \hat{\mathbf{R}}_{nm} \pm \Delta \mathbf{R}, \quad (2)$$

$\Delta \mathbf{R}$ – добавка к МКМ из-за движения ПАП на расстоянии D от РЛС.

Если ПАП имеет скорость перемещения такую, что приращение направляющих косинусов и расстояния от фазового центра ФАР до ПАП на интервале наблюдения постоянны, то координаты ПАП будут в $(i+1)$ -й момент времени равны:

$$v_x^{(i+1)} = v_x^{(i)} \pm \frac{dv_x}{dt} t, \quad v_y^{(i+1)} = v_y^{(i)} \pm \frac{dv_y}{dt} t,$$

$$D^{(i+1)} = D^{(i)} \pm \frac{dD}{dt} t,$$

где $\frac{dD}{dt}$ – приращение расстояния от фазового центра ФАР до ПАП; $\frac{dv_x}{dt}, \frac{dv_y}{dt}$ – приращения

направляющих косинусов по координате x, y соответственно за время между этапами адаптации, величина которых зависит от тангенциальных составляющих вектора скорости по азимуту и углу места соответственно [9]:

$$v_\alpha = D \left(\frac{dv_x}{dt} \cos \alpha - \frac{dv_y}{dt} \sin \alpha \right) / \cos \theta,$$

$$v_\theta = D \left(\frac{dv_x}{dt} \sin \alpha - \frac{dv_y}{dt} \cos \alpha \right) / \sin \theta.$$

Тогда временная задержка помехи в $(i+1)$ -й момент времени

$$\Delta t_{nk,j}^{(i+1)} = [k d_x (v_x^{(i)} \pm \frac{dv_x}{dt} t) + j d_y (v_y^{(i)} \pm \frac{dv_y}{dt} t)] / c.$$

Цифровое формирование ДН ФАР

В отечественной и зарубежной литературе особое внимание уделяется адаптивному формированию нулей ДН антенны в направлении на ПАП, реализуемому в цифровом виде [14 – 17]. Принцип цифрового формирования ДН ФАР основан на дискретном преобразовании Фурье (ДПФ) амплитудно-фазового распределения ФАР. С учетом того, что пространственная избирательность ФАР определяется множителем решетки [18], то для плоской ФАР с прямоугольным раскрытием его можно представить в виде двумерного ДПФ амплитудно-фазового распределения:

$$h(v_x, v_y) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} \hat{W}_{nm} e^{i \hat{\psi}_{nm}} e^{i \left(\frac{2\pi n d_x}{\lambda} v_x + \frac{2\pi m d_y}{\lambda} v_y \right)},$$

где $\hat{W}_{nm}, \hat{\psi}_{nm}$ – амплитуда и фаза соответственно оценки весового коэффициента для элемента ФАР n -й строки и m -го столбца, N, M – количество строк и столбцов в ФАР соответственно.

Пространственную выборку входной реализации можно записать:

$$B(v_x, v_y, t) = \{ \hat{s}(t + \tau_r) e^{i 2\pi f_a t} + p(t) \} \times \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} \hat{W}_{nm} e^{i \hat{\psi}_{nm}} e^{i 2\pi m \left(\frac{d_y v_y}{\lambda} \right)} e^{i 2\pi n \left(\frac{d_x v_x}{\lambda} \right)},$$

где $\hat{s}(t + \tau_r)$ – комплексная огибающая отраженного от цели сигнала, содержащая

информацию о дальности объекта; τ_r – время задержки отраженного сигнала относительно переданного, определяемое наклонной дальностью до цели; f_d – частота Доплера, $p(t)$ – АШП.

Для оптимального алгоритма непосредственного обращения матрицы оценка ВВК определяется как собственный вектор, соответствующий максимальному собственному значению матричного произведения $\hat{\mathbf{W}} \leftarrow \hat{\mathbf{R}}_{\text{нш}}^{-1} \mathbf{R}_c$, где обратная МКМ (1) в соответствии с тождеством Вудбери: $\hat{\mathbf{R}}_{\text{нш}}^{-1} = \mathbf{I} - \frac{\gamma \hat{\mathbf{f}}_{\text{п}} \hat{\mathbf{f}}_{\text{п}}^H}{1 + \gamma \hat{\mathbf{f}}_{\text{п}}^H \hat{\mathbf{f}}_{\text{п}}}$, \mathbf{R}_c – МКМ сигнала.

В случае движущейся АШП оценка МКМ при адаптации не совпадает с МКМ выражения (2). Тогда мощность помехи на выходе системы обработки при адаптации ФАР без учета угловой скорости ПАП:

$$P_{\text{п+ш}} = \mathbf{R}_c^H \left(\mathbf{I} - \frac{\gamma \hat{\mathbf{f}}_{\text{п}} \hat{\mathbf{f}}_{\text{п}}^H}{1 + \gamma \hat{\mathbf{f}}_{\text{п}}^H \hat{\mathbf{f}}_{\text{п}}} \right) \tilde{\mathbf{R}}_{\text{нш}} \left(\mathbf{I} - \frac{\gamma \hat{\mathbf{f}}_{\text{п}} \hat{\mathbf{f}}_{\text{п}}^H}{1 + \gamma \hat{\mathbf{f}}_{\text{п}}^H \hat{\mathbf{f}}_{\text{п}}} \right) \mathbf{R}_c^H.$$

Для оценки влияния угловой скорости на качество подавления активной помехи применялось снижение $\Delta\mu$ коэффициента улучшения отношения (сигнал – помеха+шум) (ОСПШ) оптимального алгоритма непосредственного обращения МКМ в случае неподвижной помехой по сравнению с угловым смещением АШП.

На рис. 2 и 3 представлены зависимости снижения $\Delta\mu$ коэффициента улучшения ОСПШ алгоритма формирования ДН от приращения направляющего косинуса за время между этапами для линейной эквидистантной ФАР с $N=15$ при действии помехи по ближнему боковому лепестку $\nu_{\text{нп}}=0,1$ и по лепесткам с $\nu_{\text{нп}}=0,2; 0,3; 0,4$ соответственно.

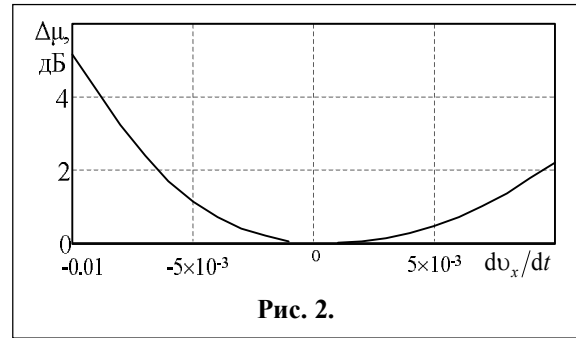


Рис. 2.

Из рис. 2, 3 можно сделать вывод, что при использовании оптимального алгоритма непосредственного обращения МКМ для линейной ФАР $N=15$ наибольшее внимание стоит уделять случаям действия АШП по ближнему лепестку ДН ФАР при смещении помехи в область главного лепестка, так как уменьшение коэффициента улучшения происходит на 1-5 дБ.

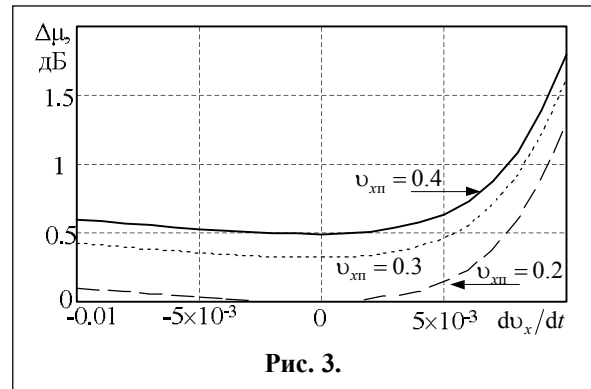


Рис. 3.

Заключение

Для увеличения эффективности адаптивной обработки целесообразно выбирать время между интервалами адаптации таким образом, чтобы можно было пренебречь смещением помехи, либо же подстраивать положение нуля ДН в зависимости от угловой скорости ПАП с учетом максимизации отношения сигнал – (АШП+шум).

Литература

1. Добыкин В.Д., Куприянов А.И., Пономарев В.Г., Шустов Л.Н. Радиозлектронная борьба. Цифровое запоминание и воспроизведение радиосигналов и электромагнитных волн / под ред. А. И. Куприянова. – М: Вузовская книга, 2009. – 360 с.
2. Радиозлектронное подавление информационных каналов систем управления

оружием / под ред. Ю.М. Перунова. – М.: Радиотехника, 2008. – 416 с.

3. Mailloux R.J. Covariance matrix augmentation to produce adaptive array pattern troughs // *Electron. Lett.* – 1995. – Vol. 31. – P. 771-772.

4. Zatman M. Production of adaptive array troughs by dispersion synthesis // *Electron. Lett.* – 1995. – Vol. 31, No. 25. – P. 2141-2142.

5. Нечаев Ю.Б., Борисов Д.Н., Пешков И.В. Алгоритм формирования диаграммы направленности кольцевой антенной решетки, устойчивый к многолучевому распространению и нестационарным источникам помех // *Известия вузов. Радиоэлектроника.* – 2011. – Т. 54, № 11. – С. 26-34.

6. Gershman A.B., Nickel U., Buhme J.F. Adaptive beamforming algorithms with robustness against jammer motion // *IEEE Trans. Signal Processing.* – 1997. – Vol. 4. – P. 1878-1885.

7. Riba J., Goldberg J., Vazquez G. Robust beamforming for interference rejection in mobile communications // *IEEE Trans. Signal Processing.* – 1997. – Vol. 45. – P. 271-275.

8. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.

9. Коростелев А.А. Пространственно-временная теория радиосистем. – Радио и связь, 1987. – 320 с.

10. Обработка сигналов в радиотехнических системах / под ред. А.П. Лукошкина. – Л.: изд-во Ленингр. ун-та, 1987. – 400 с.

11. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки. Введение в теорию / пер. с англ.

под ред. В.А. Лексаченко. – М.: Радио и связь, 1986. – 446 с.

12. Черемисин О.П., Ратынский М.В., Комов А.А., Пушин А.Е. Эффективный проекционный алгоритм адаптивной пространственной фильтрации // *Радиотехника и электроника.* – 1994. – Т. 39, №2. – С. 259-263.

13. Ратынский М.В. Адаптация и сверхразрешение в адаптивных антенных решетках. – М.: Радио и связь, 2003. – 200 с.

14. Григорьев Л.Н. Цифровое формирование диаграммы направленности в фазированных антенных решетках. – М.: Радиотехника, 2010. – 144 с.

15. Van Trees Harry L. Optimum Array Processing. Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory. – New York: JOHN WILEY & SONS. – 2002. – 1470 pp.

16. Алексеев С.Д. Цифровое диаграммообразование в фазированной антенной решетке с использованием сигнальных процессоров // *Цифровая обработка сигналов.* – 2002. – № 2. – С. 54-55.

17. Шмачилин П.А. Характеристики направленности антенных решеток при цифровой обработке сигналов на несущей // *Антенны.* – 2011. – №3. – С. 47-56.

18. Журавлев А.К., Лукошкин А.П., Поддубный С.С. Обработка сигналов в адаптивных антенных решетках. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1983. – 240 с.

Поступила 20 мая 2015 г.

English

Phased antenna array nulling in case of active jammer re-location

Ekaterina Sergeyevna Shtrunova – Candidate of Engineering, Associate Professor “Ryazan State Radio Engineering University”.

E-mail: shtrunova.e.s@rsreu.ru.

Address: 390005, Ryazan, Gagarin St., 59/1.

Abstract: Angular motion of active jammer at the time interval between adaptation stages leads to rerouting of direction of active jamming in the environment of radio-electronic counteraction. In regard to this the jamming leaves area of earlier nulled beam pattern of receiving phased antenna array of the radar-location system. The article gives evaluation of reduction of signal-to-noise ratio improvement factor -(jamming+noise) optimum algorithm of direct inversion of selective interchannel correlation jamming matrix with direction cosines incrementation of active jamming between adaptation stages in comparison with passive jamming. Active jamming in near pattern lobe of phased antenna array when its angular direction approaches area of the main lobe has the greatest impact on efficiency of algorithms of adaptive processing at angular motion rate of active jammer. To reduce the impact of jammer angular rate it is expedient to minimize time between adaptation intervals so that it could be possible to neglect change of jamming angular position or to adjust pattern null position depending on jammer angular rate in view of maximizing signal-to-jamming ratio- (jamming+noise).

Key words: active noise jamming, adaptation of phased antenna array, jammer angular rate.

References

1. Dobykin V.D., Kupriyanov A.I., Ponomarev V. G., Shustov L.N. Radio-electronic warfare. Digital storing and reproduction of radio signals and electromagnetic waves. - Ed.by A. I. Kupriyanov. - M: Vuzovskaya kniga, 2009. - 360 p.
2. Radio-electronic suppression of data channels of weapon control systems. - Ed.by Yu.M. Perunov. - M.: Radiotekhnika, 2008. - 416 p.
3. Mailloux R.J. Covariance matrix augmentation to produce adaptive array pattern troughs. - Electron. Lett. - 1995. - Vol. 31. - P. 771-772.
4. Zatman M. Production of adaptive array troughs by dispersion synthesis. - Electron. Lett. - 1995. - Vol. 31, No. 25. - P. 2141-2142.
5. Nechayev Yu.B., Borisov D. N., Peshkov I.V. Algorithm of pattern beam forming of ring antenna array, resistant to multibeam transmission and to jamming non-stationary sources. - Izvestiya vuzov. Radioelektronika. - 2011. - T. 54, No. 11. - P. 26-34.
6. Gershman A.B., Nickel U., Buhme J.F. Adaptive beamforming algorithms with robustness against jammer motion. - IEEE Trans. Signal Processing. - 1997. - Vol. 4. - P. 1878-1885.
7. Riba J., Goldberg J., Vazquez G. Robust beamforming for interference rejection in mobile communications. - IEEE Trans. Signal Processing. - 1997. - Vol. 45. - P. 271-275.
8. Shirman Ya.D., Manzhos V. N. Theory and technology of radar data processing amid jamming. - M.:Radio i svyaz, 1981. - 416 p.
9. Kupriyanov A.I., Sakharov A.V. Basic theory of radio-electronic warfare. - M.: Vuzovskaya kniga, 2007. - 356 p.
10. Korostelev A.A. Spatially-temporal theory of radio systems. - Radio i svyaz, 1987. - 320 p.
11. Processing of signals in radio technical systems. - Ed.by A.P. Lukoshkin. - L.: izdatelstvo Leningradskogo universiteta, 1987. - 400 p.
12. Monzingo R. A., Miller T.U. Adaptive antenna arrays. Introduction to theory. - Transl. from Engl. Ed.by V.A. Leksachenko. - M.: Radio i svyaz, 1986. - 446 p.
13. Cheremisin O. P., Ratynsky M. V., Komov A.A., Pushin A.E. Effective projective algorithm of adaptive spatial filtration. - Radiotekhnika i elektronika. - 1994. - T. 39, No. 2. - P. 259-263.
14. Ratynsky M. V. Adaptation and superresolution in adaptive antenna arrays. - M.: Radio i svyaz, 2003. - 200 p.
15. Grigoriev L.N. Digital pattern beam forming in phased antenna arrays. - M.: Radiotekhnika, 2010. - 144 p.
16. Van Trees Harry L. Optimum Array Processing. Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory. - New York: JOHN WILEY & SONS. - 2002. - 1470 pp.
17. Alekseev S. D. A Digital pattern beam forming in phased antenna array with using signal processors. - Tsifrovaya obrabotka signalov. - 2002. - No. 2. - P. 54-55.
18. Shmachilin P. A. Characteristics of antenna arrays' directivity with digital processing of carrier's signals. - Antenny. - 2011. - No. 3. - P. 47-56.
19. Zhuravlev A.K., Lukoshkin A.P., Poddubny S. S. Signals processing in adaptive antenna arrays. - L.: izdatelstvo Leningradskogo universiteta, 1983. - 240 p.