

УДК 621.396.969.1

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДВУХКАНАЛЬНЫХ УГЛОВЫХ ДИСКРИМИНАТОРОВ ПРИ ЛИНЕЙНОМ СКАНИРОВАНИИ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫ

М.М. БУЛАШ, С.В. ШАЛЯПИН

ОАО «АЛЕВКУРП», Республика Беларусь

Поступила в редакцию 9 января 2019

**Аннотация.** Приведены результаты сравнительного анализа разных типов дискриминаторов, работающих при линейном сканировании диаграммы направленности, а также дискриминатора моноимпульсной пеленгации, работающего по методу амплитудного мгновенного сравнения.

*Ключевые слова:* пеленгация, линейное сканирование, дискриминатор, корреляция.

**Abstract.** The comparative analysis results of various types of discriminators operating under linear scanning of the radiation pattern, as well as the single-pulse direction finding discriminator using the comparison amplitude method are presented.

*Keywords:* direction finding, linear scanning, discriminator, correlation.

**Doklady BGUIR. 2019, Vol. 122, No. 4, pp. 18-24**  
**Comparative analysis of two-channel angular discriminators**  
**under linear scanning of the antenna radiation pattern**  
**M.M. Bulash, S.V. Shaliapin**

### Введение

В [1, 2] произведен синтез и получены структурные схемы оптимального дискриминатора угломера при линейном сканировании диаграммы направленности антенны (ДНА), использующего для снижения флуктуационных ошибок второй канал обработки сигнала с несканирующей антенной. В [3] приведен синтез более простого оптимального дискриминатора для сигналов, не имеющих междупериодной корреляции.

Следующий шаг в упрощении структуры дискриминатора сделан в [4] путем перехода к квазиоптимальной структуре углового дискриминатора, работающего по быстро флуктуирующему или шумоподобному сигналу. Для количественной оценки эффективности предложенных в [1–4] дискриминаторов, сравнения их эффективности с классическими типами дискриминаторов в настоящей работе представлены результаты имитационного моделирования, где определялась смещенность оценки, а также флуктуационные ошибки измерения угловых координат источника излучения.

### Описание исследуемых дискриминаторов

Работа синтезированного в [1] оптимального двухканального дискриминатора угломера (ОД) при линейном сканировании ДНА основана на поиске максимума отношения правдоподобия [5–8]:

$$Z(\hat{\theta}_c, \theta_c) = \xi^\dagger(\theta_c) \left[ \mathbf{Q}^\Phi - \mathbf{Q}^{c+\Phi}(\hat{\theta}_c) \right] \xi(\theta_c) + \ln \left( \frac{\text{Det}(\mathbf{R}^\Phi)}{\text{Det}(\mathbf{R}^{c+\Phi}(\hat{\theta}_c))} \right) \quad (1)$$

где  $\xi(\theta_c) = \{\xi_0, \dots, \xi_i, \dots, \xi_N\}^T$  – отсчеты принятого сигнала  $\text{Det}(\cdot)$  – определитель матрицы;  $\mathbf{R}^\Phi$  – корреляционная матрица радиолокационного фона (смесь помехи и шума);  $\mathbf{R}^{c+\Phi}(\hat{\theta}_c)$  – корреляционная матрица принятого сигнала (смесь отраженного сигнала, помехи и шума);  $\mathbf{Q}^\Phi$  – обратная корреляционная матрица фона  $\mathbf{Q}^\Phi = (\mathbf{R}^\Phi)^{-1}$ ;  $\mathbf{Q}^{c+\Phi}(\hat{\theta}_c)$  – обратная корреляционная матрица принятой смеси сигнала и фон  $\mathbf{Q}^{c+\Phi}(\hat{\theta}_c) = (\mathbf{R}^{c+\Phi}(\hat{\theta}_c))^{-1}$ ;  $(\cdot)^\dagger$  – эрмитово сопряжение;  $\theta_c$  – истинное угловое положение источника сигнала;  $\hat{\theta}_c$  – оцениваемое угловое положение источника сигнала.

При работе по быстро флуктуирующему (шумоподобному) сигналу его корреляционная матрица имеет блочно-диагональный вид с блок-матрицами размером  $2 \times 2$ . Алгоритм (1) и структура оптимального двухканального дискриминатора для шумоподобного сигнала (далее (ОДДШС) могут быть существенно упрощены [3]. Дальнейшее упрощение структуры дискриминатора связано с переходом от оптимального к квазиоптимальному двухканальному дискриминатору шумоподобного сигнала (КДДШС) [4]. Такой переход основан на требовании высокого отношения сигнал/фон и как следствие – отказе от учета корреляционной матрицы фона  $\mathbf{Q}^\Phi$  и второго слагаемого в правой части выражения (1).

Помимо этих дискриминаторов в радиолокационной технике известны дискриминаторы на основе эвристических подходов, в которых сигнал на их входе представляет собой отношение сигнала в канале сканирующей антенны к сигналу в канале несканирующей антенны. Это позволяет частично компенсировать флуктуации сигнала на входе дискриминатора. Принцип работы такого дискриминатора поясняет рис. 1, где  $\xi_{ca}(\theta_c)$  – сигнал в канале сканирующей антенны,  $\xi_{na}(\theta_c)$  – сигнал несканирующей антенны. Такой дискриминатор будем называть двухканальным дискриминатором с делением сигналов (ДДДС).

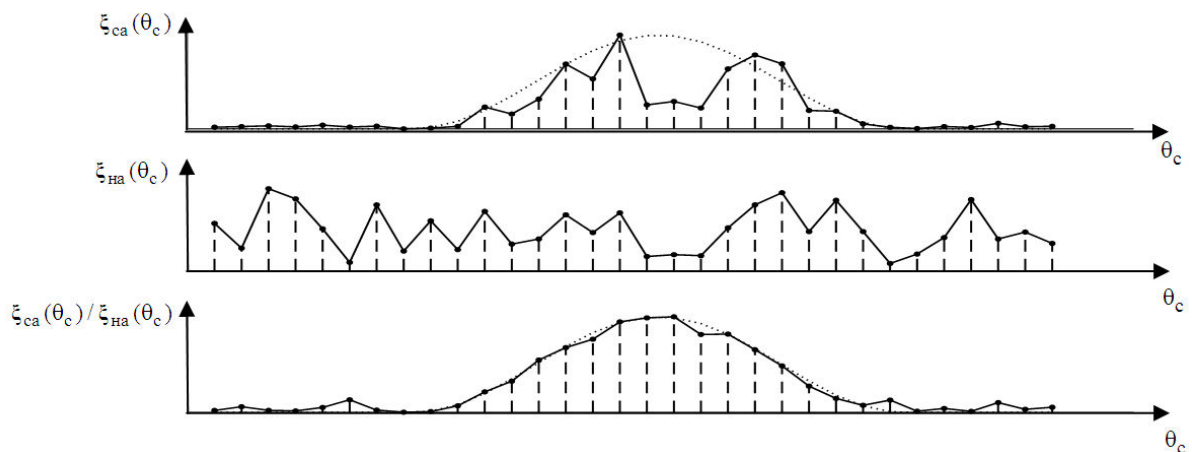


Рис. 1. Иллюстрация компенсации междупериодной флуктуации пачки

Для сравнения, кроме описанных выше двухканальных дискриминаторов в данной работе будут исследованы и классические дискриминаторы: оптимальный одноканальный дискриминатор при линейном сканировании ДНА (ООД) и дискриминатор, работающий по методу амплитудного мгновенного сравнения (АМС), который по своей структуре относится к двухканальным квазиоптимальным дискриминаторам. Следует отметить, что дискриминатор, работающий по методу АМС, тоже является двухканальным.

## Описание модели и результаты моделирования

Для исследования дискриминаторов использовалась программно-реализованная имитационная модель, имеющая следующие характеристики:

- ширина сканирующей ДНА  $1,1^\circ$
- число временных отсчетов (периодов повторения) сигнала в секторе сканирования  $N = 19$ ;
- время дискретизации (период повторения) отсчетов  $T_n = 250$  мкс;
- скорость сканирования антенны  $\Omega_a = 644$  °/с;
- количество циклов моделирования  $M = 10000$ ;
- корреляционная функция полезного сигнала во временной области соответствует экспоненциально-параболической функции;
- функция, аппроксимирующая огибающую сканирующей ДНА:

$$U_{ca}(\varphi) = \begin{cases} U \cos(\varphi)^2, & |\varphi| \leq \frac{\pi}{2} \\ 0, & |\varphi| > \frac{\pi}{2} \end{cases},$$

где  $U$  – амплитуда огибающей,  $\varphi$  – угловое направление;

- множитель огибающей несканирующей ДНА в секторе сканирования  $U_{на} = 1$ ;
- мощность шума приемника (одинакова для обоих каналов)  $\sigma_0^2 = 10$ ;
- мощность полезного сигнала  $\sigma_c^2 = \rho \sigma_0^2$ ,  $\rho$  – отношение сигнал/шум на входе приемной антенны;
- фон представлен шумом приемника;
- угловое положение источника сигнала  $\theta_c = 0,15^\circ$ ;
- время корреляции сигнала и отношение сигнал/шум считаются известными.

Оценке подлежали отклонение математического ожидания (МО) измеренной угловой координаты источника сигнала от его истинного значения (смещенность оценки) и среднее квадратическое отклонение (СКО) оценки угловой координаты в зависимости от времени корреляции сигнала пачки, отношения сигнал/шум и коэффициента междуканальной корреляции.

На рис. 2 представлены зависимости СКО и МО оценки углового положения источника сигнала от времени корреляции сигнала при отношении сигнал/шум  $\rho = 30$  дБ и коэффициенте междуканальной корреляции  $h_{01} = 1$ .

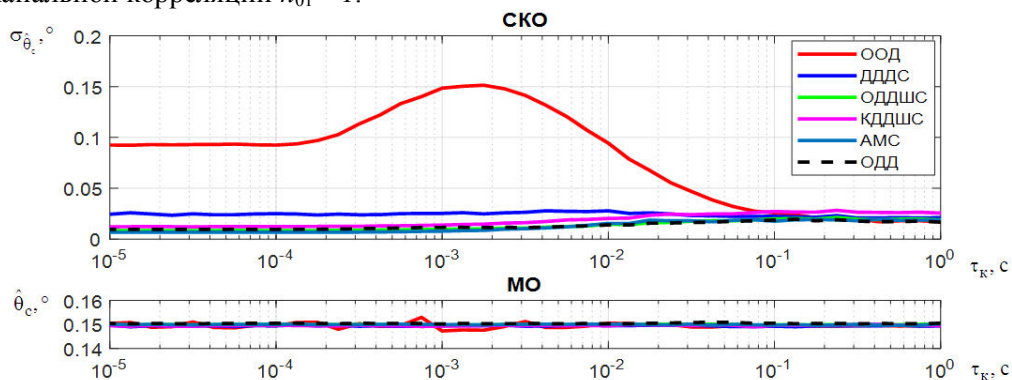


Рис. 2. Зависимость СКО измеренного угла от времени корреляции полезного сигнала при абсолютной междуканальной корреляции

Результаты моделирования показывают, что оценки МО угловой координаты не смещены (рис. 2) и соответствуют истинному угловому положению источника сигнала для всех типов дискриминаторов, что свидетельствует о правильности их работы. На рис. 2 можно наблюдать многократное увеличение СКО оценки угловой координаты для ООД по мере убывания времени корреляции. Пик СКО оценки угловой координаты в ООД наблюдается при времени корреляции  $\tau_k = 1,7$  мс, которое соизмеримо с эффективной длительностью пачки.

В этом случае смещение энергетического центра пачки максимально.

Остальные двухканальные дискриминаторы показывают существенно меньшие ошибки оценки угловой координаты при сильно флуктуирующем сигнале. При этом работающие на основе квазиоптимальных и эвристических алгоритмов КДДШС и ДДС показывают худшие точности по сравнению с дискриминаторами, работающими по оптимальным алгоритмам.

Из-за выбранного высокого отношения сигнал/фон двухканальные дискриминаторы ОДД, ОДДШС и работающий по методу АМС осуществляют некогерентное накопление временных отсчетов сигнала [5] и показывают практически равные точности оценок угловой координаты. На рис. 3 представлены зависимости СКО и МО оценки угловой координаты источника излучения сигнала от времени корреляции  $\tau_k$  для двух значений коэффициентов междуканальной корреляции сигнала  $h_{01} = 0,95$  и  $h_{01} = 0,75$ .

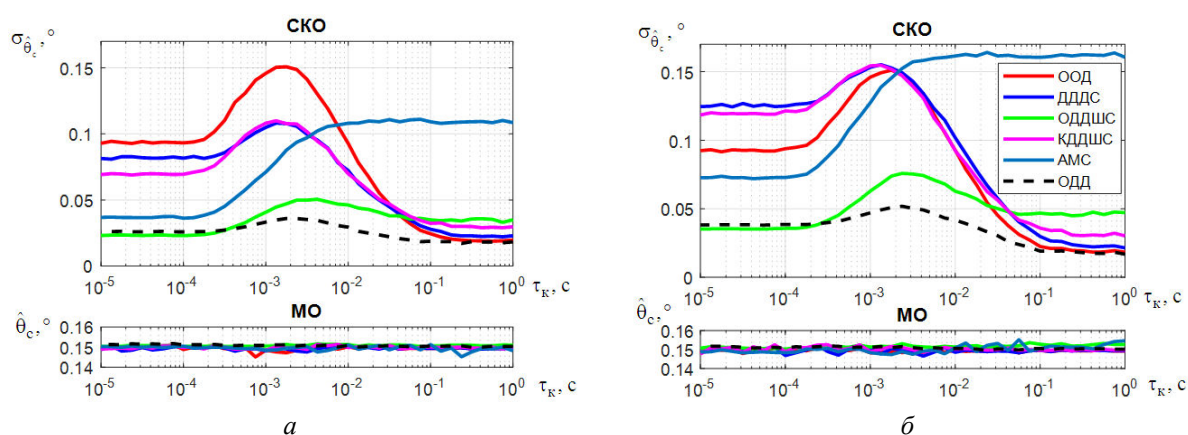


Рис. 3. Зависимости СКО и МО измеренного угла от времени корреляции для  $h_{01} = 0,95$  (а) и  $h_{01} = 0,75$  (б)

Анализируя зависимости, представленные на рис. 3, видно, что с уменьшением междуканальной корреляции, точность измерения угловой координаты также снижается. При этом можно выделить три характерных участка. Первый участок ( $\tau_k > 100$  мс) соответствует случаю сильно коррелированного по времени сигнала, пачка флуктуирует дружно. На данном участке наихудшую точность показывает дискриминатор, работающий по методу АМС. Это происходит из-за того, что структура такого дискриминатора была получена в предположении единичной корреляции сигнала в обоих его каналах. Остальные дискриминаторы для этого случая ( $\tau_k > 100$  мс) показывают меньшие СКО угловой координаты. При этом ОДДШС и КДДШС, не учитывающие временную корреляцию сигнала, показывают худшие результаты, по сравнению с одноканальным и двухканальными дискриминаторами, учитывающими эту корреляцию.

Второй участок при  $\tau_k < 0,1$  мс соответствует случаю быстрых флуктуаций сигнала. Двухканальные дискриминаторы (ОДД, ОДДШС) при обработке быстро флуктуирующего сигнала являются оптимальными и показывают наилучшие характеристики. Эффективность АМС выросла по сравнению со случаем сильно коррелированного по времени сигнала из-за усреднения оценки угловой координаты в течении времени наблюдения сигнала. ООД, КДДШС и ДДС многократно проигрывают в точности оптимальным двухканальным дискриминаторам. Промежуточный участок – при  $0,1 \text{ мс} \leq \tau_k \leq 100 \text{ мс}$ . Особенностью данного диапазона является то, что здесь наблюдается возрастание ошибки угломеров для всех типов дискриминаторов. Пик СКО наблюдается при времени корреляции  $\tau_k \approx 2$  мс. Однако и в этом случае оптимальный двухканальный дискриминатор показывает наименьшую СКО оценки угловой координаты. С учетом наличия трех типовых участков зависимостей СКО от времени корреляции дальнейшее моделирование проводилось для трех значений времени корреляции:  $\tau_k = 100$  мс,  $\tau_k = 2$  мс,  $\tau_k = 0,01$  мс.

На рис. 4 и рис. 5 представлены зависимости СКО измеренного углового положения источника сигнала от отношения сигнал/шум для времени корреляции полезного сигнала  $\tau_k = 100$  мс,  $\tau_k = 2$  мс,  $\tau_k = 0,01$  мс при  $h_{01} = 1$  и  $h_{01} = 0,9$  соответственно.

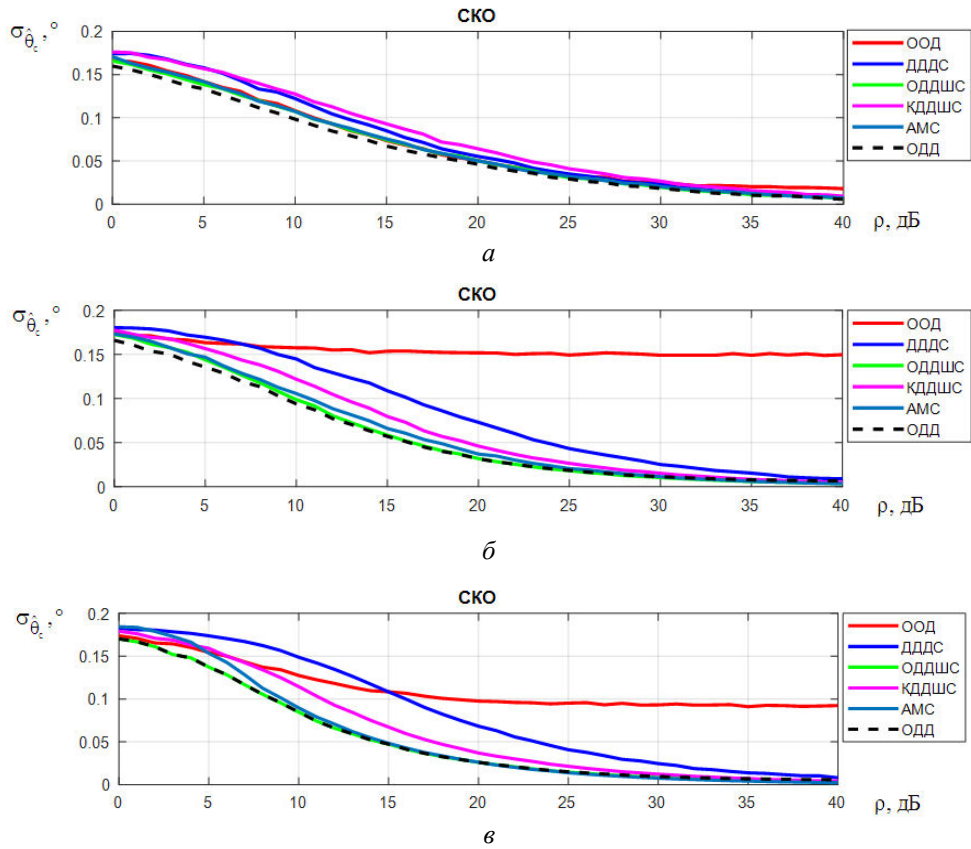


Рис. 4. Зависимости СКО измеренного угла от отношения сигнал/шум для  $h_{01} = 1$  при  $\tau_k = 100$  мс (а),  $\tau_k = 2$  мс (б),  $\tau_k = 0,01$  мс (в)

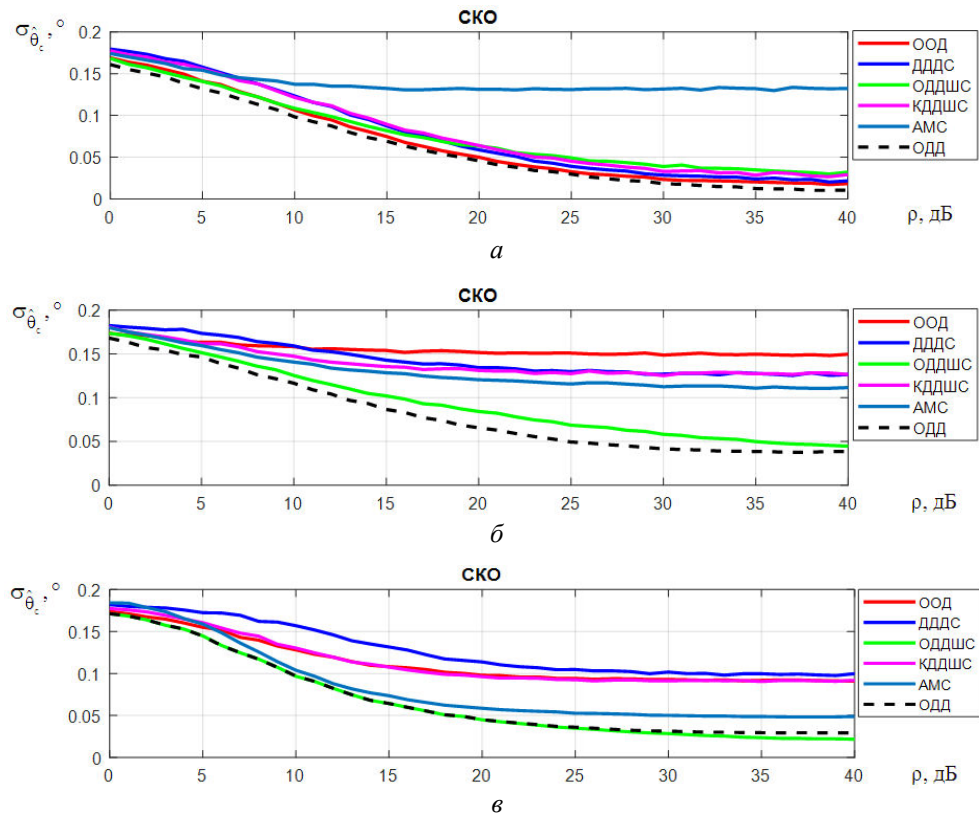


Рис. 5. Зависимости СКО измеренного угла от отношения сигнал/шум для  $h_{01} = 0,9$  при  $\tau_k = 0,01$  мс (а),  $\tau_k = 2$  мс (б),  $\tau_k = 100$  мс (в)

В случае дружно флуктуирующей пачки, рис. 4, а, СКО оценки угловой координаты для всех типов дискриминаторов очень близки. Использование двухканальных дискриминаторов в таких условиях нецелесообразно. Для быстро флуктуирующего сигнала, рис. 4, б, в, с ростом отношения сигнал/шум эффективность двухканальных дискриминаторов существенно превышает эффективность одноканального дискриминатора. Оптимальные двухканальные дискриминаторы (ОДДШС, ОДД) по эффективности не уступают, а при малом отношении сигнал/шум даже превосходят дискриминатор, работающий в соответствии с методом АМС. Эвристический и квазиоптимальный двухканальные ДДДС и КДДШС по своей эффективности занимают промежуточное положение между оптимальным двухканальным и одноканальным дискриминаторами.

Сравнение зависимостей рис. 4 и рис. 5 показывает, что снижение междуканальной корреляции каналов отрицательно сказывается на точности всех двухканальных дискриминаторов, это было показано и ранее на рис. 3. Особенно сильно это проявляется в дискриминаторе АМС, ДДДС и КДДШС. ООД в силу своей одноканальности не чувствителен к изменению междуканальной корреляции. Оптимальные двухканальные дискриминаторы (ОДД и ОДДШС), несмотря на общее снижение точности в измерении угловой координаты, имеют наибольшую эффективность среди дискриминаторов, рассмотренных в данной статье.

### Заключение

В работе путем статистического моделирования было проведено сравнение ошибок разовой оценки угловой координаты цели оптимального одноканального дискриминатора, оптимальных и квазиоптимальных двухканальных дискриминаторов, работающих по методу линейного сканирования ДНА и дискриминатора моноимпульсного измерителя, работающего по методу АМС. Результаты моделирования показали, что для быстро флуктуирующих сигналов с высокой междуканальной корреляцией двухканальные дискриминаторы имеют существенно меньшие ошибки оценки угловой координаты цели по сравнению с одноканальным дискриминатором, работающим по методу линейного сканирования диаграммы направленности. В квазиоптимальных двухканальных дискриминаторах (ДДДС и КДДШС) точность оценки угловой координаты существенно снижается при работе по быстро флуктуирующему сигналу или при малом коэффициенте междуканальной корреляции. ОДД при работе по сигналам с сильной междуканальной корреляцией практически совпадает по эффективности с дискриминатором АМС. Однако при снижении коэффициента междуканальной корреляции эффективность метода АМС существенно падает.

Таким образом, при проектировании пеленгаторов предпочтение следует отдавать двухканальным угловым дискриминаторам, при этом следует выбирать технические решения, направленные на обеспечение максимально возможной междуканальной корреляции сигнала на входе дискриминатора.

### Список литературы

1. Булаш М.М., Шаляпин С.В. Синтез оптимального двухканального угломера с линейным сканированием диаграммы направленности антенны // Докл. БГУИР. 2016. № 4 (98). С. 35–39.
2. Булаш М.М., Малевич И.Ю., Шаляпин С.В. Двухканальный измеритель угловых координат сильнофлуктуирующей цели для линейного сканирования диаграммы направленности антенны // Тез. докл. 51-й науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. Минск, 7 мая 2015. С. 13.
3. Булаш М.М., Шаляпин С.В. Синтез двухканального дискриминатора угломера, работающего по непрерывному помеховому сигналу при линейном сканировании диаграммы направленности антенны // Докл. БГУИР. 2017. № 5 (107). С. 19–25
4. Булаш М.М., Давыденко И.Н., Шаляпин С.В. Квазиоптимальный дискриминатор двухканального измерителя угловых координат источника быстрофлуктуирующего сигнала в радиолокационной станции с линейным сканированием диаграммы направленности антенны // Докл. БГУИР. 2018. № 2 (112). С. 33–38.
5. Охрименко А.Е. Основы радиолокации и РЭБ. Ч.1. Основы радиолокации. М., 1983. 456 с.
6. Kurlovich V.I., Shaliapin S.V., Bashkevich V.Ya. Digital Processing of Broadband Portraits in a Detection-Recognition Filter System // Electromagnetic Waves & Electronic Systems. 1999. Vol. 4, No. 1. P. 17–27.

7. Адхам Салим Аль-Муаз, Шаляпин С.В. Устройства обработки амплитудных регулярно-коррелированных сигналов // Докл. БГУИР. 2007. № 3 (19). С. 43–49.
8. Ярмолик С.Н., Шаляпин С.В. Решение задачи распознавания классов объектов на основе быстрых алгоритмов цифровой обработки сигналов // Докл. БГУИР. 2003. Т. 1, № 3. С. 24–27.

### References

1. Bulash M.M., Shaljapin S.V. Sintez optimal'nogo dvuhkanal'nogo uglomera s linejnym skanirivaniem diagrammy napravlenosti anteny // Dokl. BGUIR. 2016. № 4 (98). S. 35–39. (in Russ.)
2. Bulash M.M., Malevich I.Ju., Shaljapin S.V. Dvuhkanal'nyj izmeritel' uglovyh koordinat sil'nofluktuirujushhej celi dlja linejnogo skanirivanija diagrammy napravlenosti anteny // Tez. dokl. 51-j nauch. konf. aspirantov, magistrantov i studentov BGUIR. Minsk, 7 maja 2015. S. 13. (in Russ.)
3. Bulash M.M., Shaljapin S.V. Sintez dvuhkanal'nogo diskriminatora uglomera, rabotajushhego po nepreryvnomu pomehovomu signalu pri linejnom skanirivanii diagrammy napravlenosti anteny // Dokl. BGUIR. 2017. № 5 (107). S. 19–25. (in Russ.)
4. Bulash M.M., Davydenko I.N., Shaljapin S.V. Kvazioptimal'nyj diskriminator dvuhkanal'nogo izmeritelja uglovyh koordinat istochnika bystrofluktuirujushhego signala v radiolokacionnoj stancii s linejnym skanirivaniem diagrammy napravlenosti anteny // Dokl. BGUIR. 2018. № 2 (112). S. 33–38. (in Russ.)
5. Ohrimenko A.E. Osnovy radiolokacii i RJeB. Ch.1. Osnovy radiolokacii. M., 1983. 456 s. (in Russ.)
6. Kurlovich V.I., Shaliapin S.V., Bashkevich V.Ya. Digital Processing of Broadband Portraits in a Detection-Recognition Filter System // Electromagnetic Waves Electronic Systems. 1999. Vol. 4, No. 1. P. 17–27. (in Russ.)
7. Adham Salim Al'-Muaz, Shaljapin S.V. Ustrojstva obrabotki amplitudnyh reguljarno-korrelirovannyh signalov // Dokl. BGUIR. 2007. № 3 (19). S. 43–49. (in Russ.)
8. Jarmolik S.N., Shaljapin S.V. Reshenie zadachi raspoznavanija klassov ob'ektov na osnove bystryh algoritmov cifrovoj obrabotki signalov // Dokl. BGUIR. 2003. T. 1, № 3. S. 24–27. (in Russ.)

#### Сведения об авторах

Булаш М.М., младший научный сотрудник  
ОАО «АЛЕВКУРП».

Шаляпин С.В., к.т.н, доцент, начальник научного  
исследовательского сектора ОАО «АЛЕВКУРП».

#### Адрес для корреспонденции

220043, Республика Беларусь,  
г. Минск, пр. Независимости, 95, к. 7  
ОАО «АЛЕВКУРП»  
тел. +375-25-532-27-25;  
e-mail: max.302@rambler.ru  
Булаш Максим Михайлович

#### Information about the authors

Bulash M.M., junior researcher of JSC «ALEVKURP».

Shaliapin S.V., PhD, associate professor, head  
of scientific research sector of JSC «ALEVKURP».

#### Address for correspondence

220043, Republic of Belarus,  
Minsk, Nezavisimosti ave. 95, building 7  
JSC «ALEVKURP»  
tel. +375-25-532-27-25;  
e-mail: max.302@rambler.ru  
Bulash Maksim Mihailovich