

Для цитирования: Паршина Е. С. Способ пространственной селекции помех в моноимпульсной радиолокационной станции с фазированной антенной решеткой // Вопросы радиоэлектроники. 2020. № 12. С. 17–22
DOI 10.21778/2218-5453-2020-12-17-22
УДК 621.396.96

Е. С. Паршина¹

¹ АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс»

СПОСОБ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СЕЛЕКЦИИ ПОМЕХ В МОНОИМПУЛЬСНОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ С ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКОЙ

Приведено описание моноимпульсной радиолокационной системы (РЛС), в которой в качестве антенны канала подавления помех используется одна из подрешеток фазированной антенной решетки (ФАР) РЛС. При этом элементы ФАР, выделенные под канал подавления помех, также участвуют в формировании разностной и суммарной диаграмм направленности антенны моноимпульсной РЛС. Показано, что при использовании амплитудного распределения, плавно спадающего к концам апертуры для получения низких боковых лепестков суммарной диаграммы направленности основной антенны, диаграмма направленности подрешетки соответствует требованиям, которые предъявляются к антенне канала подавления помех. Рассмотрен пример такой системы с различными амплитудными распределениями поля в раскрыве основной антенны, полученными с использованием оконных функций. Проведен анализ тактико-технических параметров моноимпульсной РЛС и качества подавления помех, принимаемых в области боковых лепестков диаграммы направленности антенны РЛС.

Ключевые слова: моноимпульсная РЛС, канал подавления помех, оконные функции

Введение

Сигналы большой мощности, принимаемые боковыми лепестками диаграммы направленности антенны РЛС, снижают помехоустойчивость системы и показатели обнаружения полезных целей. В качестве таких сигналов могут выступать шумовые заградительные помехи, когерентные ответные помехи от постановщика активных помех или импульсные сигналы от других РЛС.

Основным способом борьбы с помехами, принимаемыми боковыми лепестками диаграммы направленности антенны РЛС, является их пространственная селекция. Среди способов и приемов пространственной селекции помех наиболее эффективными являются те, для работы которых необходимо наличие дополнительных антенны и приемника, что увеличивает стоимость и массогабаритные характеристики системы. При этом уровень диаграммы направленности компенсационной (дополнительной) антенны должен быть выше уровня боковых лепестков диаграммы направленности основной антенны [1].

В настоящей работе рассматривается способ пространственной селекции помех [2], при котором в качестве антенны и приемника канала подавления

помех предлагается использовать сигнал с подрешетки РЛС. Таким образом, организация канала подавления помех не влечет за собой увеличения стоимости и массогабаритных характеристик системы. Данный способ применим для РЛС с многоэлементной ФАР блочно-модульного типа построения [2]. В литературе существуют упоминания об использовании некоторых элементов антенной решетки РЛС в качестве антенны канала подавления помех [3]. Отличие рассматриваемого случая состоит в том, что сигнал с выделенных под канал подавления помехи элементов РЛС используется не только в канале подавления, но и для формирования отклика от полезных целей, не снижая тем самым эффективную площадь апертуры антенны РЛС.

В настоящей работе рассмотрено применение способа пространственной селекции помех [2] в моноимпульсных РЛС и проведен расчет характеристик РЛС, осуществляющих пространственную селекцию помех выбранным способом.

Моноимпульсная РЛС с каналом подавления помех

Примем, что m и n – число подрешеток ФАР по горизонтали и вертикали, N – общее количество

подрешеток ФАР. На рис. 1 приведена схема разбиения апертуры антенны РЛС на подрешетки в общем случае, при этом пунктиром показано разбиение полотна на две подрешетки для реализации разностной диаграммы направленности с целью пеленгации цели в азимутальной плоскости.

На рис. 2 представлена структурная схема весовой обработки подрешеток для получения суммарной, разностной диаграмм направленности основной антенны и диаграммы направленности антенны канала подавления помех.

В качестве антенны канала подавления помех используется одна из подрешеток ФАР РЛС. Для реализации суммарной диаграммы направленности антенны РЛС сигналы со всех подрешеток складываются, а для получения разностной диаграммы направленности антенны РЛС происходит вычитание сигнала одной половины полотна антенны РЛС из сигнала другой половины. При этом все три диаграммы направленности антенн формируются с использованием одного амплитудного распределения на прием, плавно спадающего к концам апертуры антенны для получения приемной суммарной диаграммы направленности антенны РЛС с низкими боковыми лепестками. Амплитудное распределение антенных элементов формируется посредством использования оконных функций [4]. Рис. 3 иллюстрирует пример использования подрешетки РЛС в качестве канала

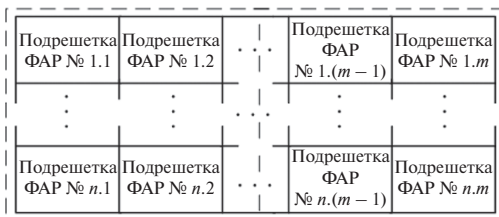


Рисунок 1. Схема разбиения полотна апертуры антенны радиолокационной системы

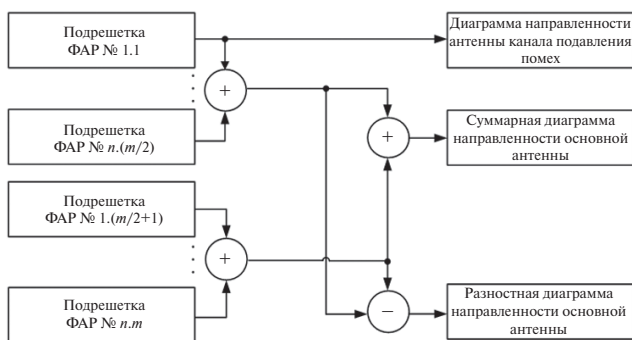


Рисунок 2. Схема весовой обработки подрешеток фазированной антенной решетки

подавления помех при амплитудном распределении, реализованном по закону «косинуса на пьедестале».

Для пространственной селекции помех совместная обработка сигналов, полученных с использованием суммарной диаграммы направленности антенны РЛС в основном канале и диаграммы направленности антенны канала подавления помех, может выполняться двумя способами [1]:

- обработка сигналов в основном и компенсационном каналах осуществляется параллельно одинаковым способом; выполняется сравнение результатов обработки в каждом элементе разрешения по дальности и по скорости; если в элементе разрешения разница между принятой мощностью в основном канале и в канале подавления помех больше порога подавления, то принимается решение о наличии помехи, и сигнал подавляется;
- подавление помехи происходит за счет использования свойств коррелированности сигналов, полученных в двух каналах; сигнал компенсационного канала вычитается из сигнала основного канала с некоторым весовым коэффициентом.

Эффективность пространственной селекции помех вторым способом характеризуется коэффициентом подавления помех (отношение мощности помехи на входе системы защиты к мощности помехи на ее выходе [5]). Коэффициент подавления помех зависит от выбора вектора весовых коэффициентов, который может быть заранее задан или подбираться адаптивно. В [5] показано, что в случае оптимального вектора весовых коэффициентов коэффициент подавления помехи не зависит от коэффициентов усиления антенн двух каналов и стремится к бесконечности. При этом достаточно превышения уровня диаграммы направленности антенны компенсационного канала над уровнем боковых лепестков суммарной диаграммы направленности основной антенны.

Эффективность пространственной селекции помех первым способом оценивается следующими показателями [1]:

- вероятность подавления сигнала в боковых лепестках диаграммы направленности основной антенны P_B ;
- вероятность ложной тревоги P_{FA} ;
- вероятность правильного обнаружения цели, находящейся в области главного лепестка диаграммы направленности основной антенны P_D ;
- вероятность правильного обнаружения цели, находящейся в области боковых лепестков диаграммы направленности основной антенны P_{FT} ;

- вероятность подавления сигнала цели, находящейся в области главного лепестка диаграммы направленности основной антенны P_{TB} .

Значения вероятностей P_B , P_{TB} и P_{FT} зависят от следующих параметров антенн двух каналов: запаса по усилению β , представляющего собой отношение коэффициента усиления антенны канала подавления помех к коэффициенту усиления основной антенны в направлении боковых лепестков; коэффициента усиления антенны канала подавления помех w , нормированного к коэффициенту усиления основной антенны.

Потенциальные характеристики моноимпульсной РЛС с каналом подавления помех

Проведем анализ возможности применения способа пространственной селекции помех с обработкой сигналов путем сравнения принятой мощности в каждом элементе разрешения по дальности и скорости.

Рассмотрим вероятность P_{TB} в зависимости от общего количества подрешеток антенны РЛС. Известно, что при допущении об одинаковой дисперсии шумов в канале подавления помех и суммарном канале вероятность P_{TB} можно вычислить по формуле [6–7]:

$$P_{TB} = 0,5 \times \left(1 - \frac{1}{F+1} \cdot \frac{SNR(F-w) - (F+1)}{\sqrt{(SNR(F-w) + F+1)^2 + 4SNR(F+1)w}} - \frac{F}{F+1} \cdot \frac{SNR(F-w) + (F+1)}{\sqrt{(SNR(F-w) - F-1)^2 + 4SNR(F+1)F}} \right), \quad (1)$$

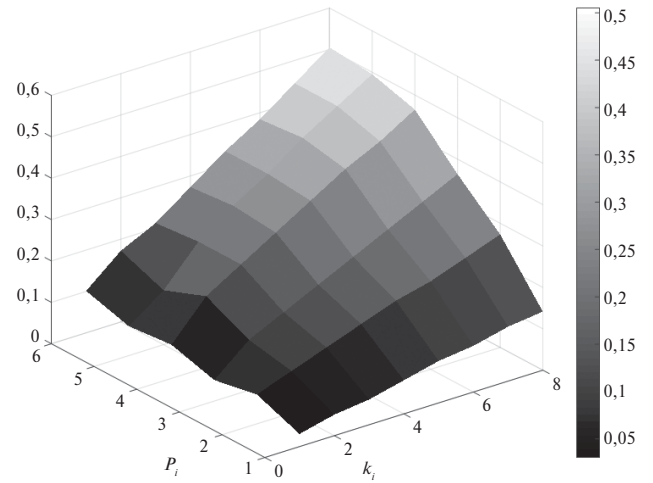
где SNR – отношение сигнал-шум; F – порог подавления.

Коэффициент w можно выразить через площади апертур антенн двух каналов:

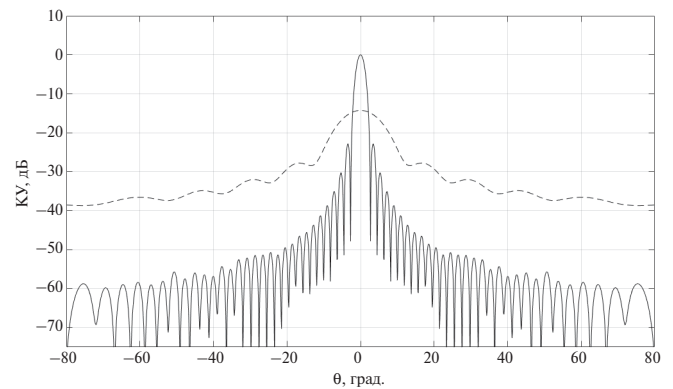
$$w = \frac{G_2}{G_1} = \frac{4\pi S_2 q_2}{\lambda^2} \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi S_1 q_1} = \frac{S_2 q_2}{NS_2 q_1} = \frac{q_2}{Nq_1}, \quad (2)$$

где G_2 и G_1 – коэффициенты усиления антенны канала подавления помех и антенны РЛС соответственно; S_2 – площадь антенны канала подавления помех; $S_1 = NS_2$ – площадь антенны РЛС; λ – длина волны; q_2 и q_1 – коэффициенты использования поверхности (КИП) антенны канала подавления помех и антенны РЛС соответственно.

Таким образом, коэффициент w обратно пропорционален количеству подрешеток. На рис. 4 представлены зависимости вероятности P_{TB} от отношения сигнал-шум при фиксированном пороге подавления для разных значений числа подрешеток



а)



б)

Рисунок 3. Параметры канала подавления помех [2]: а – амплитудное распределение подрешетки радиолокационной системы, где k_i и P_i – индексы антенного элемента подрешетки по горизонтали и вертикали соответственно; б – диаграмма направленности основной антенны (сплошная линия) и антенны канала подавления помех (прерывистая линия)

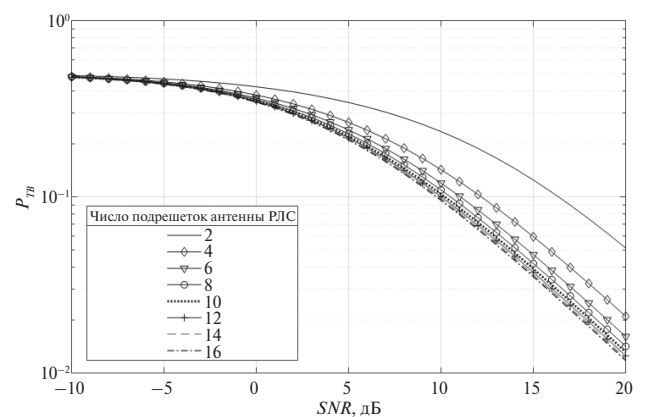


Рисунок 4. Зависимость вероятности P_{TB} от отношения сигнал-шум

антенны РЛС, полученные с использованием выражений (1) и (2).

Из рис. 4 следует, что при больших отношениях сигнал-шум вероятность $P_{TB} < 0,05$. Увеличение числа подрешеток, начиная с $N = 6$, практически не влияет на вероятность P_{TB} .

Дальнейший анализ показал, что не любое амплитудное распределение антенных элементов на прием подходит для реализации подрешетки антенны РЛС в качестве канала подавления помех. Рассмотрены различные оконные функции для получения суммарной диаграммы направленности основной антенны с уровнем боковых лепестков (УБЛ), равным -25 дБ, на примере 128-элементной линейной антенной решетки. Так, например, на рис. 5 представлены диаграммы направленности антенн основного и компенсационного каналов при

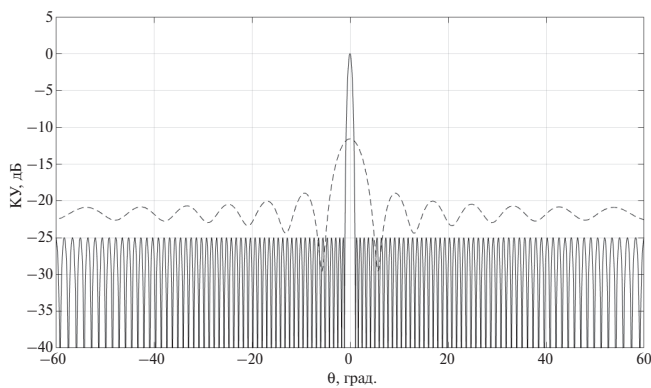


Рисунок 5. Диаграмма направленности антенны радиолокационной системы (сплошная линия) и антенны канала подавления помех (прерывистая линия)

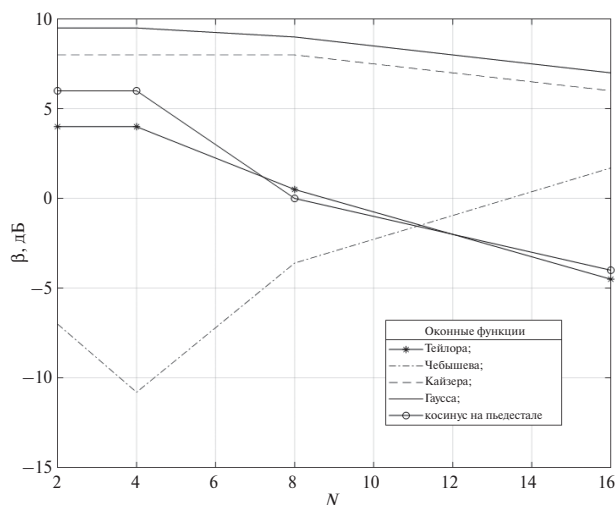


Рисунок 6. Зависимость минимального запаса по усилению от числа подрешеток радиолокационной системы при разных окнах

количестве подрешеток РЛС $N = 8$ и амплитудном распределении, сформированном с использованием полинома Чебышева. На рис. 5 видно, что существуют направления, при которых не обеспечивается подавление помехи, так как уровень боковых лепестков основной антенны в этих направлениях превышает уровень диаграммы направленности антенны компенсационного канала.

На рис. 6 изображены зависимости минимального запаса по усилению от числа подрешеток для амплитудных распределений, сформированных посредством оконных функций Тейлора, Чебышева, Кайзера, Гаусса, а также для распределения типа «косинус на пьедестале» [8].

Как видно из рис. 6, при $N \leq 6$ использование подрешетки ФАР для компенсации помех во всей области боковых лепестков антенны РЛС возможно при амплитудном распределении элементов апертуры антенны РЛС типа «косинус на пьедестале», а также распределениях, полученных посредством оконных функций Тейлора, Кайзера и Гаусса. Для антенн РЛС с большим числом подрешеток ($N > 15$) можно использовать амплитудное распределение поля в раскрыве антенны, сформированное посредством полинома Чебышева. Амплитудные распределения, сформированные с использованием оконных функций Кайзера и Гаусса, позволяют получить антенну канала подавления помех с большими значениями запаса по усилению.

Использование различных оконных функций снижает КИП антенны и в некоторых случаях ухудшает точность определения угловых координат цели моноимпульсных РЛС, показателем которой является крутизна пеленгационной характеристики. КИП антенны при различных оконных функциях приведен в таблице, а рис. 7 иллюстрирует пеленгационные характеристики моноимпульсной РЛС, которые были получены как мнимая часть комплексной разностной диаграммы направленности антенны РЛС [9] при различных амплитудных распределениях поля в раскрыве антенны.

На основании представленных на рис. 7 зависимостей можно сделать вывод, что среди рассмотренных оконных функций наибольшей крутизной пеленгационной характеристики, от которой зависит точность определения угловых координат цели, обладает амплитудное распределение антенных элементов с использованием полиномов Чебышева, наименьшей – амплитудное распределение, полученное посредством оконной функции Гаусса.

Таким образом, перед разработчиком моноимпульсных РЛС с каналом подавления помех, в качестве антенны которого используется подрешетка РЛС, встает задача оптимального выбора

Таблица. Характеристики моноимпульсной РЛС с каналом подавления помех при $N = 8$

Тип оконной функции	КИП антенны РЛС	Запас по усилению, дБ	
		минимальный	максимальный
Тейлора	0,91	0,5	15
Чебышева	0,82	- 3,6	6
Кайзера	0,92	8	17
Гаусса	0,88	9,3	18
Косинус на пьедестале	0,89	0	15

стоимости системы, которая, в частности, зависит от числа подрешеток ФАР, а также тактико-технических характеристик системы, включая показатели качества подавления помех.

Заключение

Предложен способ пространственной селекции помех, при котором в качестве антенны канала подавления помех используется одна из подрешеток ФАР РЛС. Сигналы с подрешетки, выделенной в качестве антенны канала подавления помех, также используются для получения суммарно-разностных диаграмм направленностей антенны моноимпульсной РЛС. Рассмотрены амплитудные распределения, полученные посредством оконных функций Тейлора, Чебышева, Кайзера, Гаусса, а также амплитудное распределение типа «косинус на пьедестале». Проведена оценка характеристик суммарно-разностных диаграмм направленности основной антенны – КИП, УБЛ антенны, крутизны пеленгационной характеристики, определяющих тактико-технические параметры моноимпульсной РЛС.

Показано, что в зависимости от размера подрешетки относительно апертуры ФАР РЛС и амплитудного распределения поля в раскрытие ФАР значения диаграммы направленности подрешетки превышают уровень боковых лепестков диаграммы направленности ФАР в соответствующих

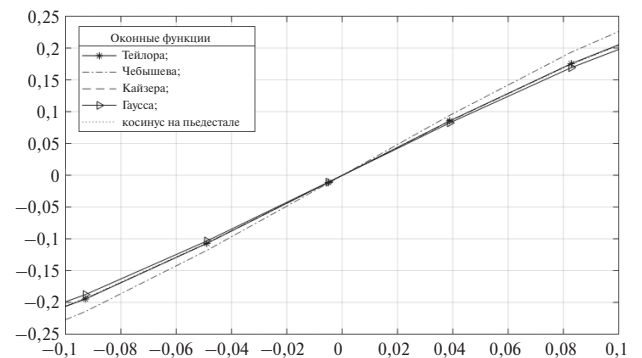


Рисунок 7. Пеленгационная характеристика моноимпульсной радиолокационной системы при различных амплитудных распределениях излучателей

направлениях. Таким образом, сигнал с одной из подрешеток ФАР РЛС можно использовать в качестве антенны канала подавления помех. Чем меньше размер подрешетки ФАР относительно всей апертуры антенны РЛС, тем ниже вероятность подавления сигнала от полезной цели, действующей в направлении главного лепестка диаграммы направленности антенны РЛС $P_{ТВ}$. Показано, что уменьшение размера подрешетки менее 1/6 от апертуры ФАР практически не влияет на вероятность $P_{ТВ}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сколник М. И. Справочник по радиолокации. М.: Техносфера, 2015. Т. 2. 680 с.
2. Паршина Е. С. Способ пространственной селекции помех в РЛС с активными фазированными антенными решетками блочно-модульного типа. Сборник докладов IV научно-технической конференции «Будущее предприятия – в творчестве молодых». Санкт-Петербург, 2020. С. 67–74.
3. Foglia G., Marcantoni D., et al. ECM counteracting SLB: analysis and effectiveness evaluation. 2008 IEEE Radar Conference. Rome, 2008. P. 1–6.
4. Harris F. J. On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform // Proceedings of the IEEE. 1978. Vol. 66. No. 1. P. 51–83.
5. Вексин С. И. Обработка радиолокационных сигналов в доплеровских головках самонаведения. М.: Издательство МАИ, 2005. 244 с.
6. Farina A., Gini F. Calculation of blanking probability for the sidelobe blanking for two interference statistical models // IEEE Signal Processing Letters. 1998. Vol. 5. No. 4. P. 98–100.

7. Farina A., Gini F. Design of SLB systems in the presence of correlated ground clutter // *IEE Proc. Radar, Sonar Navig.* 2000. Vol. 147. No. 4. P. 199–207.
8. Активные фазированные антенные решетки / под ред. Д. И. Воскресенского и А. И. Канащенкова. М.: Радиотехника, 2004. 488 с.
9. Леонов А. И., Фомичев К. И. Моноимпульсная радиолокация. 2-е изд. М.: Радио и связь, 1984. 312 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Паршина Елена Сергеевна, инженер, АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс», Российская Федерация, 197375, Санкт-Петербург, ул. Новосельковская, д. 37, лит. А, тел.: 8 (812) 600-04-27, e-mail: parshina_es@radar-mms.com.

*For citation: Parshina E. S. Technique for spatial interference reduction and its application in monopulse radar with active phased array antenna. Issues of radio electronics, 2020, no. 12, pp. 17–22
DOI 10.21778/2218-5453-2020-12-17-22*

E. S. Parshina

TECHNIQUE FOR SPATIAL INTERFERENCE REDUCTION AND ITS APPLICATION IN MONOPULSE RADAR WITH ACTIVE PHASED ARRAY ANTENNA

The paper describes monopulse radar with sidelobe-blanking system. The antenna of the sidelobe-blanking system is one subarray of the radar's active phased array antenna. The elements of the subarray is also used for sum and difference pattern generation. It is shown that if aperture distribution required to produce low-sidelobe sum pattern is used, the pattern of one subarray will satisfy the requirements for antenna of the sidelobe-blanking system. An example of designing the monopulse radar with sidelobe-blanking system is presented. Sum pattern of the radar antenna is produced with different low-sidelobe pattern synthesis procedures. The analysis of monopulse radar parameters and sidelobe-blanking system performance is done.

Keywords: monopulse radar, sidelobe-blanking system, application of windows

REFERENCES

1. Skolnik M. I., editor. *Radar handbook*. 3rd ed. McGraw-Hill, 2008, 1328 p.
2. Parshina E. S. Method of spatial interference selection in radar with active phased antenna arrays of block-modular type. (Conference proceedings) IV nauchno-technicheskaya konferenciya «Budushee predpriyatia – v tvorchestve molodyh», Saint-Petersburg, 2020, pp. 67–74. (In Russian).
3. Foglia G., Marcantoni D., et al. ECM counteracting SLB: analysis and effectiveness evaluation. 2008 IEEE Radar Conference, Rome, 2008, pp. 1–6.
4. Harris F. J. On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform. *Proceedings of the IEEE*, 1978, vol. 66, no. 1, pp. 51–83.
5. Veksin S. I. *Obrabotka radiolokacionnykh signalov v doplerovskikh golovkah samonavedeniya* [Processing radar signals in Doppler homing heads]. Moscow, MAI Publ., 2005, 244 p. (In Russian).
6. Farina A., Gini F. Calculation of blanking probability for the sidelobe blanking for two interference statistical models. *IEEE Signal Processing Letters*, 1998, vol. 5, no. 4, pp. 98–100.
7. Farina A., Gini F. Design of SLB systems in the presence of correlated ground clutter. *IEE Proc. Radar, Sonar Navig.*, 2000, vol. 147, no. 4, pp. 199–207.
8. Voskresensky D. I., Kanashchenkov A. I., editors. *Aktivnyye fazirovannyye anteny reshетки* [Active phased antenna arrays]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2004, 488 p. (In Russian).
9. Leonov A. I., Fomichev K. I. *Monoimpulsnaya radiolokaciya* [Monopulse radar]. 2nd ed. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1984, 312 p. (In Russian).

AUTHOR

Parshina Elena, engineer, «NPP «Радар ммс» JSC, 37A, Novoselkovskaya St., Saint-Petersburg, 197375, Russian Federation, tel.: +7 (812) 600-04-27, e-mail: parshina_es@radar-mms.com.