

УДК.004.383:621.391

## ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ПРИЕМНОГО ТРАКТА В МНОГОКАНАЛЬНОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ С ВРЕМЕННОЙ АВТОМАТИЧЕСКОЙ РЕГУЛИРОВКОЙ УСИЛЕНИЯ

*Шарамет А.В., к.т.н., доцент, начальник тематического отдела, ОАО «КБ Радар» – управляющая компания холдинга «Системы радиолокации» (г. Минск, Республика Беларусь), e-mail: shandrei@yandex.ru*  
*Азаров И.С., д.т.н., доцент, заведующий кафедрой ЭВС, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (г. Минск, Республика Беларусь), e-mail: azarov@bsuir.by*

## FEATURES OF OPERATION OF THE RECEIVING PATH IN A MULTICHANNEL RADAR STATION WITH TEMPORARY AUTOMATIC GAIN CONTROL

*Sheremet A.V., Azarov I.S.*

*The power of the radar signal reflected from "distributed" local objects has a significant impact on the detection characteristics of an aerial target. In the conditions of the use of technologies to reduce their radar visibility or the use of small-sized unmanned aerial vehicles, the total differential effective scattering area becomes commensurate, and in some cases predominant over the level of the signal reflected from the target. This is due to the fact that reflections significantly overload the receiving path of the radar station. A feature of modern radar stations is their multi-channel nature. One of the main ways to reduce the power level of reflected signals is the use of individual circuits with gain control of the receiving path in each channel according to a known law. At the same time, there are no recommendations on the procedure for preliminary evaluation of the parameters of the gain control law of the receiving path, taking into account the geometry of the location of the beams, the tactical and technical characteristics of the radar station and the specifics of its application. In the course of the work, such an approach is proposed and its correctness is shown.*

**Key words:** multichannel radar station, automatic gain control, feature of modern radar, detection characteristics of an aerial target.

**Ключевые слова:** многоканальность, автоматическая регулировка усиления, пространственно-временная обработка, дифференциальная эффективная площадь рассеяния, радиолокационная станция.

### Введение

Одним из направлений развития современных радиолокационных станций (РЛС) является обнаружение и сопровождение воздушных объектов на малых и предельно малых высотах. Особенностью их обнаружения [1] является сложная помеховая обстановка:

- в анализируемом воздушном пространстве одновременно находятся различные типы объектов (самолеты, вертолеты, дельтапланы, парпланы, беспилотные летательные аппараты (БПЛА) и т.д.);
- в одном элементе разрешения может оказаться отраженный сигнал от нескольких воздушных объектов, как частный случай рой БПЛА;
- постоянно присутствуют различного рода помехи (индустриальные излучения, отражения от метеорологических образований, от подстилающей поверхности и местных предметов и т.п.), которые образуют естественный фон;
- наличие организованных радиопомех (активных и пассивных).

Для решения задач обнаружения, оценки параметров и распознавания воздушных объектов с учетом этих

*Мощность отраженного от «распределенных» местных предметов радиолокационного сигнала оказывает существенное влияние на характеристики обнаружения воздушной цели. В условиях применения технологий снижения их радиолокационной заметности или использования малогабаритных беспилотных летательных аппаратов полная дифференциальная эффективная площадь рассеяния становится соизмеримой, а в ряде случаев и преобладающей над уровнем отраженного от цели сигнала. Это вызвано тем, что отражения существенно перегружают приемный тракт радиолокационной станции. Особенностью современных радиолокационных станций является их многоканальность. Одним из основных способов снижения уровня мощности отраженных сигналов является применение индивидуальных схем с регулировкой усиления приемного тракта в каждом канале по известному закону. При этом рекомендации по порядку предварительной оценки параметров закона управления коэффициентом усиления приемного тракта с учетом геометрии расположения лучей, тактико-технических характеристик радиолокационной станции и особенностей ее применения отсутствуют. В ходе работы предложен такой подход и показана его корректность.*

особенностей в радиолокационных станциях традиционно используются системы селекции движущихся целей (СДЦ). В рамках развития данного направления следует особо отметить работы П.А. Бакулева [2, 3, 4] и М. Скольника [5]. Помеховая обстановка оказывает наиболее существенное влияние на процесс обнаружения всех типов летательных аппаратов на ближней дистанции и на всей дистанции БПЛА. Необходимость

устойчивого обнаружения последних на всей дистанции существенно усложняется в виду их массовости, разнообразия и относительно небольшой стоимости, в виду чего последнее время они получили очень широкое распространение в различных сферах деятельности общества. Их основными особенностями являются:

- малое значение эффективной площади рассеивания, которая лежит в диапазоне от  $0,1 \text{ м}^2$  до  $0,01 \text{ м}^2$ , а в отдельных случаях достигает  $0,001 \text{ м}^2$ ;
- высокая маневренность в сочетании с малыми скоростями полета (до  $30 \text{ м/с}$ ), вплоть до зависания в воздухе;
- движение БПЛА идентично полету птиц;
- способность выполнять полеты на малых (пределно малых) высотах (от 0 до  $200 \text{ м}$ ).

Для работы РЛС в сложной помеховой обстановке при обнаружении БПЛА необходимо сформировать автоматически изменяющееся (ручная регулировка усиления (в иностранной литературе – MGC (от англ. Main Gain Control)) далее не рассматривается) управляющее напряжение для дополнительной регулировки коэффициента усиления приемного тракта с учетом дальности обнаружения РЛС. Это обеспечивает поддержание отношения сигнал/шум на постоянном уровне, а также предотвращает ограничение сигнала при его обработке в приемном тракте. Проведенный анализ [2, 4, 7-9] показывает, что в основе различных подходов лежат схемы с временной (ВАРУ, в иностранной литературе – SCT (от англ. Sensitivity Time Control)) или шумовой (ШАРУ, в иностранной литературе – AGC (от англ. Automatic Gain Control)) автоматической регулировкой усиления [11].

По материалам открытых публикаций [2, 4, 10, 12] в основе серийно выпускаемых РЛС в основном используется ВАРУ с известным законом управления [10]. Широкое внедрение многолучевых РЛС привело к тому, что результирующая зона обзора формируется по результатам обработки нескольких лучей, каждый из которых имеет отдельный приемный канал и свои геометрические особенности. При преобладании в канале отражений от «распределенных» местных предметов таких, как дождь, морская поверхность и т.п. применение ВАРУ в каждом канале обеспечивает их дополнительное подавление, что улучшает условия обработки сигналов [6, с.157]. При этом порядок предварительной оценки основных параметров импульсов ВАРУ, которые должны учитывать технические особенности каждого канала РЛС отсутствует.

### Основная часть

В процессе радиолокационного обнаружения воздушных целей излучаемые антенной радиолокационной станции сигналы отражаются от воздушных объектов, а также от поверхности земли. Отраженные сигналы от земной поверхности оказывают большое влияние на их обнаружение. Рассмотрим решение данной задачи с учетом следующих ограничений:

высота полета воздушной цели ( $h_c$ ) и высота фазового центра антенны ( $h_r$ ) суще-

ственно меньше радиуса земли ( $R_e = 6371 \text{ км}$ );

- радиогоризонт РЛС рассчитывается с учетом нормальной рефракции в атмосфере. Для повышения точности определения высоты данный параметр уточняется эмпирически для каждой РЛС с учетом ее конструктивных особенностей [10, стр.245];
- законы распределения отраженных от земной поверхности сигналов и внутренних шумов имеют нормальный закон распределения;
- в качестве зоны сбора мешающих отражений поверхности рассматривается ее проекция на направление облучателя [12]. Таким образом, рассматривается дифференциальная площадь проекции поверхности;
- полная дифференциальная эффективная площадь рассеяния (ЭПР) [5] по боковым лепесткам одной ДН многоканальной радиотехнической системы определяется по первому. Это целесообразно при решении большинства практических задач, так как он в большинстве случаев является определяющим по отношению к другим боковым лепесткам и его параметры (такие как направление и уровень первого бокового лепестка) всегда точно известны.

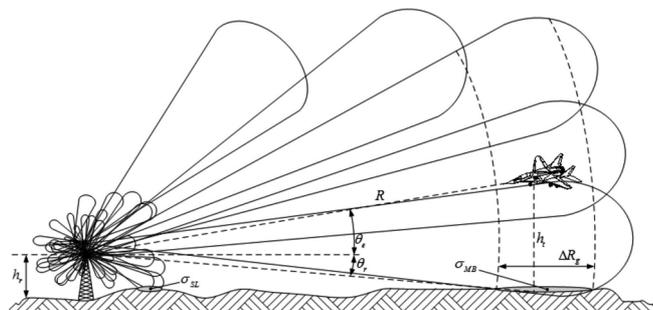


Рис. 1. Геометрия отражений от поверхности земли

Применение в качестве оценки величины дифференциальной ЭПР подчеркивает, что отраженный от земной поверхности сигнал формируется большим количеством элементарных рассеивающих элементов, хаотически расположенных на ограниченной площади. При этом фазы отдельных отраженных сигналов независимы. Это позволяет произвести их суммирование. Тогда полная дифференциальная ЭПР составит:

$$\sigma_c = \sigma_{MB} + \sigma_{SL}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{MB}$  – дифференциальная ЭПР по главному лучу ДН (здесь и далее индекс MB означает main beam, от англ. – основной луч);  $\sigma_{SL}$  – дифференциальная ЭПР по боковым лепесткам ДН (здесь и далее индекс SL означает side lobe, от англ. – боковой лепесток).

В качестве примера рассмотрим расчет величины  $\sigma_c$ , от сухого участка земной поверхности (коэффициентом обратного отражения, составляет минус 17.72 дБ) и РЛС имеющей следующие технические характеристики:

- S-диапазон;
- уровень первого бокового лепестка – минус 25 дБ;
- высота электрического центра антенны – 4 м;
- высота центра луча на краю – 150 м;
- ширина ДН по азимуту на прием/передачу – 1.5 град.;

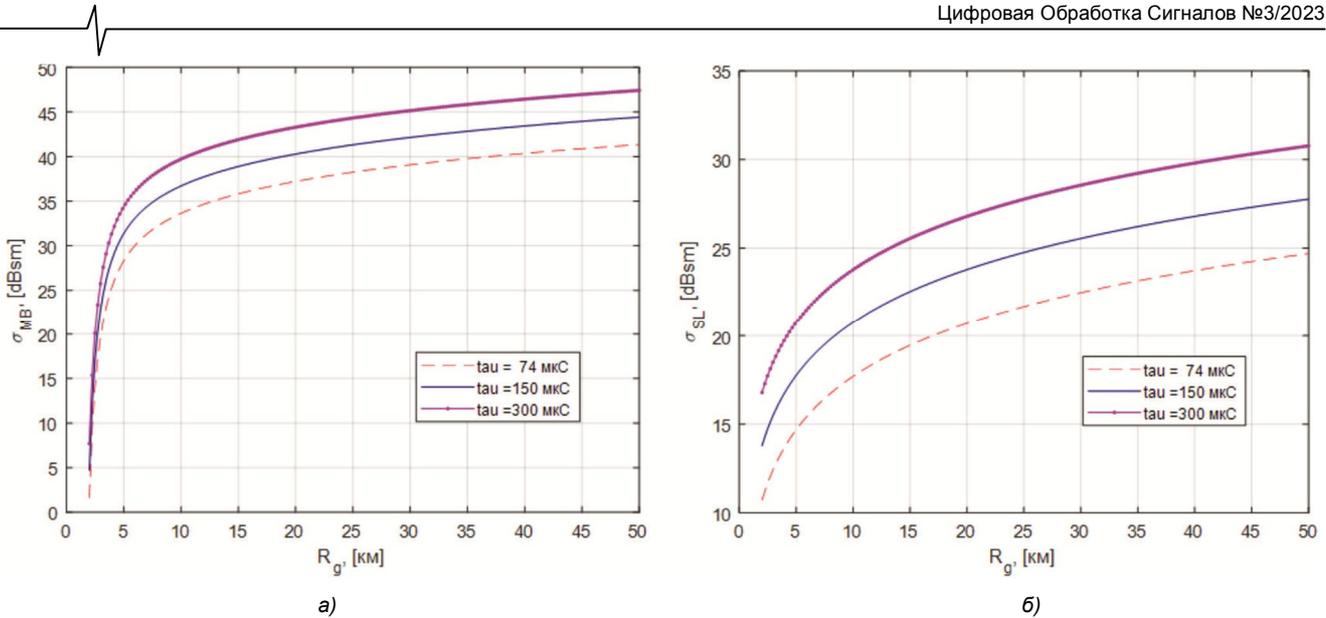


Рис. 2. Величина отражений от поверхности Земли, вносимая диаграммой направленности: а – по основному лепестку; б – по первому боковому лепестку

- ширина ДН по углу места на прием – 1.7 град.;
  - ширина ДН по углу места на передачу – 8.0 град.
- Из рис. 1 видно, что проекция наклонной дальности ( $R_g$ ) на поверхность земли составляет:

$$R_g = R \cos \theta_r, \tag{2}$$

где  $R$  – наклонная дальность.

Основные параметры, определяющие взаимное положение РЛС и воздушной цели могут быть получены с учетом выражений:

$$\theta_r = \arcsin(h_r / R) \text{ и } \theta_e = \arcsin((h_t - h_r) / R),$$

$$\Delta R_g = \Delta R \cos \theta_r, \tag{3}$$

где  $\Delta R$  – разрешающая способность РЛС по дальности.

Из выражений (2) и (3) следует, что площади сбора мешающих отражений от элементов земной поверхности по главному лучу ( $A_{MB}$ ) и первому боковому лепестку ( $A_{SL}$ ) ДН могут быть найдены в соответствии с выражениями:

$$A_{MB} = \Delta R_g \theta_a R_g, \quad A_{SL} = \Delta R_g \pi R_g, \tag{4}$$

где  $\theta_a$  - ширина диаграммы направленности по азимуту.

Так как, дифференциальная ЭПР зависит от угла наблюдения и расположения отражающих участков местности, то с учетом выражений (4) по основному лепестку диаграммы направленности составит:

$$\sigma_{MB} = \sigma_0 A_{MB} G^2 (\theta_r + \theta_e) = \sigma_0 \Delta R_g R_g \theta_a G^2 (\theta_r + \theta_e), \tag{5}$$

а для первого бокового лепестка ДН с учетом величины его уровня ( $SL$ ):

$$\sigma_{SL} = \sigma_0 A_{SL} (SL)^2 = \sigma_0 \Delta R_g \pi R_g (SL)^2, \tag{6}$$

где  $G$  – коэффициент усиления антенны;  $\sigma_0$  – коэффициент обратного отражения от земной поверхности.

Результаты моделирования в соответствии с выражениями (5) и (6) представлены на рис. 2. Анализ рис. 2 показывает, что основной лепесток вносит существенно больший вклад в величину дифференциальной ЭПР по

сравнению с первым боковым лепестком. Данная величина зависит от дальности и изменяется в диапазоне от 8 до 17 дБ/см.

Для того чтобы учесть изменение полной дифференциальной ЭПР в зависимости от дальности, выражение (1) в соответствии с [12] может быть преобразовано к виду:

$$\sigma_c(R) = \frac{\sigma_{MB} + \sigma_{SL}}{(1 + (R / R_h)^4)}, \tag{7}$$

где  $R_h$  – дальность радиогоризонта.

Дальность радиогоризонта в соответствии с [5], а также принятыми ограничениями определяется высотой полета воздушной цели ( $h_t$ ) и фазового центра антенны ( $h_r$ ):

$$R_h = \sqrt{2\kappa h_r h_t}, \tag{8}$$

где  $\kappa = 4/3$  – постоянная величина.

Таким образом, зависимость полной дифференциальной ЭПР в соответствии с выражением (1) в графическом виде имеет вид, представленный на рис. 3.

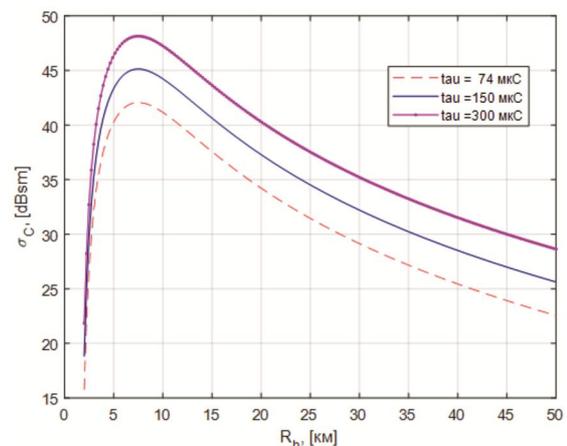


Рис. 3. Полная дифференциальная ЭПР

Анализ рис. 3 показывает, что в S-диапазоне максимум отражений от земной поверхности приходится на диапазон 5-10 км и составляет порядка 48 дБ. С увеличением дальности их величина уменьшается. Стоит

отметить, что данная величина слабо зависит от дли-

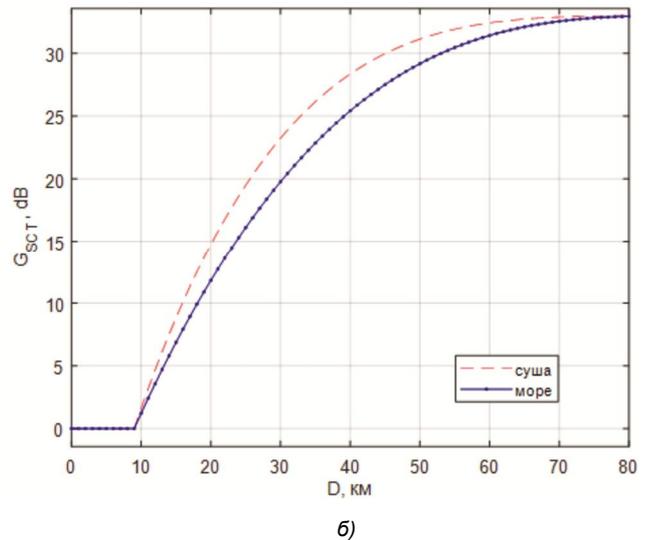
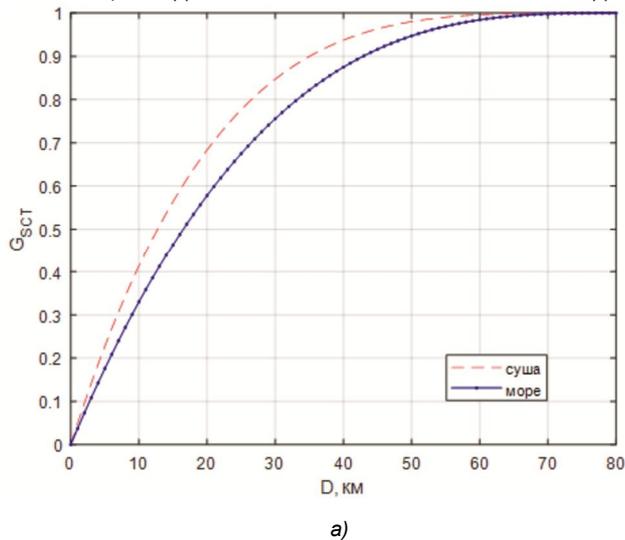


Рис. 4. Формирование управляющего напряжения:

а – закон изменения коэффициента усиления приемного тракта; б – импульс ВАРУ

тельности импульса. Так при ее увеличении в два раза величина полной дифференциальной ЭПР увеличивается не значительно, на 3-4 дБ. Кроме того максимум полной дифференциальной ЭПР в 48 дБ достигает на дальности 9 км

При обнаружении воздушных целей на фоне поверхности земли или в непосредственной близости к морской поверхности законы изменения коэффициента усиления приемного тракта имеют некоторые особенности, при этом в общем виде они определяются в соответствии с выражением:

$$G_{SCT}(D) = 1 - [c_g(D_{max} - D)]^n, \quad (9)$$

где  $c_g = (1 - g_{att}) / (D_{max})^4$  – затухание на удалении  $D_{max}$ ;  $g_{att}$  – затухание в начале дистанции;  $n$  – определяется типом поверхности (для суши  $n = 4$ , для моря  $n = 3$ ).

Закон управления коэффициентом усиления приемного тракта РЛС по результатам анализа рис. 3 и учетом выражения (9) представлены на рис. 4. Величина остатков мешающих отражений на выходе приемного устройства РЛС представлена на рис. 5.

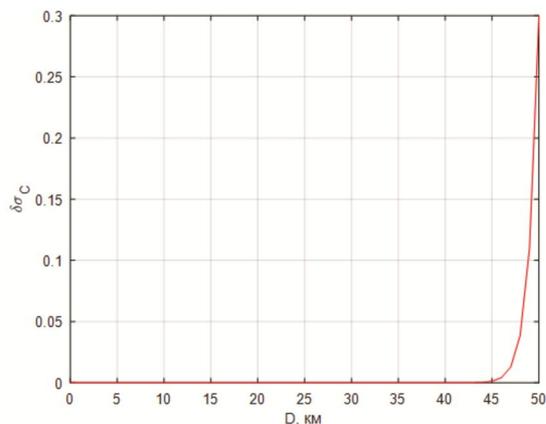


Рис. 5. Остатки мешающих отражений на выходе усилителя

Анализ рис. 5 показывает, что в результате оценки уровня воздействия мешающих отражений на приемный

тракт РЛС (рис. 3) при наличии в приемном тракте системы ВАРУ (рис. 4) на его выходе все же имеется незначительный, не полностью скомпенсированный остаток отражений от поверхности земли, величина которого зависит от дальности.

### Заключение

Таким образом, в ходе работы предложен подход к определению параметров закона управления коэффициентом усиления канала приемного тракта многоканальной РЛС на основе оценки мощности отражений, которые поступают на вход приемного тракта РЛС с учетом ее реальных технических характеристик. В его основе лежит оценка полной дифференциальной эффективной площади рассеяния. По результатам проведенного анализа в S-диапазоне можно сделать ряд выводов:

- дифференциальная ЭПР по главному лучу и первому боковому лепестку ДН отличаются на величину от 8 до 17 дБ/см, которая слабо зависит от дальности и в большей степени определяется размерами зоны сбора мешающих отражений. Данная величина является существенной при обнаружении любых воздушных целей, включая БПЛА;

- в ходе проектирования РЛС стоит особо уделить внимание снижению уровня боковых лепестков ДН, т.к. параметры основного луча ДН не всегда могут быть изменены. Это связано с тем, что они в большей степени определяют зону обзора РЛС и ее тактико-технические характеристики;

- уровень отражений в ближней зоне по результатам расчетов составляет порядка 48 дБ, что несомненно существенно ограничивает динамический диапазон радиоприемных устройств любой РЛС;

- значение полной дифференциальной ЭПР может рассматриваться в качестве основы при формировании параметров управляющего напряжения схем с ВАРУ;

- по результатам моделирования получено, что величина не полностью скомпенсированных остатков мешающих отражений в конце дистанции не превышает минус 14 дБ, что говорит о корректности предложенного подхода.

## Литература

1. Вовшин Б.М. Принципы построения обзорного радиолокатора обнаружения беспилотного летательного аппарата Вестник ВКО, 2019, № 3. С. 38-46.

2. Бакулев П.А., Степин В.М. Методы и устройства селекции движущихся целей. М.: Радио и связь, 1986. 288 с.

3. Бакулев П.А. Радиолокационные системы. Изд. 2-е, перераб. и доп. Сер. Учебник для ВУЗов. М.: Радиотехника, 2007. 375 с.

4. Разработка первых систем защиты РЛС от пассивных помех (исторический обзор) / П.А. Бакулев [и др.]. Радиотехника. 2016. № 5. С. 142-151.

5. Сколник М. Справочник по радиолокации. Книга 1 / Под ред. М. Сколника. 3-е издание. Перевод с англ. под общей редакцией В.С. Вербы. В 2-х книгах. М.: Сов. радио, 2014. 528 с.

6. Сколник М. Справочник по радиолокации. Том 3 / Под ред. М. Сколника. Перевод с англ. под общей редакцией К.Н. Трофимова. В 4-х томах. М.: Техносфера, 1979. 672 с.

7. Фитасов Е.С. Пространственно-временная обработка сигналов в малогабаритных мобильных радиолокационных системах обнаружения низколетящих воз-

душных объектов: дис. доктора тех. наук. Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2018. 378 с.

8. Степанов М.А. Влияние флуктуаций скорости ветра в турбулентной атмосфере на характеристики обнаружения РЛС с СДЦ: дис. канд. физ.-мат.наук. Красноярск, 2009. 187 с.

9. Межобзорная компенсация дискретных мешающих отражений с формированием карты помех и накоплением решений / А.С. Солонар, С.А. Горшков, П.А. Хмарский, В.А. Вашкевич. Доклады БГУИР. 2015. № 4 (90). С. 74-79.

10. Ляшенко В.А. Радиолокационная станция 19Ж6 (СТ-68У). В.А. Ляшенко, Л.Ю. Боскутис, Г.И. Тылец. Учебное пособие МО СССР. М.: Военное издательство. 1992.

11. Sumanta, Pal. A Novel Scheme of Digital Instantaneous Automatic Gain Control (DIAGC) for Pulse Radars. Pal. Sumanta, Shanmugam. Nirmala, Kumar. Mohit, P. Radhakrishna. Presented at International Symposium of India 2011.

12. Mahafza B.R., Radar Signal Analysis and Processing Using MATLAB, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2009.

### Уважаемые авторы!

Редакция научно-технического журнала «Цифровая обработка сигналов» просит Вас соблюдать следующие требования к материалам, направляемым на публикацию:

#### 1) Требования к текстовым материалам и сопроводительным документам:

- Текст – текстовый редактор Microsoft Word, формулы – в редакции MathType.
- Таблицы и рисунки должны быть пронумерованы. На все рисунки, таблицы и библиографические данные указываются ссылки в тексте статьи.
- Объем статьи до 12 стр. (шрифт 12). Для заказных обзорных работ объем может быть увеличен до 20 стр. Название статьи на русском и английском языках.
- Рукопись статьи сопровождается: краткой аннотацией на русском и английском языках; номером УДК; сведениями об авторах (Ф.И.О., организация, должность, ученая степень, телефоны, электронная почта); ключевыми словами на русском и английском языках; актом экспертизы (при наличии в вашей организации экспертной комиссии).

#### 2) Требования к иллюстрациям:

- Векторные (схемы, графики) – в графическом редакторе Corel DRAW.
- Растровые (фотографии, рисунки) – М 1:1, разрешение не менее 300dpi, формат tiff.

## НОВЫЕ КНИГИ



Воскресенский Д.И., Добычина Е.М.

Цифровые антенные решетки: Монография. М.: Изд-во Радиотехника, 2020 г. 240 с.: ил.

Рассмотрен новый класс антенных систем – цифровых антенных решеток бортовых радиолокационных комплексов, позволяющих повысить энергетический потенциал за счет использования новых методов оптимизации режима работы высокоэффективных активных устройств и обеспечения высокой точности формирования амплитудно-фазового распределения с помощью предложенной системы автоматической калибровки. Представлены результаты экспериментальных исследований возможностей цифрового диаграммообразования и точностных характеристик калибровки макета цифровой решетки.

Для научных работников и инженеров, занимающихся исследованиями в области разработки, создания и применения цифровых решеток в современных радиоэлектронных системах. Может быть рекомендована в качестве учебного пособия студентам радиотехнических специальностей, а также аспирантам и магистрантам по направлениям «Радиотехника», «Радиофизика и электроника».