

## РАДИОЛОКАЦИЯ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ: ОБРАЩАЕМЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Ю. Н. Горбунов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 141120, Московская область, Фрязино, пл. академика Введенского, 1

<sup>2</sup> Российский технологический университет (МИРЭА), 119454, Москва, проспект Вернадского, 78

Статья поступила в редакцию 20 апреля 2018 г.

**Аннотация.** Для адаптивных РЛС высокого разрешения предложен обращаемый СКА, заключающийся в выборе метода СКА в зависимости от вида сигнала, решаемых задач и наличия аппаратных и ресурсных ограничений. На разных этапах и в различных ситуациях требуется хаотизация параметров радиолокационных сигналов, условий их обработки и формирования, которая устраняет отрицательные эффекты ЦО (стробоскопические, интерференционные, боковые лепестки, шумы квантования и др.). Обосновывается необходимость введения в зондирующие сигналы информационной избыточности, что достигается расширением спектров обычных и пространственных частот. Предложены методы СКА, обеспечивающие важное преимущество – проведение СКА с реализацией возможности построения ассоциативной (параллельной, многоканальной) обработки, адресное варьирование целевых задач, использование СКА при использовании грубых «бинарно – знаковых» статистик входных сигналов. Применительно к синтезу адаптивных РЛС проанализированы условия реализации радиолокации высокого разрешения, в которой применён адресно-целевой подход в выборе порядка параметрической аппроксимирующей модели и проведения необходимых периодограммных и коррелограммных усреднений. Предложен обращаемый спектральный анализ с адаптацией алгоритмов формирования и обработки сигналов, реализующий выполнение противоречивых требований радиолокации высокого разрешения. При технических аппаратных (оконно-апертурных и ресурсных) ограничениях предложено применять рандомизацию условий формирования и обработки

сигналов путём использования грубых (малоразрядных) текущих отсчетов входных сигналов, коротких пространственно-временных выборок, малого числа передающих элементов в спектрально-угловом анализе.

По аналогии с адаптивными фазированными антенными решетками (ФАР) применено последовательное диаграммо - образование на базе усечённых (малоэлементных) апертур и грубых («булевых», «бинарно-знаковых») статистик сигнала. Предложен нетрадиционный подход адаптивного формирования результирующей многолучевой (многоэлементной) диаграммы направленности фазированной антенной решетки последовательным методом использования грубых (малоразрядных) текущих отсчетов входных сигналов.

**Ключевые слова:** спектрально-корреляционный анализ, пространственно – временной, спектрально - корреляционный анализ, спектральная плотность мощности, фазированная антенная решетка, рандомизация, сверхразрешение.

**Abstract.** For adaptive high resolution radars, a reversible SKA is proposed, which consists in choosing the SKA method depending on the type of signal, the tasks being solved and the presence of hardware and resource constraints. At different stages and in different situations, the randomization of the parameters of radar signals, the conditions of their processing and formation, which eliminates the negative effects of the CO (stroboscopic, interference, side lobes, quantization noise, etc.), are required. The necessity of introducing information redundancy into probing signals, which is achieved by expanding the spectra of ordinary and spatial frequencies, is substantiated. The SKA methods are proposed that provide an important advantage - the implementation of the SKA with the realization of the possibility of constructing associative (parallel, multi-channel) processing, target variation of the target tasks, the use of the SKA when using the rough "binary - sign" statistics of input signals. With regard to the synthesis of adaptive radar, the conditions for the implementation of high-resolution radar were analyzed, in which an address-target approach was used in choosing the order of the parametric approximating model and the necessary periodogram and correlogram averaging. The reversible spectral analysis with the adaptation of the algorithms for the formation and processing of signals that

implements the implementation of conflicting requirements of high-resolution radar is proposed. With technical instrumental (window-aperture and resource) constraints, it is proposed to apply randomization of the conditions of signal formation and processing by using coarse (low-bit) current samples of input signals, short space-time samples, a small number of transmitting elements in the spectral-angle analysis. By analogy with adaptive phased antenna arrays (PAR), a sequential diagram was used - education based on truncated (low-element) apertures and coarse (“boolean”, “binary sign”) signal statistics. A nontraditional approach of adaptive formation of the resultant multipath (multi-element) radiation pattern of a phased antenna array by the sequential method of using coarse (low-bit) current samples of input signals is proposed.

**Keywords:** spectral-correlation analysis, spatio-temporal, spectral-correlation analysis, power spectral density, phased array, randomization, superresolution.

## **Введение**

При построении адаптивных РЛС часто применяется спектральный и корреляционный анализ (СКА). Варьируется вид излучения: импульсный (ИИ), длинно - импульсный (ДИ), квазинепрерывный (КНИ), непрерывный (НИ) и применяется адресно-целевой подход в выборе способов и алгоритмов цифровой обработки (ЦО). В системах радиотехнической разведки (РТР) и радиоэлектронного подавления (РЭП), когда принятые сигналы запоминаются и переизлучаются для создания помех и ближней радиолокации, для работы в сложном поле необходим СКА. При этом должны быть учтены аппаратные ограничения и ограничения ресурсов цифровой обработки (ЦО). Простое упрощение СКА приводит к появлению шумов квантования, стробоскопических и интерференционных эффектов («слепые скорости», «слепые направления»), боковых лепестков.

В работах [1-5] и других российских и зарубежных авторов исследованы вопросы СКА в фазированных антенных решетках (ФАР), однако специальные

разделы, относящиеся к повышению инструментальной точности СКА, в них не исследованы.

Малоразрядной ЦО посвящены работы [6,7]. Установлено, что разрядность и размеры апертур напрямую определяет сложность аппаратуры в большеапертурных ФАР (размеры пространственно-временных (ПВ) окон, разрядность умножителей, фазовращателей (ФВ), процессоров (DSP), интерфейсов). Применительно к СКА в адаптивных системах СДЦ и ФАР в работах [6,7] эти вопросы также не решены.

В докладе вводится понятие обращаемого СКА, делается обзор работ и формируется новый взгляд автора по рассматриваемой теме.

### **Введение понятия обращаемого СКА**

Общий подход к синтезу обнаружителей сигналов, содержащих случайные неинформативные параметры, когда искусственно вводимые неинформативные параметры случайны, а их законы распределения вероятностей известны, сформулирован в [6 - 9]. На Рис. 1 приведена обобщённая схема обращаемого СКА, где  $T$ ,  $F$  – интервал дискретизации по времени, частоте;  $M_1$  – оператор математического ожидания. Диаграмма Рис.1 треугольной формы даёт два пути определения спектральной плотности (СПМ), так и два пути определения автокорреляционной функции (АКФ).

Короткие пути определения СПМ и АКФ называются прямыми, т.к. процесс  $x[n]$  непосредственно используется для расчёта СПМ и АКФ. Методы определения СПМ и АКФ по длинному пути, соответственно через АКФ и СПМ, называются косвенными, т.к. последовательность  $x[n]$ , формируемая дискретизацией случайного процесса  $x(t)$  непосредственно не используется в получении СПМ и АКФ. Ранее понятие прямого и косвенного спектрального анализа применялось лишь для оценки СПМ [3 - 5].

В вершине треугольника имеем сигнал  $x[n]$ ,  $-\infty < n < \infty$ , по пути 1 (против часовой стрелки) вычисляется АКФ при  $N \rightarrow \infty$

$$r_{xx} [m] = M_1 \{x [n + m]x^* [n]\} = \lim \left\{ \frac{1}{2N+1} \sum_{n=-N}^N x [n + m]x^* [n] \right\}, \quad (1)$$

а по пути 2 (по часовой стрелке) вычисляется СПМ

$$S_{xx} (f) = \lim M_1 \left\{ \frac{1}{2N+1} \left| \sum_{n=-N}^N x [n] \exp(-j2\pi fnT) \right|^2 \right\}, S_{xx}[k] = S_{xx}(f), f = kF. \quad (2)$$

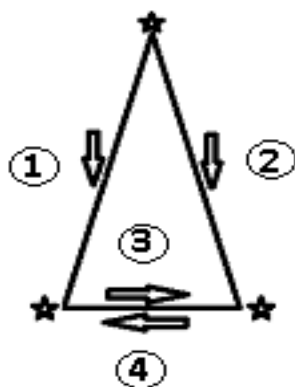
Основание треугольника двунаправленное (обращаемое\*), которое предполагает для получения конечного результата (по теореме Винера – Хинчина), выполнение алгоритмов: прямого преобразования Фурье над  $r_{xx} [m]$  для получения оценки СПМ

$$S_{xx}(f) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} r_{xx} [m] \exp(-j2\pi fmT) \quad (3)$$

и обратного преобразования Фурье над  $S_{xx}[k]$  – для получения оценки АКФ

$$r_{xx} [\tau] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} S_{xx} [k] \exp(j2\pi k\tau). \quad (4)$$

Прим.\* Термин «обращаемый» СКА заимствован из микроэлектроники: аналог – понятие «обращаемый усилитель», которое предполагает реверсирование передачи усиливаемого сигнала обычным путём «вход-выход» и обратно «выход-вход». В РЛС с ФАР с помощью ключевых схем ААР может переводиться из режима «приём» в режим «передача» и наоборот.



Автокорреляция,  $r_{xx} [m]$

Спектральная плотность  
мощности,  $S_{xx}(f)$

Рис. 1. Обобщённая схема обращаемого спектрально – корреляционного анализа

Путь «1 – 3» с конечной целью получения оценки СПМ (3) позволяет введением избыточности (усложнением временной структуры сигнала) реализовать эффекты сверхразрешения (доплеровского или углового). Существует большое количество методов оценки обычных (временных) и пространственных спектров источников сигналов, начиная от стандартных традиционных (Бартлетта, ДПФ), имеющих релейские пределы разрешения, так и методов, с так называемым «сверхразрешением» («гармонического разложения Писаренко», «Блэкмана и Тьюки», «линейного предсказания», «авторегрессии», Прони, «musik», «esprint» и др.).

Путь «2 – 4» с конечной целью получения оценки АКФ (4) путём введения избыточности в спектральную структуру сигнала позволяет получить эффекты дальностного или углового сверхразрешения. Обращаемый СКА объединяет вышеуказанные пути: адресно – целевая направленность – ключевой момент программируемой ЦО в адаптивной РЛС. Номенклатура параметров, по которым решается задача сверхразрешения и порядок аппроксимирующей модели выбирается Наблюдателем в зависимости от ресурса времени, который используется для построения ассоциативной (параллельной, многоканальной) обработки, адресного варьирования целевых задач, использования (при тех же входных данных) типовых алгоритмов СКА и для различных диапазонов обычных и пространственных частот. Схемой Рис.1 оформляется новый методический подход по уточнению понятий и классификации традиционных методов косвенного спектрального анализа расширяющий на основе зеркальной симметрии компонент «пары Фурье-преобразований» номенклатуру методов косвенного корреляционного (КА), ранее известных как «кепстральный анализ» [Poirier J.L.] и «двойной спектральный анализ» [10], что оформлено на схеме как путь «2 - 4».

Волна, падающая на апертуру ФАР под углом (пеленгом)  $\theta$  от оси антенны формирует поле, описываемое пространственными частотами  $\Omega_\alpha$ ,  $\Omega_\beta$ , зависящими от азимута  $\alpha$  и угла места  $\beta$  прихода волны от источника. Обобщённая схема формирования ПВ - выборка с возможностью

формирования оценок СПМ показана на Рис. 2 а, а пространственных частот - на Рис. 2 б.

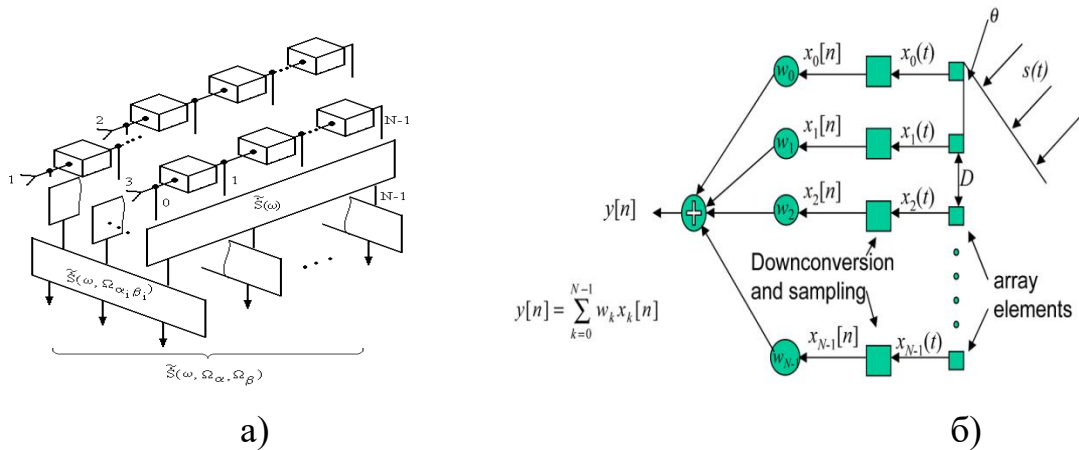


Рис.2. Схема обобщённого спектрально-углового анализа, где  $w_k$  - весовые коэффициенты.

### Рандомизация обработки сигналов

При радиолокационных задач зачастую изменением спектра и его параметров за время наблюдения можно пренебречь, поэтому инструментальную погрешность ЦО можно уменьшить за счет рандомизированной обработки (РО) [6 - 9, 14].

Предполагается, что исходная (текущая) статистика «спектрального портрета» изначально является бинарно-знаковой, а далее сглаживается (линеаризуется по Монте - Карло).

Рандомизация (*randome* - случайный) предполагает искусственное введение случайностей в параметры обработки: период повторения, несущую частоту, начальные фазы шкал, шаг, пороги квантования, аддитивные (учитываемые) добавки, весовые коэффициенты ЦФ и др. [6 - 9, 11,12 - 15].

В адаптивном обрацаемом СКА важен выбор критерия, подразумевающий оценивание некоторой функции временного сдвига (задержки) и смещения доплеровской или пространственной частоты для того, чтобы оптимизировать оценку задержки и доплеровского или углового сдвига в конкретных точках дальности, скорости, пеленга и др.. На Рис. 3 [4] показано сравнение сглаженной (по спектру) спектральной оценки  $\hat{b}$  с оценкой  $a$  для одной и той

же 1024 – точечной реализации смеси синусоиды (относительная частота 0,2) и белого шума при отношении сигнал/шум « - 17 дБ».

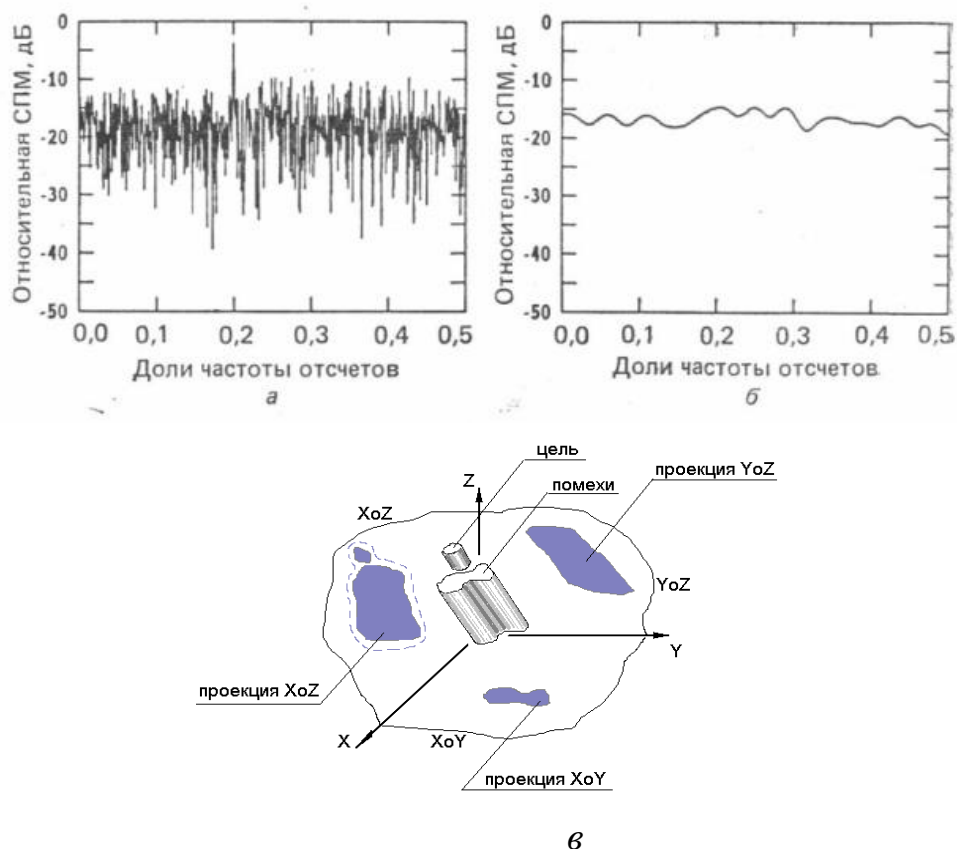


Рис.3. *а* – несглаженная, *б* - сглаженная периодограмма, *в* – спектральные различия сигнала.

На Рис. 3 *б* последовательность разбита на 32 сегмента по 32 отсчёта с усреднением периодограмм этих сегментов.

На этой оценке очевидна равномерная характеристика белого шума, но не синусоида, а важно получить более высокое разрешение сигнала в точке.

После того, как случайный механизм РО создан, задача заключается в получении заданного закона распределения и оценки математического ожидания СВ. В математическом отношении это эквивалентно вычислению интеграла Лебега или Стильтьеса по вероятностной мере. (см. Рис.3 *в*).

Способность разделить сигналы и помехи (задача СДЦ) или разрешить несколько сигналов (задача разрешения) в дает возможность процессору ЦО выделить цель, в то же время - подавить помеху. Конечная цель радара и



процессора обработки, используя различия в корреляционных свойствах сигналов и помех, обеспечить максимальное значение  $P_{обн}$ .

Рис. 3 в демонстрирует влияние различий компонент обрабатываемого сигнала на процесс обнаружения цели в рамках исследуемого СКА. На этом рисунке представлена объемная мощность смеси «сигнал плюс шум» в координатах  $x, y, z$  обобщенного спектрального преобразования - спектральных плотностей мощности в координатах обычных и пространственных частот.

Обратим внимание на возможность выделения цели на фоне помех в объемном пространстве. Проецируя данные на любую плоскость, мы можем увидеть эффекты «забивания» помехой, однако на других плоскостях возможно их разделение (см. плоскость  $XoZ$ ). Конструируется пространственный, обеспечивающий максимум усиления для цели и нулевое усиление для помехи.

Грубые текущие отсчёты ПВ сигнала – его «целые» части являются константами, а их младшие разряды «флюктуирует». Сглаживание флюктуаций позволяет проводить СКА при бинарно – знаковом квантовании входных сигналов, стохастической шкале дискретизации по времени [13 ], эквивалентной наложению оконных функций, без использования умножителей при временном и корреляционном взвешивании прямоугольными окнами. Применительно к решаемой задаче в [14] оценена эффективность повышения разрешения СКА за счёт прироста коэффициента направленного действия (коэффициента улучшения) и динамического диапазона СКА.

### **Необходимость расширения спектров сигналов**

Для реализации сверхразрешения требуется повышать порядок модели сигнала, т.е. расширять спектр несущего сигнала. С некоторой натяжкой можно назвать широкополосными методы, у которых произведение  $TW \gg 1$  имеет величину значительно большую единицы. Было предложено разбивать информационную посылку длительностью  $T$  на элементы длительностью  $\tau$  с полосой  $W \sim 1/\tau$  при значении базы  $TW \gg 1$ . Число элементарных импульсов  $N = T/\tau = TW$ . ( $B = TW$  - база сигнала). Существуют и другие методы построения

широкополосного сигнала. При них частотно – временная область делится на полосы шириной  $\Delta_f = 1/T$  по оси частот и на временные интервалы длительностью  $= 1/W$  по оси времени. Получающееся при этом разбиение частотно – временной области  $\Delta_t$  показано на рис. 5 б.

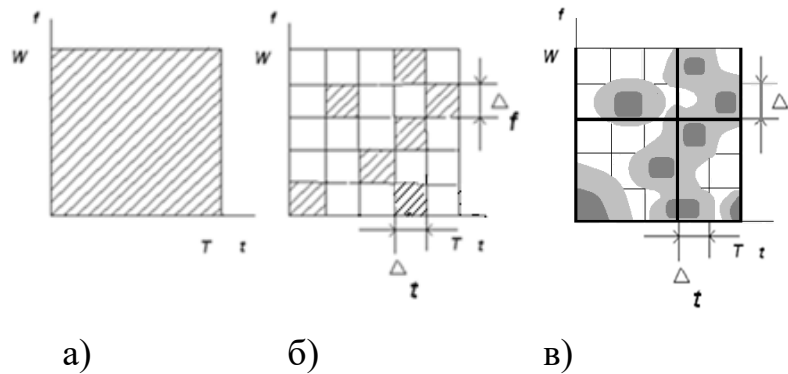


Рис. 5 Частотно – временная область для системы с непрерывным (а), разрывным (б) и стохастическим (в) по времени и частоте сигналами.

Такой метод построения широкополосного сигнала называют иногда частотно - временным разнесением. Синтезированные сигналы называются составными сигналами. При передаче одновременно нескольких импульсов на различных частотах мы получаем частотное разнесение сигнала. Временное разнесение, т. е. передача последовательности импульсов на некоторой постоянной частоте – это время - импульсная модуляция (ВИМ).

Если полагать, что интервалы  $[0, T]$  и  $[0, W]$  – представляют собой интервалы соответствующих эффективных значений, то база сигнала  $B = TW$  равна площади прямоугольника, заштрихованного на на рис. 5 а, сравнение которой с суммарной площадью заштрихованных зон на рис. 5 б даёт всегда меньшее значение. Рандомизация (хаотизация) временных и частотных параметров сигнала размывает границы зон частотно-временного распределения ресурса (см. Рис.5 в), может привести к увеличению общей зоны покрытия прямоугольника  $W \times T$  в сравнении с Рис. 5 б и таким образом увеличить базу  $B$  (зону покрытия) сигнала. Для сравнения многоканальных РЛС с ПВ обработкой с расширением спектра можно использовать следующее понятие обобщённого энергопотенциала

$$P_{об} = P_{пер} NML / P_{пред} , \quad (5)$$

где  $P_{пер}$  – мощность передатчика,  $P_{пред}$  – чувствительность приёмника,  $N$  – размерность временного, а  $M$  и  $L$  – размерности пространственного окна ( $M$  – по азимуту, а  $L$  – по углу места).

### Заключение

Для адаптивных РЛС высокого разрешения предложен обрабатываемый СКА, заключающийся в выборе метода СКА в зависимости от вида сигнала, решаемых задач и наличия аппаратных и ресурсных ограничений. На разных этапах и в различных ситуациях требуется хаотизация параметров радиолокационных сигналов, условий их обработки и формирования, которая устраняет отрицательные эффекты ЦО (стробоскопические, интерференционные, боковые лепестки, шумы квантования и др.). Обосновывается необходимость введения в зондирующие сигналы информационной избыточности, что достигается расширением спектров обычных и пространственных частот. Предложены методы СКА, обеспечивающие важное преимущество – проведение СКА с реализацией возможности построения ассоциативной (параллельной, многоканальной) обработки, адресное варьирование целевых задач, использование СКА при использовании грубых «бинарно – знаковых» статистик входных сигналов.

### Литература

1. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию: Пер. с англ. - М.: Радио и связь, 1986. – 448 с., ил.
2. R. Klemm. Space-Time Detection Theory. // Lecture series under the sponsorship of the sensor and electronics Technology Panel (SET) and the Consultant and Exchange Programmer of RTO presented on 23-24 September 2002 in Moscow, Russia.
3. С. М. Кей, С. Л. Марпл мл. Современные методы спектрального анализа: обзор // ТИИЭР. - 1981. - т. 69. - №11. - с. 5 – 51.

4. Марпл мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 584 с., ил.
5. Спектральное оценивание. Тематический выпуск. (Пер. под общей редакцией Э.Л. Наппельбаума.) // ТИИЭР. - 1982, т. 70, № 9, - с. 5 – 152.
6. Горбунов Ю.Н. Цифровая обработка радиолокационных сигналов в условиях использования грубого квантования. Монография. М.: ФКА, ФГУП «ЦНИРТИ им. акад. А. И. Берга», 2008. – 87 с.
7. Горбунов Ю. Н. Цифровые системы СДЦ и их оптимизация: Монография // МГТУ МИРЭА.- М., 2008. – 132 с.
8. Горбунов Ю. Н. Повышение эффективности обработки и формирования сигналов в РЛС с СДЦ методами рандомизации // Журнал Радиоэлектроники [электронный журнал], 2014, № 10, Режим доступа <http://jre.cplire.ru/jre/oct14/6/text.pdf>
9. Горбунов Ю.Н. Стохастическая радиолокация: условия решения задач обнаружения, оценивания и фильтрации // Журнал Радиоэлектроники [электронный журнал], 2014, № 11, Режим доступа <http://jre.cplire.ru/jre/nov14/3/text.pdf>
10. Калинин В.И., Чапурский В.В. Эффективность двойного спектрального анализа и шумовой радиолокации при действии отражений от местных предметов // Радиотехника и электроника. - 2006, том 51, № 3, с.303 – 313.
11. Горбунов Ю.Н. О возможности уменьшения числа уровней квантования в цифровых фильтрах СДЦ путем применения рандомизированных алгоритмов. // Радиотехника. - 1983, № 6. - с. 45 – 47.
12. Горбунов Ю.Н., Лобанов Б.С., Куликов Г.В. Введение в стохастическую радиолокацию. Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия-Телеком, 2015. 376 с.: ил.
13. Горбунов Ю.Н. Рандомизированная обработка сигналов в радиолокации и связи". Монография. ISBN 978-3-659-37797-6. Издательство «LAP LAMBERT Academic Publishing», 66121, Saarbrücken, Germany, 2015, 150 с.: ил.

14. Горбунов Ю.Н. Стохастическая интерполяция пеленга в адаптивных антенных решетках с последовательным диаграммообразованием на базе усечённых (малоэлементных) апертур и робастных статистик сигнала на входе // Издательство «Радиотехника», Журнал «Антенны», 2015, №6, С. 18-26.

15. Горбунов Ю.Н. Принцип стохастического обеления пассивных коррелированных помех в задаче оптимизации систем селекции движущихся целей // Информационно-управляющие системы, 2015, №2, С. 15-22.

**Для цитирования:**

Ю. Н. Горбунов. Радиолокация высокого разрешения: обрацаемый спектральный анализ. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 10. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/oct18/7/text.pdf>  
DOI 10.30898/1684-1719.2018.10.7