

УДК 621.396.969: 528.831.1

Сравнительный анализ двух критериев и методов измерения пространственного разрешения РЛС при радиолокации и радиовидении

Карпов Олег Анатольевич

доктор технических наук, старший научный сотрудник ЗАО «АЭРОКОН».

E-mail: karp@smtp.ru.

Адрес: 140180, г. Жуковский, Московская область, ул. Жуковского, д.1.

Костров Виктор Васильевич

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Радиотехника»

Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: vvk@mit.ru.

Адрес: 602264, г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23.

Толстов Евгений Федорович

доктор технических наук, профессор, начальник отдела ЗАО «АЭРОКОН».

E-mail: E_tolstov@mail.ru.

Адрес: 140180, г. Жуковский, Московская обл., ул. Жуковского, 1.

Аннотация: В работе представлены два критерия и метода оценки пространственной разрешающей способности радиолокаторов с синтезированием апертуры (РСА): критерий Релея (метод разделения объектов) и критерий ширины отклика на точечный объект (метод импульсного реагирования). Приводятся вероятностные характеристики раздельного наблюдения объектов на радиолокационных изображениях (РЛИ). Для трёх основных типов импульсных характеристик РСА численными методами получены функции распределения вероятности разрешения двух угловых отражателей, установлена взаимосвязь между шириной главного лепестка импульсной характеристики с разрешающей способностью. Показано влияние случайной разности фаз отражённых сигналов на характер разрешения целей. Разработаны рекомендации по снижению влияния других причин случайного характера (уровня фона и мощности шумов приёмника) на измерение разрешающей способности РСА. Приводятся РЛИ радиолокационного полигона с мирами, полученные с помощью РСА в S и X диапазонах. Определены требования к полигону, на котором устанавливаются испытательные миры, и к угловым отражателям, применяемым в качестве эквивалента одиночных точечных целей. Полученные результаты дают возможность использовать в процессе испытаний и аттестации РСА любой из критериев и методов оценки разрешения.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированием апертуры антенны, критерий Релея, радиолокационное изображение, разрешающая способность.

Введение

Изначально в классической радиолокации пространственная разрешающая способность РЛС, как и любой другой (например, оптической) информационной системы, трактуется как возможность с её помощью раздельно наблюдать два близко расположенных малоразмерных (точечных) объекта [1], что, в конечном счёте, характеризует детальность формируемых РЛС радиолокационных изображений (РЛИ).

В соответствии с этой трактовкой первоначальным критерием, позволяющим численно оценить разрешающую способность, был за-

имствованный из физической оптики [2] критерий Релея (1842 – 1919 гг.), предложенный им для характеристики разрешения оптической системой двух некогерентно излучающих точечных объектов (звёзд) по провалу в яркости в их изображении.

Существенным отличием РЛС от некогерентной пассивной оптической системы, для которой был предложен критерий Релея, является облучение наблюдаемых близкорасположенных объектов зондирующим радиосигналом с фиксированной несущей частотой, что приводит к интерференции отражённого от

них сигнала на входе приёмника. Тем не менее, долгое время критерий Релея оставался основным в радиолокации, что было вполне оправданным при обзоре пространства реальным лучом и некогерентной обработке последовательности эхо-сигналов. На основе метода Релея строились и методы экспериментального измерения разрешающей способности – по визуальному разделению на РЛИ сигналов от двух угловых отражателей, расположенных на заданном расстоянии (метод разделения объектов – РО).

При переходе в радиолокации к когерентной обработке сигналов, их интерференция стала играть существенную роль, что привело к широкому использованию другого критерия разрешающей способности РЛС, трактующего её как ширину отклика системы обработки на малоразмерный (точечный) объект [3, 4]. В соответствии с этим критерием экспериментальное измерение разрешения РЛС сводится к инструментальному измерению на РЛИ ширины отметки углового отражателя. Этот критерий и метод измерения получили международную сертификацию в рамках технических протоколов к Договору по открытому небу [5], где получил название метода импульсного реагирования (ИР), а также совместно с методом РО был разрешён к использованию при испытаниях авиационной техники в Российской Федерации.

Оба критерия и основанные на них методы (РО и ИР) обладают своими достоинствами и недостатками, однако очевидно, что они имеют строгую математическую связь [6] и могут быть использованы как совместно, так и раздельно при разработке и экспериментальной оценке характеристик радиолокационных систем. Математическое обоснование методов оценки пространственной разрешающей способности, попытка которого делается в данной статье, приобретает особый вес по отношению к РЛС с синтезированной апертурой антенны (РСА) космического аппарата (КА) «Кондор-Э», поскольку в ходе её лётных испытаний

впервые были реализованы режимы радиовидения.

1 Особенности критерия Релея при когерентной обработке

Малоразмерный (менее элемента разрешения) радиоконтрастный объект (например, угловый отражатель) для РЛС в режиме обзора поверхности можно рассматривать как входной сигнал поверхности в виде дельта-функции Дирака [7]. В этом случае реакцией РЛС на это воздействие будет сигнал $s(r)$, подобный её импульсной характеристике $h(r) \cong s(r)$ (ИХ) [8]. В теории линейных систем и оптике модуль ИХ $S(r) = |s(r)| \cong |h(r)|$ (вещественное яркостное изображение точки) иногда называют сигнальной функцией системы.

Здесь и далее под аргументом r будем понимать одну из координат формируемого в обзорном режиме РЛИ (азимут или наклонная дальность), а амплитуду (максимальное значение) реакции $s(r)$ на точечный отражатель, не теряя общности рассуждений, будем считать единичной.

Очевидно, что реакцию когерентной РЛС на сигнал от двух одинаковых по отражательной способности малоразмерных радиоконтрастных объектов (РЛИ двух угловых отражателей), разнесённых на расстояние Δr , можно представить в виде модуля суммы

$$S_{\Sigma}(r) = |s(r - \Delta r/2) \exp(j\phi_1) + s(r + \Delta r/2) \exp(j\phi_2)| = |s(r - \Delta r/2) + s(r + \Delta r/2) \exp(j\Delta\phi)|, \quad (1)$$

где ϕ_1 , ϕ_2 и $\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1$ – начальные фазы складывающихся (интерферирующих) в антенной системе РЛС сигналов и их разность. Параметры ϕ_1 , ϕ_2 и $\Delta\phi$ зависят от длины пути распространения радиоволн от РЛС к объектам и обратно, и многих других факторов. Причём изменение расстояний хотя бы на долю длины волны приводит к существенному изменению фазовых параметров ϕ_1 , ϕ_2 , $\Delta\phi$, поэтому от наблюдения к наблюдению их можно считать независимыми случайными величинами. Обычно закон распределения этих случайных

величин принимают равномерным в диапазоне $0 \dots 2\pi$ [9].

При использовании критерия Релея заметную роль играет форма ИХ, поэтому в процессе сравнительного анализа будем рассматривать три типа ИХ, охватывающих все возможные варианты работы РЛС в обзорных режимах.

Первый тип ИХ – это ИХ в виде функции

$$\text{Sinc}(\rho) = \frac{\sin(\pi\rho)}{\pi\rho}, \quad (2)$$

где $\rho = r/\Delta_r$ – нормированная координата, отнесённая к ширине главного лепестка функции на уровне 3 дБ по амплитуде ($1/\sqrt{2} = 0,707$ от максимума) Δ_r . По существу Δ_r – это численная характеристика разрешения РЛС по критерию ИР.

Данный тип ИХ хорошо описывает форму сигнальной функции РЛС по координате наклонной дальности при использовании зондирующих сигналов с внутриимпульсной линейной частотной модуляцией (ВИЛЧМ), а также сигнальную функцию по азимутальной координате для РЛС в режимах с доплеровским обужением луча (ДОЛ) и фокусированным синтезированием апертуры антенны (ФСА) [1, 10]. По физическому смыслу выражение (2) описывает автокорреляционную функцию ВИЛЧМ сигнала.

Часто при сжатии ВИЛЧМ сигнала в РЛС используются различные весовые функции (Хемминга, Чебышева и т.д.), которые изменяют форму ИХ. Однако моделирование показывает, что при сравнительном анализе критериев разрешения эти изменения не имеют существенного значения.

Для режимов обзора реальным лучом (РЛ) характерна форма ИХ по азимутальной координате в виде функции

$$\text{Sinc}^2(\rho) = \frac{\sin^2(\pi\rho)}{(\pi\rho)^2}. \quad (3)$$

По существу такая форма ИХ описывает диаграмму направленности (ДН) антенны РЛС

на приём и передачу при равномерном амплитудном распределении по апертуре [11]. Распределение, отличное от равномерного, изменяет форму ДН РЛС, однако моделирование показывает, что при сравнительном анализе критериев разрешения эти изменения также не имеют существенного значения.

Третий тип ИХ характерен для РЛС, использующих зондирующий сигнал в виде короткого прямоугольного радиоимпульса или радиоимпульса с фазо-кодовой манипуляцией (ФКМ). Основной лепесток ИХ по наклонной дальности для таких РЛС имеет вид треугольного импульса

$$\text{Trip}(\rho) = \begin{cases} 1 - \alpha\rho, & 0 \leq \rho < 1/\alpha; \\ 1 + \alpha\rho, & -1/\alpha \leq \rho < 0; \\ 0, & \text{при остальных } \rho, \end{cases} \quad (4)$$

где $\alpha = 2(1 - 1/\sqrt{2})$.

При использовании сложных ФКМ сигналов (коды Баркера, М-коды, псевдо случайные последовательности) в их автокорреляционной функции имеются боковые лепестки [1], однако их уровень существенно (примерно в N раз, где N – длина последовательности) меньше главного лепестка и их влияние на анализ критериев разрешения не оказывает заметного влияния.

Вид формы ИХ трёх рассматриваемых далее типов показан на рис. 1.

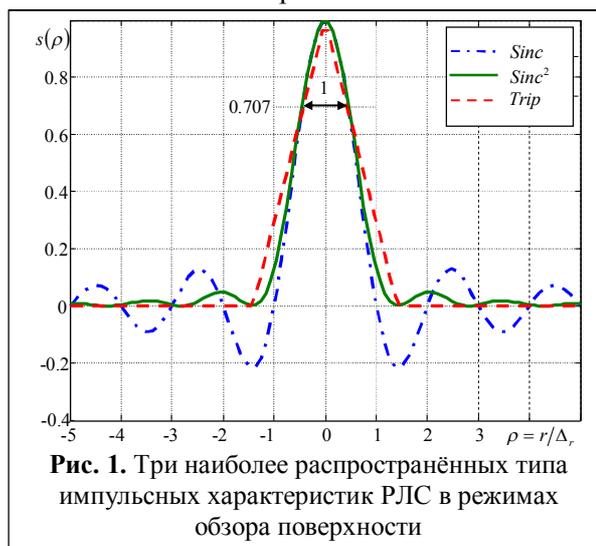


Рис. 1. Три наиболее распространённых типа импульсных характеристик РЛС в режимах обзора поверхности

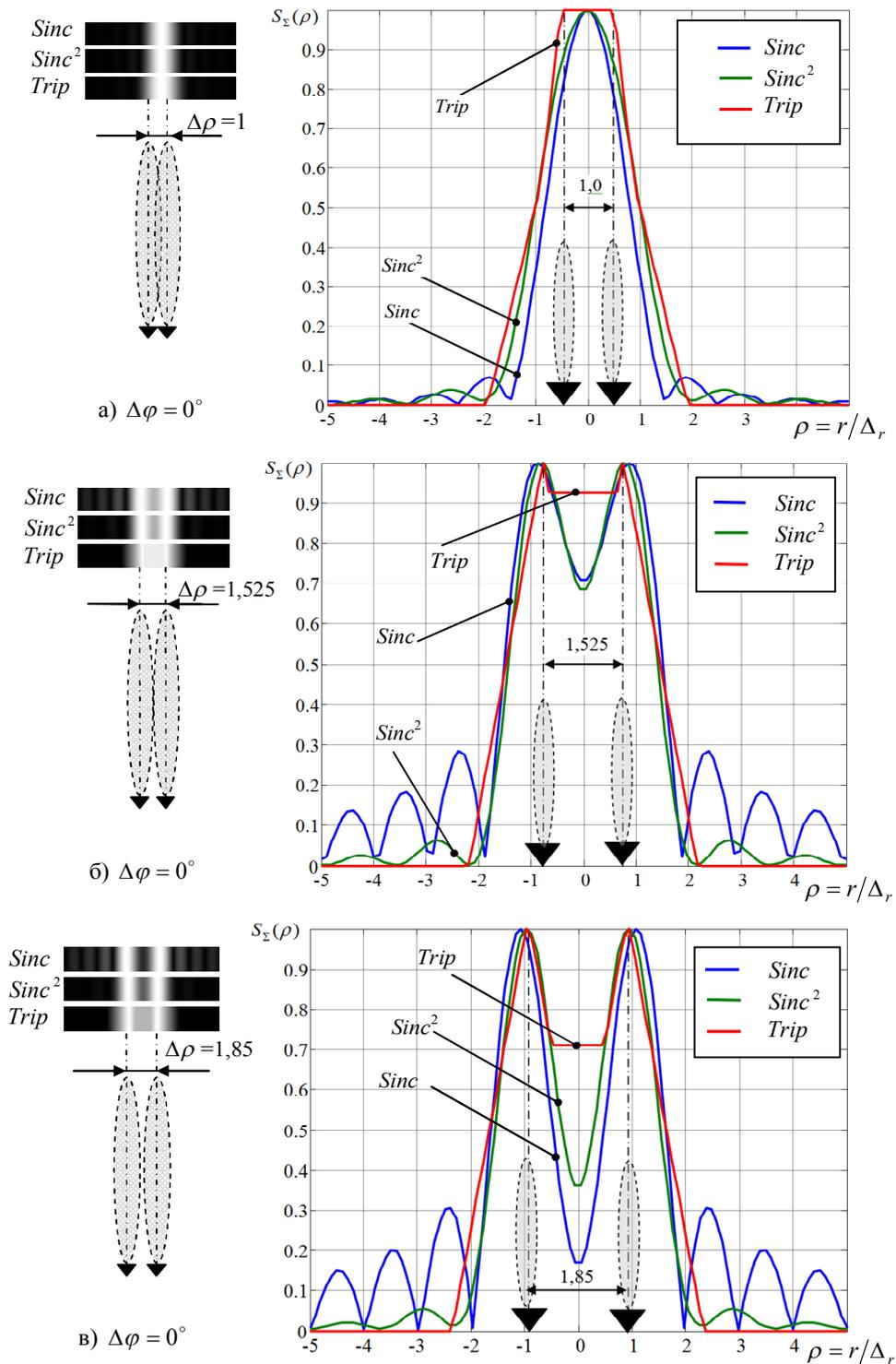


Рис. 2. Динамика изменения формы и глубины провала между откликами от нормированного расстояния между уголками $\Delta\rho = \Delta r/\Delta_r = 1$ (а), 1,525 (б) и 1,85 (в) при синфазном суммировании сигналов ($\Delta\phi = 0^\circ$)

Чтобы проиллюстрировать поведение реакции РЛС на два уголкового отражателя в раз-

личных ситуациях, рассмотрим сначала случай синфазного суммирования их сигналов, т.е.

положим в (1) $\Delta\phi = 0^\circ$ и будем изменять расстояние между уголками Δr .

Численный анализ показывает, что при $\Delta r \leq \Delta_r$ ($\Delta\rho = \Delta r/\Delta_r \leq 1$) для всех типов ИХ

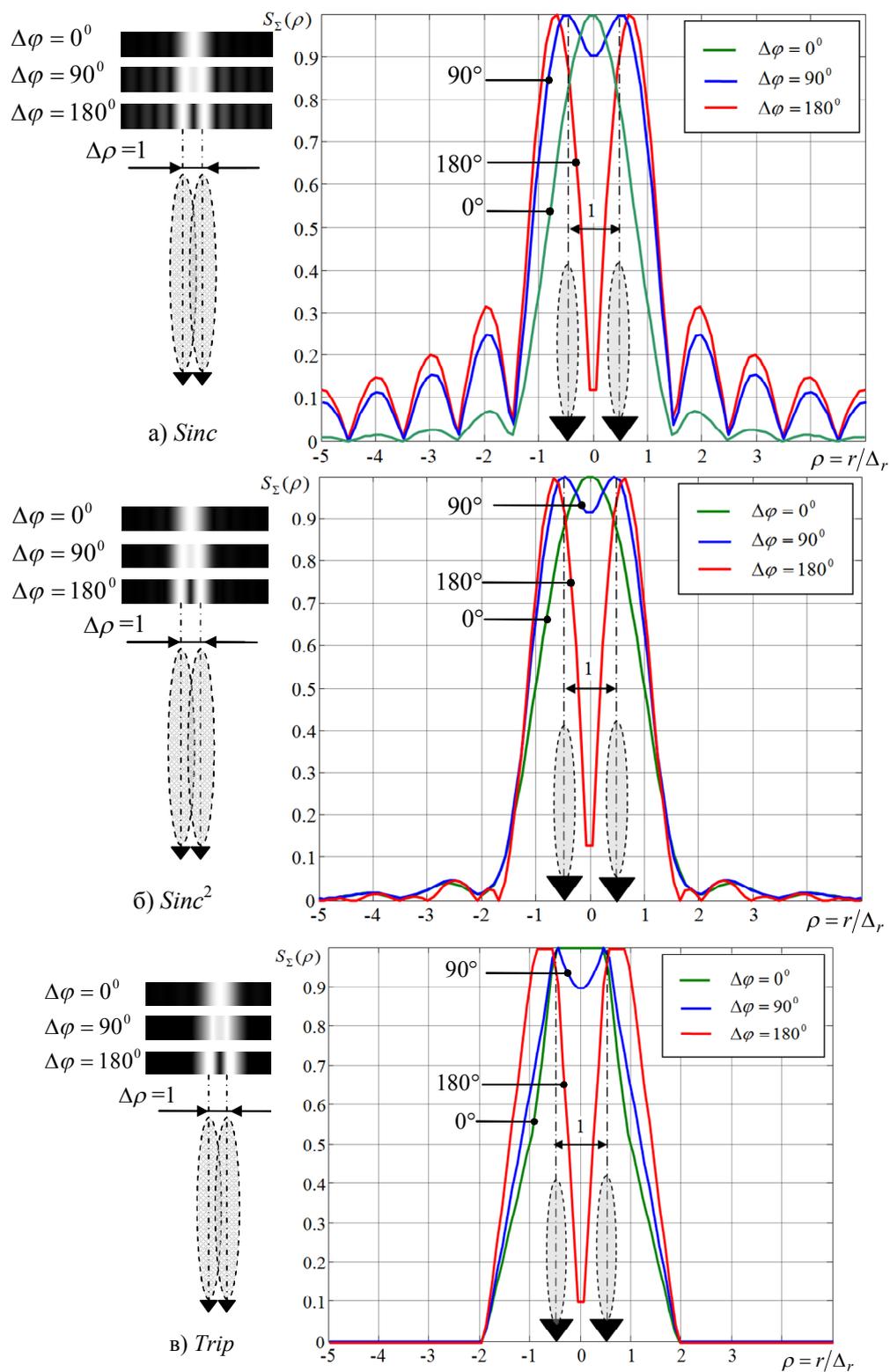


Рис. 3. Динамика изменения формы провала между откликами от разности фаз $\Delta\phi = 0^\circ$, 90° и 180° для трёх видов сигнальной функции РЛС: *Sinc* (а), *Sinc*² (б) и *Trip* (в)

провала на РЛИ между уголками не возникает, и они выглядят как один объект. Когда $\Delta r > \Delta_r$ ($\Delta \rho > 1$) появляется провал, который для ИХ типа *Sinc* и $Sinc^2$ достигает уровня $\approx 0,707$ от максимума при $\Delta r = 1,525 \Delta_r$ ($\Delta \rho > 1,525$). Для ИХ типа *Trip* этого же уровня провал достигает при $\Delta r = 1,85 \Delta_r$ ($\Delta \rho > 1,85$), т.е. при заметно большем расстоянии между целями. Это объясняется линейностью склонов главного лепестка функции *Trip*, что при суммировании сдвинутых импульсов приводит к появлению плоской полки. Происходит как бы «заплывание» провала и увеличение интервала сдвига, при котором наступает раздельное наблюдение. Динамика изменения суммарного отклика РЛС $S_{\Sigma}(\rho)$ на две цели при изменении расстояния между уголками для всех трёх рассматриваемых типов ИХ и синфазном суммировании сигналов показана на рис. 2. Справа на рисунке представлены графики функции $S_{\Sigma}(\rho)$ от нормированной координаты $\rho = r/\Delta_r$, слева соответствующие им яркостные полосы, дающие представление о возможности визуального разрешения объектов на РЛИ.

Рассмотренная ситуация при синфазном суммировании сигналов наиболее близка к варианту некогерентного наблюдения в радиолокации и (или) оптике.

Теперь рассмотрим ситуацию, когда интервал между уголками фиксирован и равен ширине основного лепестка ИХ $\Delta r = \Delta_r$ ($\rho = 1$), но изменяется разность фаз сигналов уголков $\Delta \phi$ при их суммировании в антенной системе РЛС. Динамику изменения провала для трёх значений разности фаз $\Delta \phi = 0^\circ$, 90° и 180° для трёх типов ИХ иллюстрирует рис. 3. В случае синфазного суммирования сигналов ($\Delta \phi = 0^\circ$) зависимости повторяют графики, представленные на рис. 2, а.

Анализ графиков, представленных на рис. 3, показывает, что при $\Delta \phi \neq 0^\circ$ даже при расстоя-

нии между уголками Δr , равном ширине главного лепестка Δ_r , для всех типов ИХ РЛС на РЛИ между целями появляется провал, который увеличивается с увеличением разности фаз и при противофазном суммировании сигналов ($\Delta \phi = 180^\circ$) достигает уровня $\approx 0,1$ от максимума, т.е. наступает чёткое разрешение двух точечных объектов.

Более того, теоретически разрешение объектов по провалу на изображении при противофазном суммировании их сигналов для когерентной РЛС можно получить при сколь угодно малом расстоянии между ними. На практике это расстояние будет ограничиваться размером половины дискрета (пикселя) цифрового РЛИ и (или) ширины пятна электронного индикатора РЛС.

Таким образом, можно констатировать, что для когерентной РЛС событие разрешения двух объектов по критерию Релея является случайным событием, поскольку зависит от случайной разности фаз принимаемых сигналов. Это является основным недостатком критерия Релея при оценке разрешающей способности когерентных РЛС, так как требует вероятностного описания этой характеристики и, следовательно, набора определённого объёма измерений, обеспечивающего достоверную статистическую оценку.

3 Связь вероятности разрешения двух уголковых отражателей по критерию Релея с шириной импульсного отклика РЛС

Наиболее полным описанием разрешения двух точечных объектов как случайного события при оценке разрешающей способности когерентной РЛС является зависимость вероятности $P(\Delta r)$ величины провала в суммарном отклике $S_{\Sigma}(r)$ не менее 3 дБ от величины сдвига между уголками Δr (см. формулу (1)).

В формуле (1) отклики на точечные объекты сдвинуты симметрично влево и вправо на величину $\Delta r/2$ относительно нуля оси r . Поэтому вероятность их разрешения по критерию

Релея можно записать как вероятность того, что

$$S_{\Sigma}(0) \leq 0,707 S_{\Sigma \max}, \quad (5)$$

где $S_{\Sigma}(0) = S(\Delta r/2) |1 + \exp(j\Delta\phi)|$,
 $S_{\Sigma \max} = S_{\Sigma}(\Delta r/2) = |s(0) - s(\Delta r) \exp(j\Delta\phi)|$.

В записи (5) было учтено, что для $S_{\Sigma}(r)$ вследствие симметрии ИХ РЛС $h(r) \cong s(r)$ и её модуля $S(r) = |s(r)|$ нижняя точка провала будет всегда в начале координат $r=0$, а максимум $S_{\Sigma \max} = S_{\Sigma}(\Delta r/2) = S_{\Sigma}(-\Delta r/2)$ в точке $r = \pm \Delta r/2$.

Источником случайности в (1) служит разность фаз $\Delta\phi$, плотность распределения вероятности которой принимается равномерной в интервале $0 \dots 2\pi$

$$w(\Delta\phi) = \begin{cases} 1/2\pi & \text{при } 0 \leq \Delta\phi < 2\pi, \\ 0 & \text{при остальных } \Delta\phi. \end{cases}$$

При заданных уровнях модуля сигнала (5) рассмотрим Δr как случайную величину, функционально связанную с $\Delta\phi$ соотношением $\Delta r = F(\Delta\phi)$. Пусть $p(y)$ – плотность распределения вероятности значений Δr . Для её расчёта необходимо [12]: найти функцию

$$\Delta\phi = f(\Delta r), \quad (6)$$

обратную $F(*)$; модуль якобиана преобразования $|\Delta\phi/\Delta r|$ и сделать замену переменных. В

результате получим $p(y) = w[f(y)] \cdot \left| \frac{df(y)}{dy} \right|$.

Вероятность $P(\delta r)$ события, что разрешение будет не хуже некоторой заданной величины Δr , определяется формулой

$$P(\Delta r) = \int_0^{\Delta r} p(y) dy, \quad (7)$$

или после подстановки плотности $p(y)$

$$P(\Delta r) = \int_0^{\Delta r} w[f(y)] \cdot \left| \frac{df(y)}{dy} \right| dy. \quad (8)$$

В теории вероятностей функцию (6) называют функцией распределения вероятностей случайного события.

К сожалению, получить точные решения уравнения (5) в виде (6) для рассматриваемых

типов ИХ не удаётся. Выходом может служить запись приближенных решений, такая попытка для ИХ типа *Sinc* предпринималась, например, в работе [6]. Однако ещё одним выходом из ситуации является численное определение вероятности $P(\Delta r)$ разрешения уголков по критерию Релея. Полученные таким образом графики могут быть использованы в дальнейшем для практической работы.

Блок-схема программы численных расчётов функции $P(\Delta r)$ представлена на рис. 4 и включает в себя генератор ИХ заданного типа $s(r)$, генератор случайной разности фаз $\Delta\phi$, устройства сдвига, сумматор, вычислитель модуля, пороговое устройство и счётчик событий.

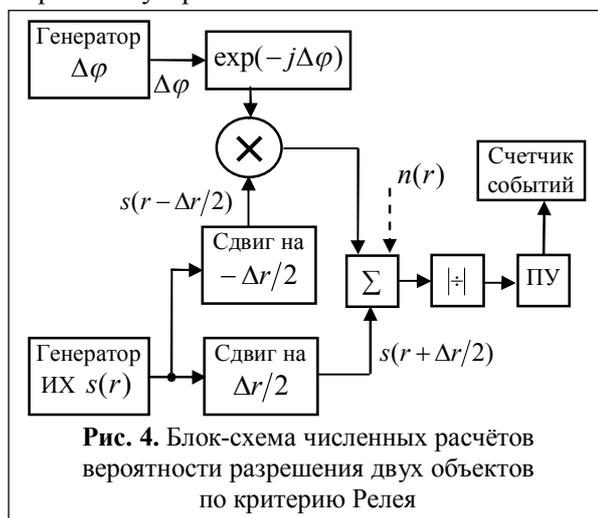


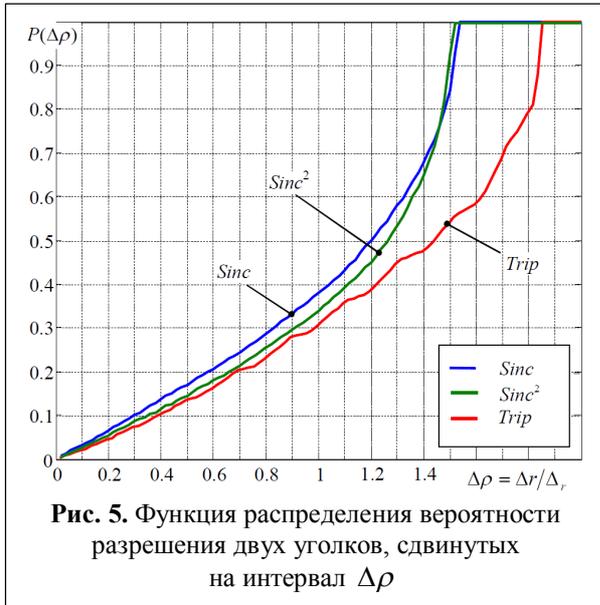
Рис. 4. Блок-схема численных расчётов вероятности разрешения двух объектов по критерию Релея

Вероятность разрешения двух объектов на выходе программы рассчитывается как отношение числа событий, определяемых выражением (5) к числу всех событий, различающихся сгенерированными в программе случайными значениями разности фаз $\Delta\phi$.

С методической и практической точек зрения численные расчёты удобно проводить не для абсолютных значений сдвига Δr , а для величин относительного сдвига $\Delta\rho = \Delta r/\Delta_r$, где Δ_r – ширина главного лепестка ИХ РЛС на уровне 0,707.

Графики зависимостей вероятности разрешения точечных объектов по критерию Релея $P(\Delta\rho)$, рассчитанные численным методом с

использованием формул (1), (5) и блок-схемы на рис. 4 для нормированного сдвига $\Delta\rho$ и трёх типов ИХ РЛС представлены на рис. 5. Число усреднений по случайным реализациям разности фаз $\Delta\phi$ в численном эксперименте составляло 1000.



Следует отметить, что полученный результат для ИХ типа *Sinc* практически полностью повторяет график, представленный в работе [6] и полученный методом аппроксимации выражения (5) приближенной формулой, что подтверждает достоверность полученных зависимостей.

По существу полученные выше функции распределения вероятности разрешения двух уголков по критерию Релея для нормированного аргумента $\Delta\rho = \Delta r / \Delta_r$ показывают связь между шириной главного лепестка ИХ РЛС Δ_r , т.е. с разрешающей способностью по критерию ИР, и достижимым с определённой вероятностью разрешением двух уголков. Они дают возможность использовать в процессе испытаний любой из критериев и методов оценки разрешения или оба метода одновременно.

Например, если в ходе испытаний с использованием метода ИР было получено разрешение Δ_r , то по графикам рис. 5 можно опреде-

лить на каком расстоянии $\Delta r = \Delta_r \Delta\rho$, и с какой вероятностью $P(\Delta\rho)$ будут разрешаться два точечных объекта. Напротив, если получено значение разрешения двух уголков на расстоянии Δr с вероятностью $P(\Delta r)$, то по этим графикам можно определить ширину главного лепестка ИХ РЛС по уровню 3 дБ, т.е. разрешение по критерию ИР. При этом, очевидно, должен учитываться тип ИХ РЛС по соответствующей координате.

Пример. Пусть в ходе испытаний по оценке разрешающей способности РЛС по дальности, использующей ФКМ зондирующий сигнал (ИХ типа *Trip*) по методу РО по двум уголкам, расположенным на расстоянии $\Delta r = 15$ м, получена вероятность разрешения $P(\Delta\rho) = 0,3$. Тогда разрешающая способность по методу ИР будет (см. график *Trip* на рис. 5) не хуже $\Delta_r = 15$ м ($\Delta\rho = 1$).

Необходимо отметить, что помимо случайной разности фаз на поведение провала между изображениями уголков влияют и другие случайные факторы. Прежде всего, к ним следует отнести наличие сигнала от подстилающего фона местности и собственного шума приёмника РЛС. Этот сигнал, также когерентно складываясь с сигналами уголков, искажает форму откликов, что приводит к изменению результата визуального разделения их изображений.

Для примера на рис. 6 представлены графики, иллюстрирующие влияние сигнала фона и собственных шумов на выходной отклик РЛС от двух угольковых отражателей. При расчётах предполагалось, что ИХ РЛС имеет форму *Trip*, а отношение мощности отражённого от уголка сигнала к суммарной мощности сигнала фона и шума приёмника составляет 10, 20 и 30 дБ. Расчёты проводились по схеме рис. 4, однако дополнительно на вход сумматора до операции вычисления модуля подавался шумовой сигнал $n(r)$, имитирующий помеху от фона и собственных шумов на экране индикатора РЛС (на рис. 4 показано пунктиром).

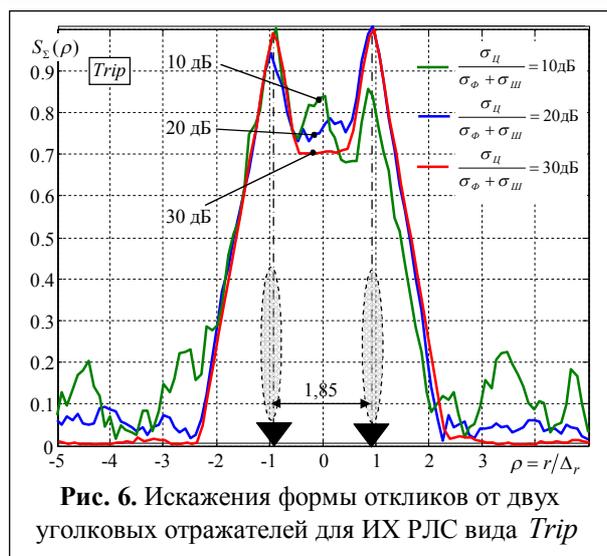


Рис. 6. Искажения формы откликов от двух уголкового отражателей для ИХ РЛС вида *Trip*

Шум $n(r)$ представляет собой коррелированный случайный процесс с интервалом корреляции, равным ширине ИХ РЛС, нулевым математическим ожиданием $m_n = 0$ и заданной дисперсией D_n . При единичной амплитуде полезного отклика $S_{\Sigma \max} = 1$ величина D_n характеризует реальное отношение ЭПР цели $\sigma_{ц}$ к ЭПР элемента фона σ_{ϕ} и эквивалентной ЭПР шума приёмного тракта РЛС $\sigma_{ш}$:

$$R = \frac{\sigma_{ц}}{\sigma_{\phi} + \sigma_{ш}}. \quad (9)$$

На рис. 7 представлены графики функции распределения вероятности разрешения двух уголков, полученные при тех же условиях. Как следует из рис. 7, при $R \geq 20$ дБ влиянием фона и шумов приёмника на результаты измерения разрешающей способности можно пренебречь, поскольку отличие расчётных значений функции $P(\Delta\rho)$ при этих значениях R от значений, полученных в отсутствие шума (пунктирная линия на рис. 7) составляет единицы процентов. Таким образом, влияние фона местности и шума приёмника, как источников случайной ошибки оценки разрешения, может быть устранено или сведено к минимуму обеспечением соответствующих условий эксперимента.

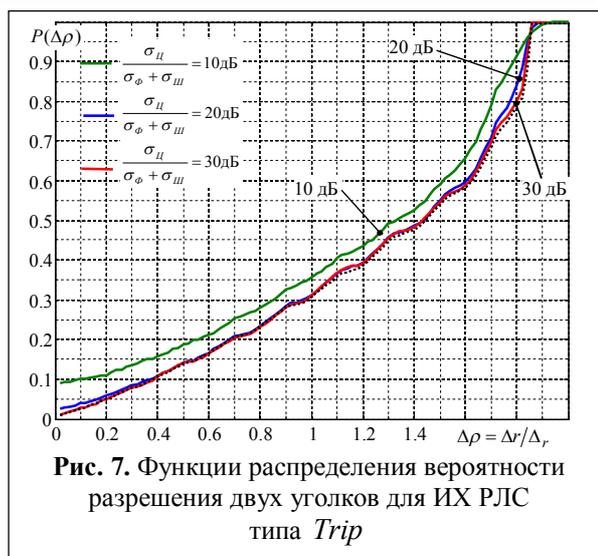


Рис. 7. Функции распределения вероятности разрешения двух уголков для ИХ РЛС типа *Trip*

Обычно оценка разрешающей способности РЛС осуществляется на небольших дальностях и эквивалентной ЭПР шума в (9) можно пренебречь. Тогда $R \approx \sigma_{ц}/\sigma_{\phi}$ и можно записать требования к удельной ЭПР поверхности σ_{ϕ}^0 , на которой располагаются измерительные уголки с известной ЭПР $\sigma_{ц}$:

$$\sigma_{\phi}^0 \leq \frac{\sigma_{ц}}{10^2 \Delta_r \Delta_a}, \quad (10)$$

где Δ_r, Δ_a – размеры элемента разрешения РЛС по пространственным координатам (дальность, азимут), т.е. разрешающая способность по соответствующим координатам, полученная по методу ИР.

Например, при $\sigma_{ц} = 100 \text{ м}^2$ и $\Delta_r = \Delta_a = 12 \text{ м}$ удельная ЭПР поверхности должна быть не более -21 дБ, что примерно соответствует [13] поверхности «степь, лето, трава» при малых ($3^\circ \dots 5^\circ$) углах падения электромагнитных волн, т.е. такие условия эксперимента представляются вполне реализуемыми на практике.

4 Сложности при переходе к радиовидению

Пока в ходе лётных испытаний РСА КА «Кондор-Э» [14] речь шла о преодолении недостатков, связанных с изъянами аппаратуры и программного обеспечения, а также оценки основных характеристик радиолокатора в обзорных и даже в маршрутных режимах, методика

определения пространственной разрешающей способности, разработанная в рамках Договора по открытому небу, не вызывала вопросов. И только когда дело дошло до оценки разрешения в детальном прожекторном режиме (ДПР), возникли сложности, суть которых сводится к следующему.

Методика оценки пространственной разрешающей способности [5, 6] разрабатывалась для авиационных радиолокаторов с длинами волн 3...5 см и разрешающей способностью не лучше 3 м. При этом условием корректности оценок предполагалось обеспечение отношения «сигнал/фон+шум» не хуже 40 дБ. Для длины волны радиолокатора 3...5 см, как это показано выше, это было несложно обеспечить. Даже поверхности типа «степь, лето, трава» при малых ($3^\circ \dots 5^\circ$) углах падения электромагнитных волн, которые чаще всего и используются при обзоре земной поверхности в авиации, удовлетворяют этим требованиям.

РСА КА «Кондор-Э» – радиолокатор S диапазона волн (несущая частота 3,2 ГГц, длина волны около 10 см) в ДПР обладает расчётной разрешающей способностью примерно 0,75 м как по наклонной дальности, так и по азимуту. Напомним, что при переходе из X диапазона в S диапазон эффективная площадь отражения (ЭПО) слабо шероховатых поверхностей при углах падения $20^\circ \dots 50^\circ$ уменьшается примерно на 4 дБ (см. таблицу 8 в [13]), в то время как ЭПО трёхгранных уголковых отражателей, часто используемых в качестве отражателей, уменьшается почти на 10 дБ (см. рис.8). В таких условиях для обеспечения корректности оценки разрешения следовало бы увеличить ЭПО отражателей, что повлечёт за собой увеличение размеров самих уголковых отражателей. Но размеры отражателей должны быть таковы, чтобы каждый из них смог поместиться в элемент разрешения $0,75 \times 0,75$ м. Следовательно, максимальный размер раскрытия уголкового отражателя не должен превышать 0,75 м. ЭПО такого трёхгранного уголкового отражателя составляет примерно 15 дБ. Это означает, что удельная ЭПО поверхности, на кото-

рой установлены отражатели, должна быть не более минус 25 дБ. Поверхности типа «степь, лето, трава», привычная для X диапазона, уже не подходит, поэтому трёхгранные уголковые отражатели требуется устанавливать на поверхности типа взлётно-посадочной полосы. Вместе с тем, даже на фоне поверхности типа «степь, лето, трава» необходимые –40 дБ обеспечиваются в случае использования уголковых отражателей с квадратными гранями. ЭПО таких отражателей при тех же размерах диагонали примерно на 10 дБ больше, чем для уголковых отражателей с треугольными гранями.

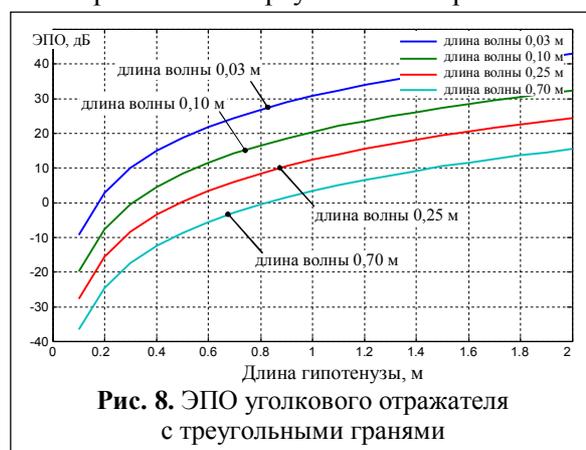


Рис. 8. ЭПО уголкового отражателя с треугольными гранями

В качестве иллюстрации к представленным выше соображениям на рис.9 (а,б) показаны РЛИ радиолокационных полигонов для X и S диапазонов. Полигоны предназначены для испытаний РСА по методике ИР. Миры для оценки пространственного разрешения установлены на поверхности типа «степь, лето, трава». На снимках хорошо видна разница в изображениях примерно одних и тех же по характеру и удельной ЭПО участков местности. Правда, следует учесть, что, кроме разницы в диапазонах, есть и ещё отличия. Снимки: 1) авиационный (а) и космический (б), 2) разрешение 3 м (РСА Договора по открытому небу) и лучше 1 м (РСА КА «Кондор-Э»).

Здесь уместно напомнить о других возможностях выхода из положения в случае радиовидения, в частности, об использовании транспондеров или станций активного контроля. Однако для осмысления этой проблемы, анализа достоинств и недостатков, а также разработки методики для этого варианта требуется

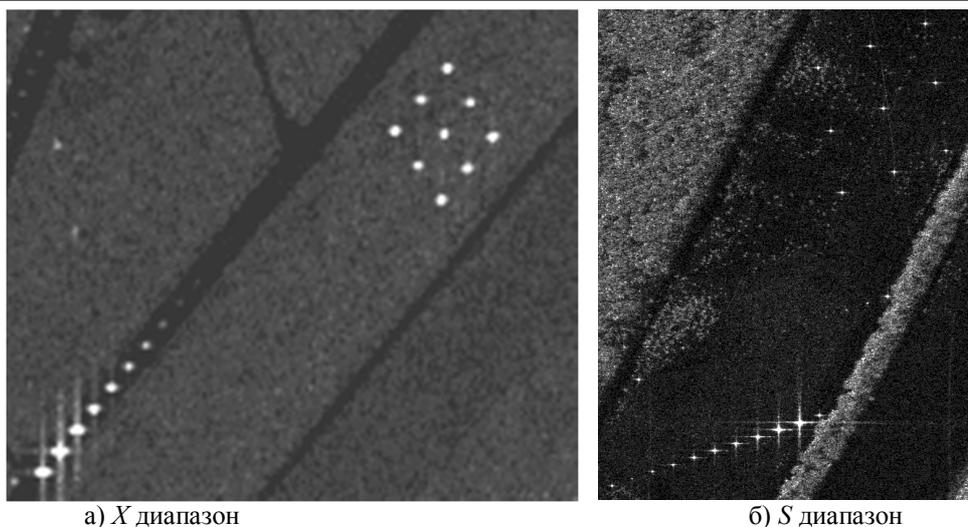


Рис. 9. РЛИ радиолокационного полигона с мирами

время и серьезные усилия. Тем не менее, такая перспектива существует, и к ней в любом случае, как представляется сейчас, в будущем придётся обратиться.

Заключение

1. К настоящему времени в классической радиолокации используются два критерия и метода оценки пространственной разрешающей способности обзорных режимов. Первый из них – это пришедший из некогерентной оптики критерий (метод) Релея (или критерий (метод) разделения объектов – РО); второй – критерий (метод) ширины отклика на точечный объект (или критерий (метод) импульсного реагирования – ИР).

2. Особенностью использования критерия Релея для оценки разрешающей способности когерентных РЛС является вероятностный характер события раздельного наблюдения объектов на РЛИ. Основной, существенной и неустраняемой причиной этого служит случайная разность фаз отражённых от точечных объектов сигналов. Влияние других причин случайного характера оценки (например, наличие отражений от фона поверхности и собственные шумы приёмника) может быть устранено или сведено к минимуму обеспечением соответствующих условий эксперимента. К этим условиям относятся небольшая дальность съёмки и обеспечение отношения цель-фон в районе измерительной миры не менее 20 дБ.

3. Полученные численными методами графики функции распределения вероятности разрешения двух уголков, сдвинутых на нор-

мированный интервал $\Delta\rho = \Delta r/\Delta_r$, для трёх типов ИХ РЛС показывают связь между шириной главного лепестка ИХ Δ_r , т.е. с разрешающей способностью по критерию ИР, и достижимым с определённой вероятностью разрешением двух уголков. Они дают возможность использовать в процессе испытаний любой из критериев и методов оценки разрешения или оба метода одновременно.

4. Как показали численные расчёты, заметную роль при использовании критерия Релея играет форма ИХ РЛС. Поэтому графики функции распределения вероятности разрешения двух уголков были получены для трёх типов ИХ: в виде функций Sinc , Sinc^2 и Trip . Эти типы ИХ охватывают все возможные варианты обработки сигналов РЛС в обзорных режимах, как по координате наклонной дальности, так и по азимутальной координате. Таким образом, полученное семейство графиков позволяет более точно сопоставлять данные критериев (методов) РО и ИР в каждом конкретном случае.

5. При переходе к радиовидению возникает и решается множество проблем, среди которых немаловажной становится набор процедур, связанных с оценкой пространственной разрешающей способности, как по дальности, так и по азимуту. Размеры обычно применяемых в качестве эквивалента одиночных точечных целей в методике ИР угольковых отражателей с треугольными гранями должны быть ограничены значением заданной разрешающей способностью. Следовательно, ЭПО угольковых

отражателей может оказаться недостаточной для удовлетворения условий методики ИР: отношение «сигнал/фон+шум» не менее 40 дБ. Это и было выявлено при испытаниях РСА КА «Кондор-Э».

6. При построении миры разрешающей способности для РСА радиовидения в S диапазоне и использовании метода ИР выходом из положения может быть такой вариант. Чтобы повысить отношение «сигнал/фон+шум» в РЛИ миры, состоящей из угловых отражателей, следует: 1) при использовании угловых отражателей с треугольными гранями устанавливать их на поверхности типа «взлётная полоса», что может обеспечить выигрыш по отношению к поверхности типа «степь, лето, трава» на 8...10 дБ; 2) на местности типа «степь, лето, трава» использовать угловые отражатели с квадратными гранями, что даёт выигрыш примерно 10 дБ.

7. Радикальным шагом в решении задачи оценки разрешающей способности при радиовидении, по-видимому, был бы переход от пассивных отражателей на радиополигоне к активным, например, транспондерам и станциям активного контроля.

Литература

1. Дудник П.И., Чересов Ю.И. Авиационные радиолокационные устройства. – М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1986. – 538 с.
2. Бегунов Б.Н., Заказов Н.П. Теория оптических систем. – М.: Машиностроение, 1973. – 488 с.
3. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли / Под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.
4. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений / Под ред. Л.А.Школьного. – М.: Изд. ВВИА им. Н.Е.Жуковского, 2008. – 531 с.

5. Радиолокационная станция (РЛС). Договор по открытому небу, аппаратура наблюдения: Методическое пособие. – М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е.Жуковского, 1996. – 135 с.

6. Лепёхина Т.А., Николаев В.И., Толстов Е.Ф. Определение пространственного разрешения космических РСА методом импульсного отклика // II Всероссийские Армандовские чтения: Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред/ Материалы V Всероссийской научной конференции (Муром, 26-28 июня 2012 г.) – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2012. С.481-485.

7. Толстов Е.Ф., Филончиков В.Д., Школьный Л.А. Радиотехнические цепи и сигналы. Теория сигналов, линейных цепей и систем. – М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е.Жуковского, 1993. – 720 с.

8. Василенко Г.И., Тараторин А.М. Восстановление изображений. – М.: Радио и связь, 1986. – 304 с.

9. Тихонов В.И. Оптимальный приём сигналов. – М.: Радио и связь, 1983. – 320 с.

10. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / В.И. Антипов, В.Т. Горяинов, А.Н. Кулин и др.; Под ред. В.Т. Горяинова. – М.: Радио и связь, 1988. – 304 с.

11. Бартон Д., Вард Г. Справочник по радиолокационным измерениям: Пер. с англ. / Под ред. М.М. Вейсбейна. – М.: Сов. радио, 1976. – 392 с.

12. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника, – М.: Радио и связь, 1982. – 624 с.

13. Верба В.С. Авиационные комплексы радиолокационного дозора и наведения. Состояние и тенденции развития. – М.: Радиотехника, 2008. – 432 с.

14. Бабокин М.И., Ефимов А.В., Зайцев С.Э., Карпов О.А., Костров В.В., Неронский Л.Б., Савосин Г.В., Титов М.П., Толстов Е.Ф., Турук В.Э., Цветков О.Е. Итоги и уроки лётных испытаний РСА малого космического аппарата «Кондор-Э» // VI Всероссийские Армандовские чтения: Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред: VII Всероссийская научная конференция. – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2016. – С.16-36.

Поступила 24 мая 2017 г.

English

Comparative analysis of two criteria and methods for radar spatial resolution measurement in radar detection and radiovision

Oleg Anatolyevich Karpov – Doctor of Engineering Senior Research Assistant CJSC AEROKON.

E-mail: karp@smtp.ru. *Address:* 140180, Zhukovsky, Moscow region, Zhukovsky st., 1.

Victor Vasilyevich Kostrov – Doctor of Engineering, Professor Radio Engineering Department Murom Institute Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletov.

E-mail: vvk@mit.ru. *Address:* 602264, Murom, Vladimir Region, Orlovskaya St., 23.

Evgeny Fedorovich Tolstov – Doctor of Engineering, Professor Head of Department, CJSC AEROKON.

E-mail: E_tolstov@mail.ru. *Address:* 140180, Zhukovsky, Moscow Region, Zhukovsky st., 1.

Abstract: The article examines two criteria and evaluation method for SAR (Synthetic Aperture Radar) spatial resolution capacity: Rayleigh criterion (object separation method) and response width criterion to point object (impulse response method). Probabilistic characteristics of object separate observation in radar images (RI) are given. It is shown that accidental phase difference of the signals reflected from point objects is the main reason for stochastic nature of target resolution process. The effect of other reasons of evaluation random nature (for example, surface background reflections and receiver noise) can be minimized by providing the corresponding experimental conditions. Snapshot short range and target to background ratio provision around the measurement mark not less than 20 dB belong to these conditions. It is indicated that SAR pulse response shape plays a prominent part when using Rayleigh criterion. Probability resolution distribution functions for two angles displaced to a certain distance were obtained using numerical methods for SAR pulse response three main types. The interrelation between pulse response main-lobe beamwidth with resolution capacity upon pulse reaction criterion and resolution of two angles attainable with certain probability is manifested. RI of radar training area with the marks obtained via SAR in S and X ranges are given. The presented results enable to properly define requirements to the training area where the test marks are put, and to the angle reflectors which are used as equivalent of isolated point targets. For example, tests of SAR S range radiovision in Kondor-E space vehicle revealed that the signal/background + noise ratio for RI measurement mark has to be not less than 40 dB. To raise the signal/background + noise ratio in RI mark consisting of angle reflectors it is suggested: 1) when using angle reflectors with triangular facets to mount them on surfaces like "runway" that can provide gain with regard to surface like "steppe, summer, grass" by 8 ... 10 dB; 2) angle reflectors with square facets are to be used on the terrain like "the steppe, summer, grass" that results in gain about 10 dB. Transition from passive reflectors in radar training areas to active ones, for example, transponders and in-process monitoring stations would be apparently a radical step in the problem solution of radiovision resolution capacity evaluation. The obtained results provide the opportunity of using any resolution evaluation criteria and methods during SAR test and approval. Simultaneous application of both methods is also possible when carrying out flight tests.

Key words: synthetic aperture radar, Rayleigh criterion, radar image, resolution capacity.

References

1. Dudnik P.I., Cheresov Yu.I. Aviation radar devices. - M.: VVIA Publ. H. named after prof. N. E. of Zhukovsky, 1986. - 538 p.
2. Begunov B.N., Zakaznov N.P. Theory of optical systems. - M.: Mashinostroenie, 1973. - 488 p.
3. Kondratenkov G.S., Frolov A.Yu. Radiovision. Radar detection systems of Earth remote sensing of / Ed. by G.S. Kondratenkov. - M.: Radiotekhnika, 2005. - 368 p.
4. Air reconnaissance radar detection systems, radar image decoding / Ed. by L.A. Shkolny. - M.: VVIA Publ.H. named after N.E.Zhukovsky, 2008. - 531 p.
5. Radar station (RS). Open Sky Treaty, the surveillance equipment: Manual guide. - M.: VVIA Publ.H. named after prof. N.E.Zhukovsky, 1996. - 135 p.
6. Lepyokhina T.A., Nikolaev V.I., Tolstov E. F. Defining space SAR spatial resolution by pulse response method. - II All-Russian Armandovsky readings: Radio physical methods in media remote sensing /Materials of V All-Russian scientific conference (Murom, June 26-28, 2012) - Murom: Prod. – publication and printin office center of MI VLSU, 2012. P.481-485.
7. Tolstov E. F., Filonchikov V. D, Scholny L.A. Radio engineering circuits and signals. Theory of signals, linear circuits and systems. - M.: VVIA publ.H. named after prof. N.E. Zhukovsky, 1993. - 720 p.
8. Vasilenko G. I., Taratorin A. M. Image recovery. - M.: Radio i svyaz, 1986. - 304 p.
9. Tikhonov V. I. Optimum signal detection. - M.: Radio i svyaz, 1983. - 320 p.
10. Synthetic aperture radars. - V.I. Antipov, V.T. Goryainov, A.N. Kulin, and other colleg.; Ed. by V.T. Goryainov. - M.: Radio i svyaz, 1988. - 304 p.
11. Barton D., Ward H. Handbook of Radar Measurement: Transl. from Engl. - Ed. by M.M. Veysbeyn. - M.: Sov. radio, 1976. - 392 p.
12. Tikhonov V. I. Statistical radio engineering. - M.: Radio i svyaz 1982. - 624 p.
13. Verba V.S. Aviation radar surveillance and guidance systems. Status and trends. - M.: Radiotekhnika, 2008. - 432 p.
14. Babokin M.I., Yefimov A.V., Zaytsev S.E., Karpov O.A., Kostrov V.I., Neronsky L.B., Savosin G.V., Titov M.P., Tolstov E.F., Turuk V.E., Tsvetkov O.E. Results and lessons of flight tests of the small-size Kondor-E space vehicle SAR. - VI All-Russian Armandovsky readings: Radio physical methods in media remote sensing: VII All-Russian scientific conference. - Murom: publication and printing office of MI VLSU, 2016. – P. 16-36.