

УДК 621.396.96: 621.391.26

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАЛЬНОСТНЫХ ПОРТРЕТОВ ЦЕЛЕЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ИХ ОБНАРУЖЕНИЯ ИЗВЕСТНЫМИ ОБНАРУЖИТЕЛЯМИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ

Кибирниченко Александр Григорьевич

Заместитель генерального конструктора по науке и созданию систем ПВО АО ОКБ "Новатор".

E-mail: main@okb-novator.ru

Адрес: 620017, г. Екатеринбург, пр. Космонавтов, д. 18.

Кудряшов Максим Юрьевич

Кандидат физико-математических наук, инженер-программист 1 категории

ООО НПЦ "Радиосистемы".

Худанов Андрей Алексеевич

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник,

заместитель генерального директора по научной работе ООО НПЦ "Радиосистемы".

E-mail: radiosys@list.ru.

Адрес: 170005, г. Тверь, ул. Набережная Афанасия Никитина, д. 32.

Аннотация: Предложен подход к оценке влияния параметров радиолокационных дальностных портретов (РЛДП) целей на характеристики их обнаружения с помощью известных алгоритмов обнаружения сверхширокополосных (СШП) сигналов. Показано, что характеристики обнаружения отраженных от реальных целей СШП сигналов зависят от большого числа параметров РЛДП. Неучет этих параметров может привести к существенному ухудшению качества обнаружения целей. Для уменьшения размерности задачи обнаружения отраженных от реальных целей СШП сигналов предложено описывать РЛДП целей обобщенными параметрами. Получены зависимости характеристик обнаружения СШП сигналов от этих обобщенных параметров. Полученные зависимости позволяют по внешнему виду РЛДП целей с приемлемой точностью оценивать характеристики их обнаружения известными обнаружителями СШП сигналов, а так же проводить выбор и обоснование вариантов построения обнаружителей для конкретных типов целей и параметров СШП радаров.

Ключевые слова: сверхширокополосные сигналы, сверхкороткоимпульсные сигналы, обнаружители сверхширокополосных сигналов, радиолокационные дальностные портреты, характеристики обнаружения сверхширокополосных сигналов.

Характерной особенностью обнаружения отраженных от реальных целей сверхкороткоимпульсных (СКИ) и сверхширокополосных (СШП) сигналов является априорная неопределенность их амплитудной, временной, фазовой и частотной структур. Из теории оптимального приема сигналов известно, что в условиях априорной неопределенности параметров принимаемых сигналов построение оптимальных (в классическом понимании) алгоритмов обнаружения не представляется возможным [1]. Поэтому для обнаружения СКИ и СШП сигналов обычно используют квазиоптимальные обнаружители. В настоящее время к числу основных квазиоптимальных обнаружителей СКИ и СШП сигналов относят следующие [2]:

энергетический обнаружитель (ЭО);
одноканальный ранговый обнаружитель (ОРОк);
многоканальный ранговый обнаружитель (МРО);
обнаружитель "по точкам" ("по элементам") (ОПЭ);
череспериодный корреляционный обнаружитель (ЧПКО).

Исследованию характеристик обнаружения указанных выше обнаружителей СКИ (СШП) сигналов посвящено много публикаций. Однако данных по оценке влияния параметров РЛДП целей на характеристики их обнаружения указанными выше обнаружителями как в

отечественной, так и зарубежной литературе имеется очень мало [2]. При этом оценке подвергались лишь отдельные из указанных обнаружителей и, кроме того, исследовалось влияние на характеристики обнаружения только отдельных параметров РЛДП целей. Так, в известной работе [2], кроме вывода о том, что энергетические потери для квазиоптимальных алгоритмов (ЭО, МРО, ОПЭ) относительно оптимального обнаружителя (обнаружителя сигнала с полностью известными параметрами) зависят от числа "блестящих точек" цели (количества импульсов в ее РЛДП), нет никакой другой информации о влиянии параметров РЛДП целей на характеристики их обнаружения.

Вместе с тем, известно, что РЛДП реальных целей, полученные с помощью экспериментальных образцов СКИ (СШП) радаров, могут состоять из нескольких различных по амплитуде и временной протяженности импульсов, которые, кроме того, могут быть различным образом распределены по дальности в РЛДП [3]. Естественно предположить, что кроме количества импульсов («блестящих точек») в РЛДП целей на качество их обнаружения также оказывает влияние амплитудная, временная и фазовая структура РЛДП.

Цель работы – оценка влияния структуры РЛДП целей на характеристики их обнаружения в СКИ и СШП РЛС с помощью квазиоптимальных алгоритмов обнаружения СШП сигналов.

Исследования проводились на основе разработанной и аттестованной математической имитационной модели оценки характеристик обнаружения отраженных от реальных целей СКИ (СШП) сигналов с помощью указанных выше квазиоптимальных обнаружителей. В качестве исходных данных использовались как гипотетические, так и реальные (отраженные от реальных целей) РЛДП. Основой для формирования гипотетических РЛДП целей служили реальные РЛДП, полученные на экспериментальных установках СКИ РЛС [3]. Следует отметить, что при задании отношения сигнал/шум на входе обнаружителя РЛДП целей нормировались по энергии, то есть состав-

ляющие РЛДП отсчеты s_i ($i = 1, \dots, N$) нормировались в соответствии с выражением:

$$\sum_{i=1}^N s_i^2 = 1 \quad (1)$$

В ходе вычислительных экспериментов было выявлено, что характеристики обнаружения отраженных от реальных целей СКИ (СШП) сигналов для всех указанных выше алгоритмов обнаружения зависят не только от количества "блестящих точек" в РЛДП, но и от их амплитудной и временной неравномерности, а также от степени заполненности РЛДП "блестящими точками". При этом неучет каких-либо из этих параметров может привести к существенным ошибкам в оценке качества обнаружения целей в СКИ (СШП) РЛС. Так, например, разность в оценке характеристик обнаружения одним и тем же обнаружителем двух целей, РЛДП которых имеет одинаковое количество «блестящих точек» (импульсов) и одинаковое значение максимальных амплитуд в импульсах, но отличающихся шириной (временной протяженностью) "блестящих точек", может составлять 3 дБ. Эта разность может быть еще больше, если "блестящие точки" в двух РЛДП отличаются не только по временной протяженности, но и значениями максимальных амплитуд. С учетом сказанного выше, задача оценки характеристик обнаружения отраженных от реальных целей СКИ (СШП) сигналов с помощью квазиоптимальных алгоритмов обнаружения СШП сигналов становится многопараметрической и ее параметричность возрастает с увеличением числа «блестящих точек» в РЛДП целей.

В целях снижения размерности задачи оценки характеристик обнаружения отраженных от реальных целей СКИ (СШП) сигналов необходимо свести все множество параметров РЛДП к ограниченному (не более двух) набору обобщенных (интегральных) параметров. При этом отличающиеся по структуре РЛДП целей, но имеющие одни и те же значения обобщенных параметров, должны иметь одни и те же характеристики обнаружения соответствующим обнаружителем. Для решения этой задачи с помощью разработанной математической

имитационной модели были проведены исследования по поиску обобщенных параметров РЛДП целей и определению зависимости характеристик их обнаружения указанными выше обнаружителями от этих обобщенных параметров.

В результате исследований были найдены следующие обобщенные параметры РЛДП: N – длина РЛДП, измеряемая в отсчетах дискретизации обрабатываемого сигнала, а также параметр S , вычисляемый по формуле:

$$S = \sum_{i=1}^N s_i \quad (2)$$

где: s_i – нормированные в соответствии с выражением (1) амплитуды отсчетов РЛДП. Значение параметра S в большинстве случаев лежит в пределах 2...9.

Ниже приведены зависимости характеристик обнаружения целей от обобщенных параметров их РЛДП для указанных выше обнаружителей. На графиках зависимостей используются следующие обозначения: q – отношение мощности сигнала к мощности шума на входе обнаружителя (в децибелах); D – вероятность правильного обнаружения; F – вероятность ложной тревоги; S и N – обобщенные параметры РЛДП.

На рис. 1 приведены характеристики обнаружения энергетическим обнаружителем целей с различными РЛДП в зависимости от параметров S и N для $F = 10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}, 10^{-6}$ и $D = 0,5$. Из рис. 1 видно, что при фиксированном параметре N уменьшение значения параметра S приводит к ухудшению качества обнаружения целей (требуется большее значение отношения сигнал/шум для достижения заданной вероятности правильного обнаружения). С другой стороны, при фиксированном значении параметра S увеличение значения параметра N также приводит к ухудшению качества обнаружения. Полученные результаты очевидны, учитывая особенность алгоритма работы ЭО: интегрирование всех отсчетов мощности (в том числе шумовых) в "скользящем" окне

дальности. Аналогичные зависимости наблюдаются при других значениях параметра N . С помощью линейной интерполяции (экстраполяции) графиков на рис. 1 для $N = 100$ и $N = 50$ можно построить аналогичные зависимости для других значений параметра N .

Для обнаружителя "по элементам" в ходе его исследований было выявлено, что лишь один обобщенный параметр (S) оказывает влияние на его характеристики обнаружения. Выявленные зависимости для $D = 0,5$ представлены на рис. 2. Полученные результаты очевидны, учитывая особенность алгоритма работы ОПЭ: ОПЭ не осуществляет накопление отсчетов в "скользящем" окне дальности и, следовательно, его характеристики обнаружения не должны зависеть от параметра N .

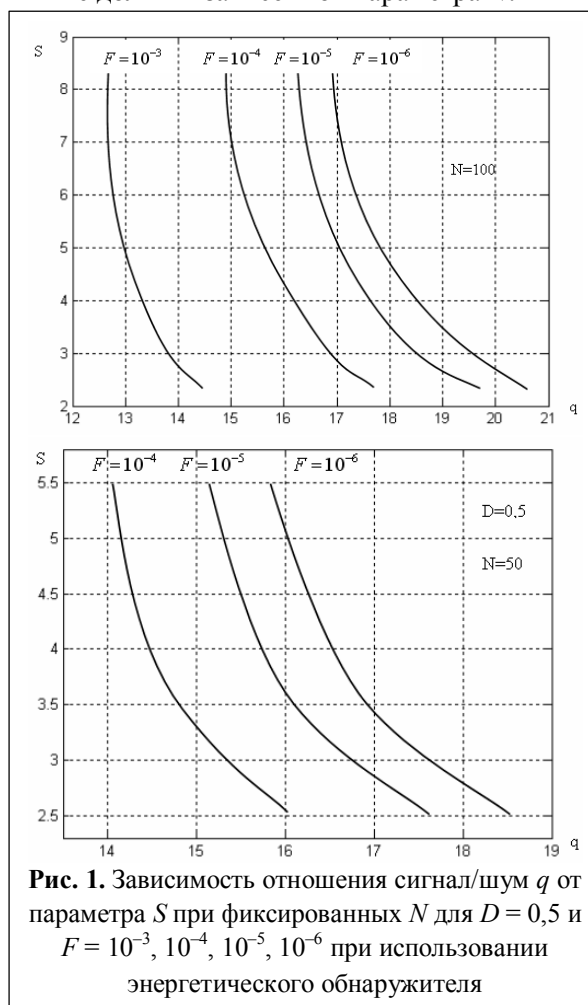


Рис. 1. Зависимость отношения сигнал/шум q от параметра S при фиксированных N для $D = 0,5$ и $F = 10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}, 10^{-6}$ при использовании энергетического обнаружителя

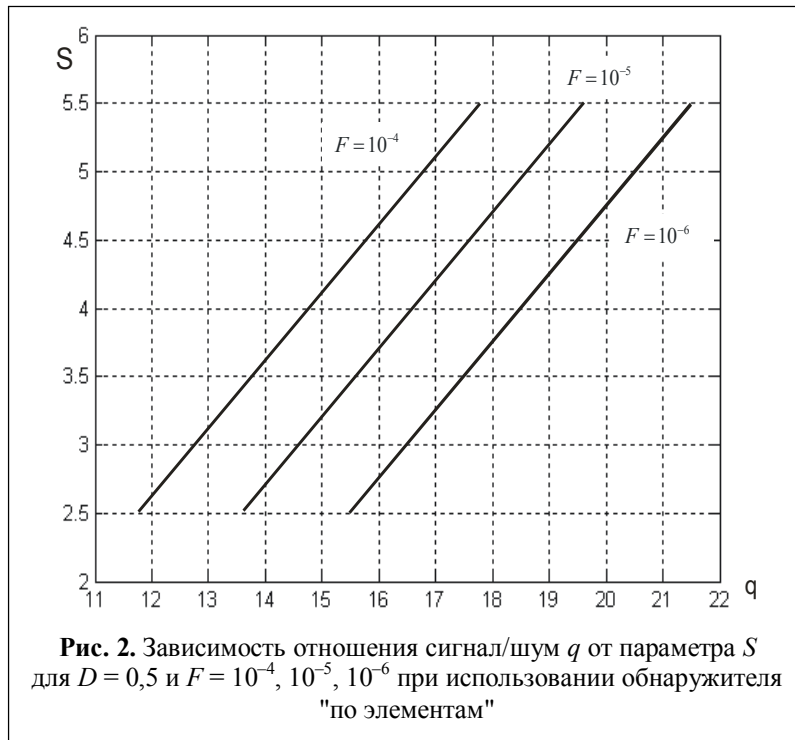


Рис. 2. Зависимость отношения сигнал/шум q от параметра S для $D = 0,5$ и $F = 10^{-4}, 10^{-5}, 10^{-6}$ при использовании обнаружителя "по элементам"

Исследования одноканальных ранговых обнаружителей показали, что их характеристики обнаружения зависят от параметров S и N . Характеристики обнаружения ОРО можно оценивать по характеристикам обнаружения ЭО и

ОПЭ. Действительно, ОПЭ представляет собой крайний случай реализации ОРО, т.е. ОРО с выбором одного максимального значения в окне (ОРО₁). ЭО представляет собой другой крайний случай реализации ОРО: ОРО с выбором N максимальных значений в окне размером N (ОРО _{N}). Таким образом, для оценки поведения характеристик обнаружения ОРО _{K} (где $N > K > 1$) необходимо нанести на общий рисунок кривые обнаружения ОПЭ и ЭО (для соответствующего фиксированного значения N). При этом графики кривых обнаружения ОРО _{K} ($N > K > 1$) должны проходить между кривыми обнаружения ОПЭ и ЭО. Справедливость этого вывода подтверждают зависимости рис. 3, полученные для ОРО _{K} в ходе вычислительных экспериментов.

Исследования многоканальных ранговых обнаружителей показали, что их характери-

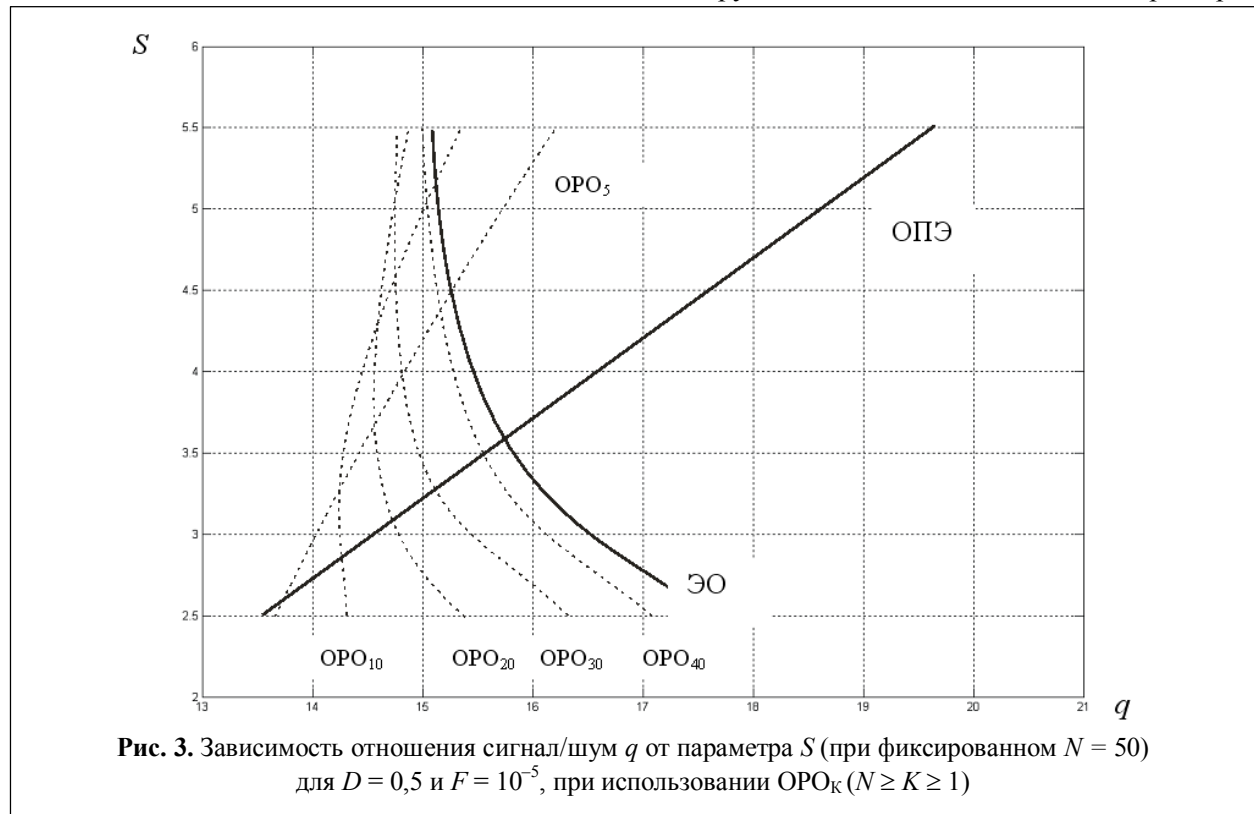


Рис. 3. Зависимость отношения сигнал/шум q от параметра S (при фиксированном $N = 50$) для $D = 0,5$ и $F = 10^{-5}$, при использовании ОРО _{K} ($N \geq K \geq 1$)

стики обнаружения также зависят от параметров S и N . При этом характеристики обнаружения МРО можно оценивать по соответствующим характеристикам обнаружения $ОРО_K$. Это следует из особенности алгоритма МРО: результат его обнаружения определяется лучшим результатом обнаружения в его каналах, представляющих собой $ОРО_K$. Исходя из этого характеристика обнаружения МРО представляет собой кривую, аппроксимирующую соответствующие кривые обнаружения $ОРО_K$ в области минимальных значений q . Справедливость этого вывода подтверждают зависимости, при-

обнаружения $ОРО_5$, $ОРО_{10}$, $ОРО_{20}$) с приемлемой для практических приложений точностью совпадает с характеристикой обнаружения МРО, полученной непосредственно по результатам его математического моделирования.

Исследования некогерентного ЧПКО (в случае реализации некогерентной обработки в ЧПКО) показали, что на характеристики обнаружения оказывают влияние два обобщенных параметра РЛДП: S и N . На рис. 6 (пунктирные линии) приведены графики зависимости характеристик обнаружения целей с различными РЛДП от обобщенных параметров S и N для

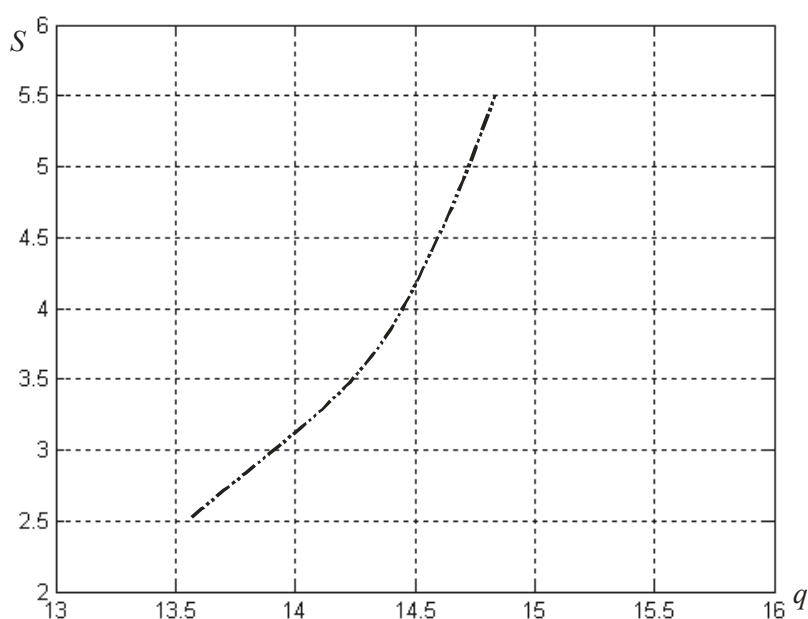


Рис. 4. Зависимость отношения сигнал/шум q от параметра S (при фиксированном $N = 50$) для $D = 0,5$ и $F = 10^{-5}$ при использовании МРО₃ с суммированием 5, 10 и 20 максимальных значений

веденные на рис. 4 и 5. Так, на рис. 4 приведена характеристика обнаружения, полученная в ходе вычислительных экспериментов для МРО_{5,10,20} с суммированием соответственно 5, 10, 20 максимальных значений в окне $N = 50$ при $D = 0,5$ и $F = 10^{-5}$. На рис. 5 показан способ построения этой же зависимости путем аппроксимации кривых обнаружения $ОРО_5$, $ОРО_{10}$, $ОРО_{20}$. Анализ рис. 4 и рис. 5 свидетельствует, что полученная указанным выше способом характеристика обнаружения МРО_{5,10,20} (на основе аппроксимации кривых

$D = 0,5$ и $F = 10^{-5}$. Как следует из этих графиков, характеристики обнаружения некогерентного ЧПКО ухудшаются как при увеличении параметра S (при фиксированном параметре N), так и при увеличении длины РЛДП (параметра N) при фиксированном параметре S .

Следовательно, наилучшие характеристики обнаружения некогерентным ЧПКО будут иметь цели с малыми радиальными размерами (параметр N) и РЛДП которых имеют малое значение параметра S .

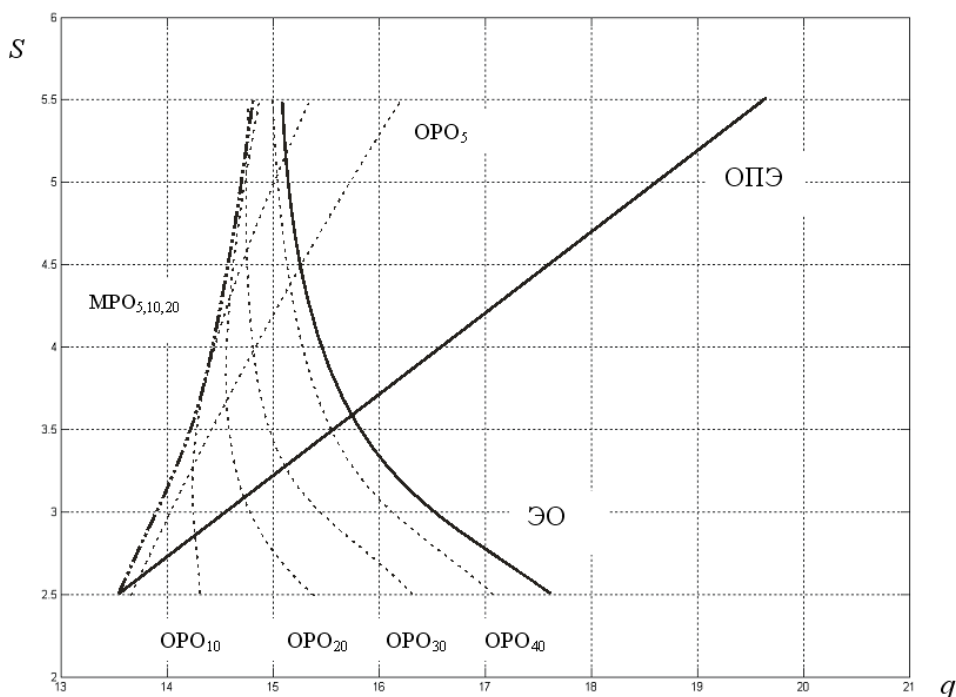


Рис. 5. Зависимость отношения сигнал/шум q от параметра S (при фиксированном $N = 50$) для $D = 0,5$ и $F = 10^{-5}$ при использовании $MPO_{5, 10, 20}$

В случае когерентного алгоритма ЧПКО единственным обобщенным параметром, влияющим на характеристики обнаружения, является длина РЛДП (параметр N). При увеличении длины РЛДП в два раза (с $N = 50$ до $N = 100$) характеристики обнаружения ухудшаются примерно на 1 дБ (рис. 6 сплошные ли-

нии). В то же время, характеристики обнаружения целей когерентным ЧПКО лучше по сравнению с некогерентным ЧПКО. Как следует из рис. 6, разница в характеристиках обнаружения когерентного и некогерентного ЧПКО в зависимости от значений параметров N и S составляет от 0,5 до 5 дБ. С помощью их

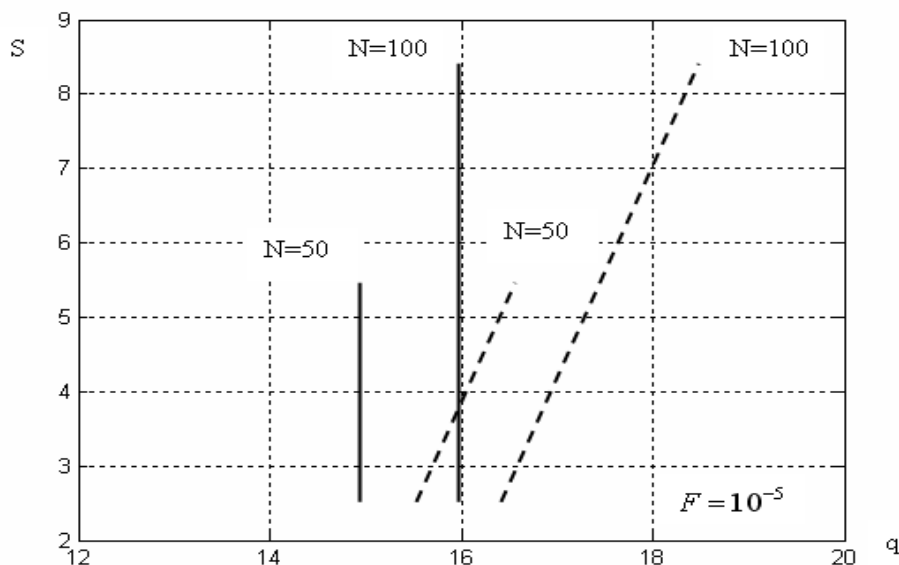


Рис. 6. Зависимость отношения сигнал/шум q от параметра S (при фиксированных N) для $F = 10^{-5}$ и $D = 0,5$ при использовании когерентного (сплошные линии) и некогерентного (пунктирные линии) ЧПКО

линейной интерполяции (экстраполяции) графиков на рис. 6 для $N = 100$ и $N = 50$ можно построить аналогичные зависимости для других значений параметра N .

Выводы:

1. Получены зависимости характеристик обнаружения целей от обобщенных параметров РЛДП, позволяющие по внешнему виду РЛДП конкретных целей оценивать характеристики их обнаружения указанными выше обнаружителями под различными ракурсами. Для этого необходимо располагать лишь банком РЛДП целей для соответствующих (выбранных к реализации в РЛС) диапазонов волн и ширины спектра зондирующего сигнала. Следует помнить, что для проведения оценок необходимо РЛДП "проградуировать" по времени (в периодах частоты дискретизации обрабатываемых в РЛС сигналов), а так же отнормировать по амплитуде в соответствии с выражением (1).

2. С помощью полученных зависимостей можно проводить выбор и обоснование наиболее рациональных вариантов построения обнаружителей для конкретных типов целей и параметров СКИ (СШП) РЛС. В частности, анализ указанных выше обнаружителей показывает, что в условиях априорной неопределенности структуры РЛДП целей наиболее приемлемыми для реализации в СКИ (СШП) РЛС являются следующие обнаружители: ЭО, ОПЭ, когерентный и некогерентный ЧПКО.

Литература

1. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. – М.: Радио и связь, 1983.
2. Ultra-wideband Radar Technology. Edited by James D. Taylor. CRC Press. Boca Raton, London, New York, Washington D.C. 2000.
3. Скосырев В.Н. Особенности и свойства сверхкороткоимпульсной локации. Конспект лекций (учебное пособие): Сверхширокополосные системы в радиолокации и связи. – Муром: Издательско-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2003.

Поступила 11 мая 2015 г.

English

Influence of target radar range image parameters on their detection properties by known detectors of ultra-wideband signals

Alexander Grigoryevich Kibirnichenko – Deputy general designer on science and air defense systems JSC DB Novator.

E-mail: main@okb-novator.ru.

Address: 620017, Yekaterinburg, Kosmonavtov Ave., 18.

Maxim Yuryevich Kudryashov – Candidate of physical and mathematical sciences 1 category programmer engineer JSC SPC Radio systems.

Andrey Alekseevich Hudanov – Candidate of Technical Sciences Senior research associate Deputy general director on science JSC SPC Radio systems.

E-mail: radiosys@list.ru.

Address: 170005, Tver, Afanasy Nikitin Embankment St., 32.

Abstract: The article's authors analyzed known detectors of ultra-wideband (very short-pulse) radio signals. It is shown that their detection properties are under influence of radar range image parameters (RRIP) of real targets. It is noted that so far only influence of "highlights" number in RRIP on detection properties of known detectors of ultra-wideband (UWB) signals was investigated. Along with this RRIP amplitude, time and phase patterns affect as well UWB signals detection properties.

It is demonstrated that ignoring these parameters can considerably to deteriorate target detection quality (by 3dB and more than that). At the same time taking into account of above named RRIP parameters impact on detection properties of known detectors results in multiparameter task and its parametricity increases with increase in "highlights" number in RRIP target. The article's authors propose to describe RRIP targets in generalized parameters to reduce problem order in detection of real targets reflected UWB signals. Dependences of target detection properties on generalized RRIP parameters were obtained which enable to evaluate target detection properties detection by the above named detectors in various aspects based on visual appearance of RRIP real targets.

For this it is necessary to have only RRIP targets pool bank for corresponding (selected for application in RS) band wave and bandwidth in sounding signal. Selection and justification of the most rational options for building detectors for specific target types and RS UWB parameters can be done via obtained dependences.

Key words: ultra-wideband signals, very short-pulse signals, ultra-wideband signals detectors, radar range images, ultra-wideband signals detection properties.

References

1. Tikhonov V. I. Optimum signals reception. - M.: Radio i svyaz, 1983.
2. Ultra-wideband Radar Technology. Edited by James D. Taylor. CRC Press. Boca Raton, London, New York, Washington D.C. 2000.
3. Skosyrev V. N. Features and properties of very short-pulse detection. Abstract of lectures (manual): Ultra-wideband systems in radar detection and communication. - Murom: Izdatelsko-poligrafichesky tsentr MI VIGU, 2003.