

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СИНХРОННЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ НА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ ШИРОКОПОЛОСНЫХ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ПРИЕМНИКОВ ИМПУЛЬСНЫХ РЭС С ШУМОВОЙ И ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ СИГНАЛОВ

К.А. ЛУКИН, В.М. КАНЦЕДАЛ

Приведены результаты сравнения оценок помехоустойчивости корреляционных приемников радиолокаторов, использующих последовательности коротких ЛЧМ и некоррелированных шумовых импульсов с широкими спектрами (с базой ~ 50) при воздействии двукратных синхронных импульсных помех с различной внутриимпульсной модуляцией, создаваемых группой РЭС в рабочем диапазоне частот. Уточнены с применением парного метода анализа ЭМС особенности маскирующего и имитирующего воздействия этих помех. Оценки порогов помехоустойчивости исследуемых приемников и результатов сравнения их помехоустойчивости получены с применением совокупности статистических показателей изменений формы взаимных корреляционных функций в условиях помех. Показано преимущество в помехоустойчивости корреляционного приемника шумовых импульсов при воздействии синхронных импульсных помех с широким спектром и внутриимпульсной ЛЧМ.

Ключевые слова: шумовой импульсный радиолокатор, широкополосный корреляционный приемник, помехоустойчивость, активная помеха.

ВВЕДЕНИЕ

Насыщенность пространства излучающими средствами приводит к затруднениям при выполнении требований территориального, частотного и временного разносов группы радиолокационных средств (РЭС). Это вызывает необходимость поиска методов, обеспечивающих электромагнитную совместимость (ЭМС) одновременной работы группы РЭС с перекрытием рабочих диапазонов частот. Одним из таких методов является применение шумовых сигналов с широкими спектрами [1, 2].

Оценка помехоустойчивости радиолокатора при воздействии взаимных помех является первым этапом анализа его ЭМС, суть которого состоит в выявлении методами парной или групповой оценки недопустимых взаимных помех, создаваемых РЭС группы [3, 4]. На практике выделяют наиболее сложные помеховые условия, основанные на априорном знании свойств излучений группы РЭС и предполагающие взаимодействие помех и полезного эхо-сигнала при совпадении или малых различиях их поляризационных, пространственных, временных и частотных параметров [4]. При этом решающую роль в оценке помехоустойчивости корреляционного приемника сигналов РЭС играет структурная селекция, характеризующаяся изменениями взаимно корреляционной функции (ВКФ).

Анализ влияния сигналоподобных взаимных помех группы РЭС на помехоустойчивость широкополосных корреляционных приемников шумового и ЛЧМ импульсных радиолокаторов, рассматриваемой в статье, является продолжением исследований характера и степени воздействия различных видов активных помех на форму ВКФ при использовании непрерывного и импульсного шумовых сигналов [5–7]. При этом синхронные импульсные помехи (СИП) с широкополосной внутриимпульсной модуляцией являются с точки

зрения радиоэлектронного подавления [8] энергетически выгодными и наиболее опасными помехами. Их сигналоподобная структура может породить большое число ложных выбросов ВКФ, которые без специальных мер защиты перегрузят систему извлечения радиолокационной информации. В то же время следует отметить важное преимущество шумового импульсного радиолокатора, которое состоит в неповторяемости формы его излучения от импульса к импульсу, что создает определенные трудности постановки ему имитирующих помех на периоде повторения зондирующих импульсов [1, 10]. Поэтому важно проанализировать воздействие маскирующих СИП. Особенности их воздействия, в отличие от непрерывных активных помех, заключаются в большем разнообразии их сосредоточенного по времени запаздывания (локального) воздействия на выходной сигнал корреляционного приемника, например, при накрытии помеховым импульсом полезного эхоимпульса и/или создание вокруг него «частотокола» помеховых импульсов. Тем самым, на выходе коррелятора формируются условия, затрудняющие однозначное выделение полезного выброса ВКФ и порождающие прохождение на дальнейшую обработку ложных выбросов ВКФ. Локальность воздействия СИП усложняет анализ ВКФ при извлечении радиолокационной информации, но в то же время создает свободные от их воздействия области интервала ожидаемых значений времени запаздывания. В этих областях имеется возможность дифференцированного задания порогов обнаружения при проверке различных гипотез об обнаруживаемых целях.

Особенностью воздействия СИП является также невозможность использования фильтрующего свойства межпериодного накопителя в корреляционном приемнике, в отличие от случая воздействия несинхронных и хаотических импульсных помех.

Целью работы является сравнительный анализ характера и степени воздействия имитирующих и маскирующих синхронных импульсных помех с различной внутриимпульсной модуляцией на широкополосные корреляционные приемники шумового и ЛЧМ импульсных радиолокаторов.

Следует также отметить, что выполненный в [10] сравнительный анализ технических характеристик корреляционных приемников шумовых и ЛЧМ сигналов не затрагивает количественных оценок помехоустойчивости таких приемников.

1. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Используется методика, которая предполагает вначале анализ характеристик входных и выходных сигналов, а также внутренних шумов исследуемых корреляционных приемников в отсутствие воздействия внешних активных помех. Затем для каждого вида сигнала осуществляется формирование заданных входных смесей сигнала, внутренних шумов и исследуемых видов помех, вычисление соответствующих оценок ВКФ в условиях воздействия этих помех и расчет статистических характеристик входных и выходных сигналов приемника. Полученные результаты подвергаются анализу с целью выявления характерных особенностей характера и степени изменений ВКФ под воздействием заданных видов помех, а также сравнения помехоустойчивости приемников. Методика учитывает вклад в оценку помехоустойчивости сигнальной составляющей ВКФ. Основное отличие рассматриваемой методики от изложенной в [5] состоит в применении компьютерной модели (рис. 1), формировании ее имитаторами различных видов внешних видов импульсных активных помех и создании более сложной сигнально-помеховой обстановки на входах корреляционных приемников.

При этом алгоритм корреляционной обработки описывается выражением

$$B(\tau) = \left| \sum_{m=1}^M \int_0^T [s_{\text{эхо}}(t - mT - \tau) + N_j(t) + n_{\text{эхо}}(t)] \times [s_{\text{оп}}(t - mT - \tau_i) + n_{\text{оп}}(t)] dt \right| / MT_i, \quad (1)$$

где $B(\tau)$ — оценка модуля ВКФ; $s_{\text{эхо}}(t)$ — принимаемые шумовые (ШИ) или ЛЧМ импульсы (ЛЧМИ), параметры которых приведены в табл. 1 на промежуточной частоте; T — период повторения зондирующих импульсов; m — номер периода; τ — время распространения зондирующего сигнала до цели и обратно; τ_i — дискретное время запаздывания опорного импульса $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$, устанавливаемое с помощью коррелятора; $s_{\text{оп}}(t)$ — опорный шумовой импульс; $n_{\text{эхо}}(t)$ и $n_{\text{оп}}(t)$ — внутренние шумы приемного и опорного каналов корреляционного приемника с прямоугольными амплитудно-частотными характеристиками; T_i — длительность импульса; M — количество импульсов в пачке, которое являлось в экспери-

менте переменным; $N_j(t), j=1-5$ — импульсная синхронная взаимная помеха j -го вида.

Данный алгоритм соответствует многоканальному коррелятору с квадратурной обработкой сигналов и когерентным межпериодным накоплением и является оптимальным для случая приема последовательности некоррелированных импульсов, отраженных неподвижной точечной целью, на фоне гауссовой помехи с равномерным спектром в полосе пропускания приемника.

При компьютерном моделировании рассматривалась группа РЭС, состоящая из исследуемых шумового и ЛЧМ импульсных радиолокаторов и других РЭС, которые создают корреляционным приемникам радиолокаторов имитирующие и маскирующие двукратные СИП с одинаковой импульсной мощностью, различной внутриимпульсной модуляцией и соотношением ширин равномерных спектров помех и сигналов $\Delta f_{N_j} / \Delta f_c = 1$. Набор мешающих имитирующих и маскирующих излучений группы РЭС и их дополнительные параметры представлены в табл. 2 на промежуточной частоте $f_{\text{оп}} = 118$ МГц. В указанных помехах первый импульс принимается одновременно с отраженным от одиночной точечной цели сигналом с периодом повторения $T_{\text{повт}}$, а второй — в условиях отсутствия отраженного сигнала в пределах заданного интервала времен запаздывания эхоимпульса $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$. Значения τ_{\min} и τ_{\max} в эксперименте выбираются на периоде $T_{\text{повт}}$ так, чтобы обеспечить вычисление и анализ оценки ВКФ, обусловленной принятой смесью эхоимпульса с первым импульсом СИП и ее вторым импульсом. Изменение входного отношения сигнал/помеха $(C/P)_{\text{вх}}$ осуществлялось за счет изменения интенсивности импульсной помехи при фиксированных значениях параметров полезных эхоимпульсов.

Маскирующие двукратные СИП при снижении $(C/P)_{\text{вх}}$ приводят на выходе корреляционного приемника к локальному на интервале $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$ маскирующему и/или имитирующему воздействиям в соответствии со структурой СИП.

Маскирующее воздействие вызывает только ухудшение качества полезной информации на выходе корреляционного приемника из-за искажения основного лепестка ВКФ и роста уровня ее боковых выбросов, создающих определенный импульсный фон при его однозначном выделении.

Имитирующее воздействие маскирующей двукратной СИП при дальнейшем снижении $(C/P)_{\text{вх}}$ формируется также локально на интервале $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$ в областях существования сигнальной и помеховой составляющих ВКФ.

Это воздействие вызывает, наряду с искажением полезной информации, появление ложной информации на выходе корреляционного приемника (ложные обнаружения и пропуски сигнала) из-за одновременного порогового ослабления и разрушения основного лепестка ВКФ, а

также неоднозначного его выделения при росте числа и уровней боковых выбросов, близких к уровню главного лепестка ВКФ

Имитирующие двукратные СИП характеризуются частичным или полным совпадением реализаций и близостью параметров мешающих импульсов и отраженного от точечной цели сигнала на входе корреляционного приемника, а также формированием на интервале $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$ в соответствии со структурой СИП оценок $B(\tau)$, подобной полезной. Имитирующая помеха не содержит на уровне сигнальной обработки отличительных признаков и вносит в выходной сигнал ложную информацию практически при любых значениях $(C/P)_{\text{вх}}$ (вплоть до значений, когда имитирующее воздействие не превышает порога обнаружения, обычно устанавливаемого в условиях маскирующего воздействия помех). Заметим, что рассмотрение возможности постановки имитирующих взаимных помех шумовой РЛС является больше модельной, чем практической задачей.

Наиболее опасной помехой считается та помеха, применение которой ведет к максимальному изменению полезной информации.

В методике используется совокупность показателей помехоустойчивости корреляционного приемника [5], характеризующих характер и степень изменений формы ВКФ в условиях воздействия заданных видов помех при наблюдении точечной неподвижной цели в различных областях интервала $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$. Данный интервал разбит на 4 смежные области, являющиеся характерными: 1) высокой корреляции $[\tau_{\text{и}}, \tau_{\text{и}} + \Delta\tau/2]$, где $\tau_{\text{и}}$ — время запаздывания от цели, $\Delta\tau = 1/\Delta f_c$ — ширина интервала корреляции; 2) ближних боковых лепестков (от границы интервала корреляции до времени запаздывания, равного 10 интервалам корреляции); 3) дальних боковых лепестков ВКФ (от дальней границы области 2 до конца области существования сигнальной составляющей ВКФ); 4) выбросов только помеховой составляющей ВКФ (от границы области существования сигнальной составляющей до границы интервала $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$).

Показатели для области основного лепестка ВКФ:

– $(C/P)_{\text{вх}}$ — оценка входного отношения сигнал/помеха как квадрат отношения усреднен-

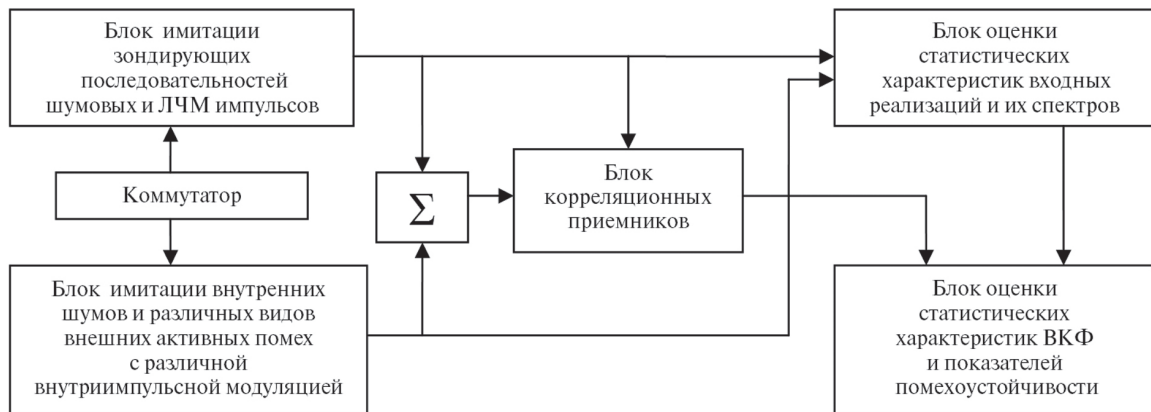


Рис. 1. Блок-схема компьютерной модели оценки помехоустойчивости корреляционных приемников шумового и ЛЧМ импульсных радиолокаторов в условиях воздействия импульсных взаимных помех

Таблица 1

Вид и параметры зондирующего сигнала

Вид внутриимпульсной модуляции зондирующего сигнала	Средняя частота спектра f_{0c} , МГц	Ширина спектра Δf_c , МГц	Длительность импульса $T_{\text{и}}$, нс	Период повторения импульсов $T_{\text{повт}}$, нс	База импульса $\Delta f_c T_{\text{и}}$
Шумовая или ЛЧМ	118	236	200	2250	~50

Таблица 2

Вид и параметры помехи

Тип РЭС	Вид помехи и внутриимпульсной модуляции	Длительность импульса $T_{\text{и}}$, нс	Взаимный временной сдвиг импульсов двукратной СИП Δt , нс
РЭС 1	N_1 — СИП ЛЧМ1 имитирующая	200	1000
РЭС 2	N_2 — СИП шумовая имитирующая	200	1000
РЭС 3	N_3 — СИП ЛЧМ1	400	1200
РЭС 4	N_4 — СИП шумовая	200	1000
РЭС 5	N_5 — СИП ЛЧМ2	200	1000

ного максимального значения \bar{B}_{\max} (область 1) к среднеквадратичному уровню $\text{СКУ}_{\text{пом}}$ выбросов помеховой составляющей ВКФ (область 4);

– $K_{\text{под}}$ — коэффициент подавления помехи, равный отношению $(C/P)_{\text{вых}}$ к входному отношению $(C/P)_{\text{вх}}$ при неизменном зондирующем сигнале (без учета множителя $1/\Delta f_c T_n$);

Показатели для областей вне основного лепестка ВКФ:

– $\bar{B}_{\max}/\bar{B}_{\text{бл max}}$ — отношение усредненных максимальных значений основного лепестка и близких боковых выбросов ВКФ (область 2);

– $\bar{B}_{\max}/\text{СКУ}_{\text{бок}}$ — отношение усредненного максимального значения основного лепестка к среднеквадратичному уровню дальних боковых выбросов ВКФ в области ее сигнальной составляющей (область 3);

– $\bar{B}_{\max}/\text{СКУ}_{\text{пом}}$ — отношение усредненного максимального значения основного лепестка к среднеквадратичному уровню выбросов помеховой составляющей ВКФ (область 4).

Для характеристики устойчивости корреляционного приема к имитирующему воздействию заданной маскирующей помехи используется понятие порога помехоустойчивости [9, 11] в виде защитного значения $(C/P)_{\text{вх, пор}}$, при котором начинается проявление ее имитирующего воздействия на ВКФ. Методика позволяет исследовать зависимости порога помехоустойчивости от вида помехи, соотношений ее параметров с параметрами полезного сигнала при известном количестве периодов накопления M . Сравнение помехоустойчивости рассматриваемых корреляционных приемников проводится на основе сравнения характеров и представленных выше показателей изменений ВКФ при воздействии заданного вида помехи с известными соотношениями ее параметров с параметрами сигналов, а также порогов их помехоустойчивости.

2. ХАРАКТЕР ИЗМЕНЕНИЙ ВЗАИМНО КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОМЕХ

При рассмотрении воздействий заградительных по частоте видов СИП на характер изменений ВКФ должно быть принято во внимание, что:

– эти помехи обладают в соответствии с информационным критерием значительной энтропией (неопределенностью) и являются опасными с точки зрения радиоэлектронного подавления (РЭП) [8];

– процедура обработки эхоимпульса (1) остается оптимальной (с точки зрения обеспечения максимума выходного отношения сигнал/помеха [9]). Но при этом в заданных для анализа ВКФ областях 1–4 интервала $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$ наблюдается их разнообразное воздействие на ВКФ. Разнообразие характеров поведения выбросов $B(\tau)$ при воздействии СИП $N_j(t)$, $j=1-5$ определяется структурой помехи (числом импуль-

сов, их взаимным запаздыванием на интервале $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$, различиями между видами и параметрами воздействующих импульсных помех, между помехами и полезными сигналами, принадлежностью боковых выбросов $B(\tau)$ к областям 2, 3, 4 на интервале $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$ и наличием имитирующего или маскирующего их воздействия.

Спектрально-временные параметры реализаций маскирующих СИП (табл. 1) намеренно выбраны близкими к аналогичным параметрам последовательностей полезных эхоимпульсов для того, чтобы показать различный характер проявления имитирующих и маскирующих помех и оценить предельную помехоустойчивость исследуемых широкополосных корреляторов.

В табл. 3 выборочно представлены характерные оценки $B(\tau)$ при приеме последовательностей ШИ и ЛЧМИ и помех $N_1 - N_5$ на интервале $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$ (столбцы 1 и 3) и в области существования ее сигнальной составляющей (столбец 2) для указанных отношений $(C/P)_{\text{вх}}$ и количества накапливаемых импульсов M .

Сравнение характеров поведения $B(\tau)$ при воздействии имитирующих помех N_1 (табл. 2, строка 1), N_2 (табл. 2, строка 2) и входном отношении $(C/P)_{\text{вх}} = 11,3$ дБ показал, что эти помехи вызывают в этих приемниках искажения сигнальной составляющей ВКФ при накрытии первым импульсом помехи полезного эхоимпульса с временем запаздывания $\tau_1 = \tau_n$, а также имитацию вторым импульсом с временем запаздывания $\tau_2 = \tau_1 + \Delta t$ ложного корреляционного выброса, подобного полезному. Смещение первого имитирующего импульса относительно τ_n больше чем на $\Delta\tau$ также вызовет появление ложного выброса $B(\tau)$.

Воздействие двукратной маскирующей СИП ЛЧМ1 N_3 на приемник ЛЧМ РЛС (табл. 2, строка 3) отличается от воздействия имитирующей помехи N_1 не только значением $(C/P)_{\text{вх}} = -10$ дБ, но и меньшей скоростью перестройки частоты ЛЧМ, что сказывается на характере воздействия помехи. Сравнение локальных на интервале $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$ воздействий помех СИП ЛЧМ1 N_3 и СИП шумовая N_4 (табл. 2, строка 4) на приемник ЛЧМИ показывает более сильное влияние помехи N_3 в областях боковых выбросов ВКФ без возможности уменьшения их при увеличении количества накапливаемых импульсов M .

Воздействие маскирующей СИП ЛЧМ1 N_3 на приемник ЛЧМИ (табл. 2, строка 3) отличается от воздействия имитирующей помехи N_1 не только значением $(C/P)_{\text{вх}} = -10$ дБ, но и меньшей скоростью перестройки частоты ЛЧМ, что сказывается на характере воздействия помехи. Сравнение локальных на интервале $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$ воздействий помех СИП ЛЧМ1 N_3 и СИП шумовая N_4 (табл. 2, строка 4) на приемник ЛЧМ РЛС показывает более сильное влияние помехи N_3 в областях боковых выбросов ВКФ без возможности уменьшения их при увеличении количества импульсов накопления M .

Рост боковых выбросов вызывает ложные обнаружения, а также пропуски сигнала за счет ослабления основного лепестка ВКФ под действием помех. Учитывая особую важность влияния на помехоустойчивость приемника боковых выбросов ВКФ в области существования ее сигнальной составляющей, показан характер их влияния на форму ВКФ под воздействием помех. При снижении входного отношения сигнал–помеха до значений $(C/P)_{вх} < 1$ изменение их уровней характеризуется переходом от маскирующего воздействия помехи к имитирующему, а их форма определяется помеховой составляющей ВКФ – видом и параметрами помехи. Так,

отметим наличие пьедестала с постоянным уровнем для боковых выбросов при воздействии СИП ЛЧМ1. Боковые выбросы ВКФ совпадают по форме с ее основным выбросом вследствие равенства ширин спектров СИП и зондирующих импульсов.

Для реализации преимуществ использования рассматриваемого вида шумового сигнала, можно применять уплотненную последовательность с коротким периодом повторения зондирующих импульсов, учитывая статистическую независимость шумовых импульсов в последовательности и возможность устранения неоднозначности измерения дальности при этом.

Таблица 3

Оценки ВКФ при воздействии двукратных СИП

		$M = 5$		$M = 125$
		1	2	3
$(C/P)_{вх} = 11,3$ дБ	ЛЧМИ – N_1			
$(C/P)_{вх} = 11,3$ дБ	ШИ – N_2			
$(C/P)_{вх} = -10$ дБ	ЛЧМИ – N_3			
$(C/P)_{вх} = -10$ дБ	ЛЧМИ – N_4			
$(C/P)_{вх} = -10$ дБ	ШИ – N_5			
$(C/P)_{вх} = -10$ дБ	ШИ – N_4			

3. ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ

3.1. Воздействие маскирующих помех. Рассчитанные по ВКФ зависимости показателей помехоустойчивости исследуемых корреляционных приемников шумовых и ЛЧМ импульсов от вида и параметров сигналов и маскирующих СИП $N_3 - N_5$, $(C/P)_{\text{вх}}$ при $M = 125$, $M = 5$ представлены на рис. 2, 3 для области высокой корреляции ВКФ и для областей 2 – 4 на интервале $[\tau_{\text{min}}, \tau_{\text{max}}]$ – на рис. 4, а и 4, б.

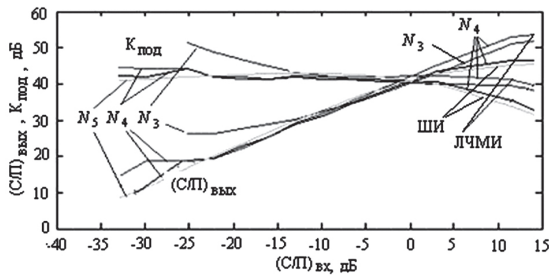


Рис. 2. Зависимости показателей помехоустойчивости корреляционных приемников шумовых и ЛЧМ импульсов в области основного лепестка ВКФ от $(C/P)_{\text{вх}}$ при $M = 125$ и воздействии рассматриваемых видов двукратных синхронных импульсных помех $N_3 - N_5$

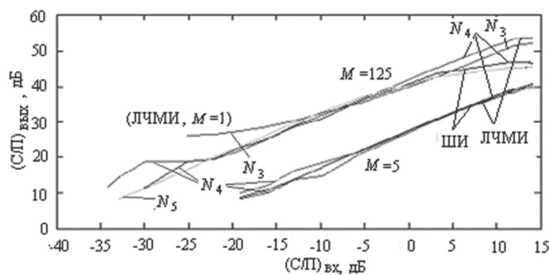


Рис. 3. Зависимости выходного отношения сигнал/помеха корреляционных приемников шумовых и ЛЧМ импульсов от $(C/P)_{\text{вх}}$ при $M = 5$, $M = 125$ и воздействии рассматриваемых видов двукратных синхронных импульсных помех $N_3 - N_5$

Результаты анализа изменений формы ВКФ в области высокой корреляции, значений показателей помехоустойчивости для двух видов корреляционных приемников при воздействии помех $N_3 - N_5$, показали наличие областей устойчивости формы основных лепестков при уменьшении $(C/P)_{\text{вх}}$ до значений $\sim (0 - 5)$ дБ для приемника ШИ и 10 дБ для приемника ЛЧМИ. При дальнейшем уменьшении $(C/P)_{\text{вх}}$ наблюдается практически одинаковое линейное уменьшение показателей $(C/P)_{\text{вх}}$ с сохранением формы основных лепестков и стабилизация поведения коэффициентов подавления помехи $K_{\text{под}}$, независимо от указанных видов помех. Подавление основных лепестков ВКФ в этом случае происходит при значениях $(C/P)_{\text{вх}}$ около -30 дБ. При этом увеличение числа периодов накопления с $M = 5$ до $M = 125$ улучшает отношение $(C/P)_{\text{вых}}$ для семейства кривых, смещая его вверх и влево примерно на 15 дБ (рис. 2). Исключение составляет поведение по-

казателей $(C/P)_{\text{вых}}$ и $K_{\text{под}}$ при воздействии СИП ЛЧМ1– N_3 на приемник ЛЧМИ. Так, изменение $(C/P)_{\text{вых}}$ не зависит от M , а разрушение формы основного лепестка $B(\tau)$ происходит при уменьшении $(C/P)_{\text{вх}}$ до значения -12 дБ.

Поведение боковых выбросов $B(\tau)$ на интервале $[\tau_{\text{min}}, \tau_{\text{max}}]$ связано с локальным и различным характером поведения боковых лепестков в обл. 2, 3 и 4, интервала $[\tau_{\text{min}}, \tau_{\text{max}}]$ в виде маскирующего и имитирующего воздействий.

Маскирующее воздействие N_4 , N_5 на приемник ШИ (рис. 4, а) и N_4 на приемник ЛЧМИ (рис. 4, б) описывается областями устойчивости уровней боковых выбросов ВКФ с малыми изменениями отношений $\bar{B}_{\text{max}}/\bar{B}_{l, \text{max}}$; $\bar{B}_{\text{max}}/\text{СКУ}_{\text{бок}}$ (рис. 4, кривые $N_j - 2$ для обл. 2 и $N_j - 3$ для обл. 3) и существенным уменьшением $\bar{B}_{\text{max}}/\text{СКУ}_{\text{пом}}$ (рис. 4, кривые $N_j - 4$ для обл. 4) при уменьшении $(C/P)_{\text{вх}}$. Это воздействие практически не зависит от вида этих помех и имеет место при $(C/P)_{\text{вх}} > -15$ дБ и $M = 125$ для приемника ШИ и $(C/P)_{\text{вх}} > -5$ дБ для приемника ЛЧМИ.

Проявление имитирующего воздействия помех при дальнейшем снижении $(C/P)_{\text{вх}}$, характер его развития зависит не только от вида принимаемого сигнала, но и вида воздействующей помехи. На кривых $\bar{B}_{\text{max}}/\text{СКУ}_{\text{бок}}$ от $(C/P)_{\text{вх}}$ для $N_4 - 3$, $N_5 - 3$ можно выделить две характерные точки. Первая определяется окончанием пологого участка и характеризует начало проявления имитирующего эффекта помех. Вторая находится в точках слияния кривых для областей 3, 4 и свидетельствует об уменьшении роли сигнальной составляющей ВКФ для области 3. С этого момента наблюдается их последующий спад с приблизительно одинаковой крутизной, учитывая встречный характер изменений основного лепестка и боковых выбросов ВКФ. Для определения условий гарантированного начала порогового проявления имитирующего действия для каждого из рассматриваемых видов помех могут служить точки слияния зависимостей показателей $\bar{B}_{\text{max}}/\text{СКУ}_{\text{пом}}$ и $\bar{B}_{\text{max}}/\text{СКУ}_{\text{бок}}$. Эти условия выполняются при $M = 125$ и снижении $(C/P)_{\text{вх}}$ до значений: -15 дБ для приемника ШИ при воздействии N_4 , N_5 и -5 дБ для приемника с ЛЧМИ при воздействии N_4 . Этими значениями $(C/P)_{\text{вх}}$ при $M = 125$ практически определяются пороги помехоустойчивости $(C/P)_{\text{вх, пор}}$ исследуемых корреляционных приемников [5, 7, 9] при воздействии рассмотренных видов СИП. Уменьшение показателей $\bar{B}_{\text{max}}/\bar{B}_{\text{бл, max}}$ (кривые обл. 2) до значений, при которых подавляется основной лепесток ВКФ, уточняет значения $(C/P)_{\text{вх}}$, определяющих крутизны порогового проявления имитирующего воздействия помех.

При воздействии детерминированной СИП ЛЧМ1 N_3 на приемник ЛЧМИ наблюдалась особенность, состоящая в крутом изменении показателей помехоустойчивости для областей 2–3 при

Таблица 4

Пороги помехоустойчивости

Вид СИП	(С/П) _{вх} , дБ			
	Прием ШИ		Прием ЛЧМИ	
	Нач., (С/П) _{вх пор}	Кон.	Нач., (С/П) _{вх пор}	Кон.
N_3			5	-25
N_4	-15	-30	-5	-30
N_5	-15	-30		

уменьшении $(С/П)_{вх}$. Характер этих изменений похож на изменение показателя $\bar{B}_{max} / SKU_{пом}$ ($N_3 - 4$) и не зависит от изменения M (табл. 2, строка 3). Кривые $\bar{B}_{max} / SKU_{пом}$, $\bar{B}_{max} / SKU_{бок}$ и $\bar{B}_{max} / \bar{B}_{бл max}$ ($N_3 - 2$) изменяются, не пересекаясь в отличие от их поведения для предыдущих случаев, когда применялись либо шумовой сигнал, либо СИП с шумовым заполнением. В этом случае начало проявления имитирующего воздействия можно фиксировать точками окончания участка более пологого изменения $\bar{B}_{max} / \bar{B}_{бл max}$ (кривая $N_3 - 2$) при $(С/П)_{вх} \gg 1$ и начал участков наибольшей схожести изменений показателей $\bar{B}_{max} / SKU_{бок}$ и $\bar{B}_{max} / \bar{B}_{бл max}$. Порог помехоустойчивости в этом случае имеет значение около $(С/П)_{вх} = 5$ дБ.

На практике нормальное функционирование корреляционных приемников предполагает отсутствие проявления имитирующего воздействия маскирующих СИП. Экспериментальные оценки порогов помехоустойчивости $(С/П)_{вх}$ (N_j , вид сигнала) при $M=125$, и значений $(С/П)_{вх}$, при которых подавляется основной лепесток $B(\tau)$, — начала и конца проявления имитирующего воздействия помех, характеризующих его крутизну, приведены в табл. 4. Пороги помехоустойчивости корреляционного приемника шумовой импульсной РЛС характеризуются существенно более низкими значениями $(С/П)_{вх}$ (N_j), чем у корреляционного приемника РЛС с ЛЧМИ, при воздействии взаимных маскирующих двукратных СИП $N_3 - N_5$, и могут быть улучшены за счет увеличения количества периодов накопления M .

В отличие от этого, характер воздействия детерминированной маскирующей импульсной помехи с широким спектром на выходной сигнал корреляционного приемника РЛС с ЛЧМ импульсами не зависит от увеличения числа M , что определяет его проигрыш в помехоустойчивости для этой помеховой ситуации в сравнении с корреляционным приемником шумовой импульсной РЛС при значении $M = 125$.

Воздействие имитирующих помех. Количество ложных выбросов ВКФ, формируемых имитирующими СИП, их расположение на интервале $[\tau_{min}, \tau_{max}]$ определяется числом и взаимным запаздыванием импульсов в структуре помехи. Ниже показана возможность применения используемых выше показателей помехоустойчивости для оценки помехоустойчивости исследуемых корреляционных приемников в рассматриваемом частном случае воздействия имитирующих СИП N_1 и N_2 (табл. 3, строки 1 и 2). В табл. 5 представлена оценка показателей степени искажений сигнальной составляющей ВКФ в ЛЧМ импульсной РЛС при воздействии первого импульса двукратной имитирующей СИП N_1 с временем запаздывания $\tau_1 = \tau_и$ для указанных значений $(С/П)_{вх}$ и M .

Таблица 5

Показатели помехоустойчивости приемника ЛЧМИ

M	Показатели помехоустойчивости	$(С/П)_{вх}$, дБ		
		11,3	-10	-16
5, 125	$(С/П)_{вых}$, дБ	23,3	23,1	22
	$K_{под}$, дБ	34,6	33,2	38
	$\bar{B}_{max} / \bar{B}_{бл max}$	6	5,9	6
	$\bar{B}_{max} / SKU_{бок}$	107	107	107,3
	$\bar{B}_{max} / SKU_{пом}$	54	14,4	12,7

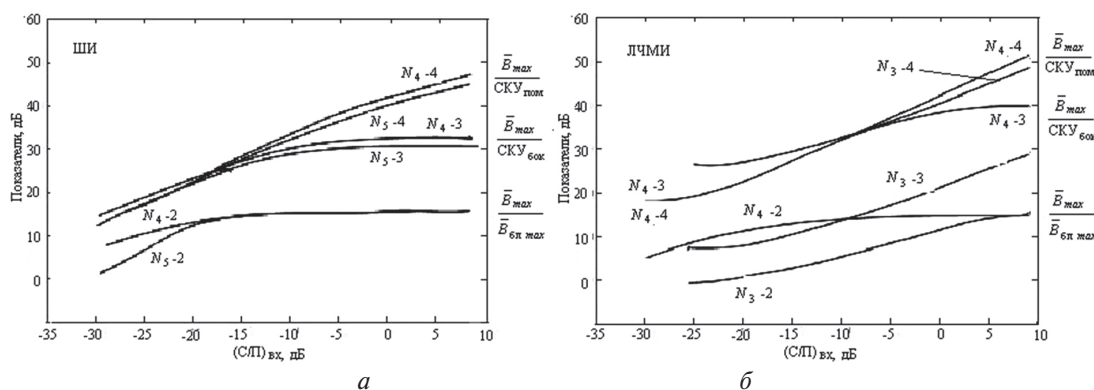


Рис. 4. Зависимости показателей помехоустойчивости корреляционных приемников шумовых (рис. 4, а) и ЛЧМ (рис. 4, б) импульсов, характеризующих боковые выбросы ВКФ в области: 2 – ближних, 3 – дальних выбросов и 4 – выбросов ее помеховой составляющей от $(С/П)_{вх}$ при $M = 125$ и воздействии рассматриваемых видов двукратных синхронных импульсных помех $N_3 - N_5$

Показатели $(C/P)_{\text{вых}}$, $K_{\text{под}}$, $\bar{B}_{\text{max}}/СКУ_{\text{пом}}$ в этом случае зависят от $(C/P)_{\text{вх}}$ и не зависят от значения M . Показатели $\bar{B}_{\text{max}}/\bar{B}_{\text{бл max}}$, $\bar{B}_{\text{max}}/СКУ_{\text{бок}}$ не зависят от изменения значений $(C/P)_{\text{вх}}$ и M .

Аналогичные показатели помехоустойчивости при воздействии двукратной имитирующей СИП N_2 на выход корреляционного приемника шумовой импульсной РЛС приведены в табл. 6.

Таблица 6

Показатели помехоустойчивости приемника ШИ

M	Показатели помехоустойчивости	$(C/P)_{\text{вх}}$, дБ		
		11,3	- 10	- 16
5	$(C/P)_{\text{вых}}$, дБ	22,1	22,4	21,2
	$K_{\text{под}}$, дБ	33,5	32,4	37,3
	$\bar{B}_{\text{max}}/\bar{B}_{\text{бл max}}$	4,5	4,5	4,5
	$\bar{B}_{\text{max}}/СКУ_{\text{бок}}$	22,6	23,3	23,5
	$\bar{B}_{\text{max}}/СКУ_{\text{пом}}$	47	13,2	11,5
125	$(C/P)_{\text{вых}}$, дБ	23	23	22
	$K_{\text{под}}$, дБ	34,3	33	38
	$\bar{B}_{\text{max}}/\bar{B}_{\text{бл max}}$	5,6	5,7	5,7
	$\bar{B}_{\text{max}}/СКУ_{\text{бок}}$	42	47	48
	$\bar{B}_{\text{max}}/СКУ_{\text{пом}}$	52	14,3	12,5

Показатели $(C/P)_{\text{вых}}$, $K_{\text{под}}$, $\bar{B}_{\text{max}}/СКУ_{\text{пом}}$ в данном случае зависят от $(C/P)_{\text{вх}}$ и M . Показатели $\bar{B}_{\text{max}}/\bar{B}_{\text{бл max}}$, $\bar{B}_{\text{max}}/СКУ_{\text{бок}}$ не зависят от изменения значений $(C/P)_{\text{вх}}$, но растут при увеличении M .

ВЫВОДЫ

1. Выполнен на основе выбранной совокупности показателей помехоустойчивости широкополосного корреляционного приемника импульсных шумовой и ЛЧМ РЛС анализ оценок ВКФ в условиях воздействия сигналоподобных двукратных синхронных импульсных помех (СИП) с различной внутриимпульсной модуляцией. Получены графики ВКФ и зависимостей совокупности показателей помехоустойчивости, которые характеризуют характер и степень изменения ВКФ в различных областях ее существования на интервале ожидаемых времен запаздывания в зависимости от сочетания видов полезных сигналов и СИП, а также отношений их параметров.

2. Показан выигрыш в помехоустойчивости исследуемого корреляционного приемника шумовых импульсов в условиях воздействия рассмотренных видов маскирующих СИП: более широкие интервалы значений входного отношения сигнал–помеха с устойчивой формой основного лепестка ВКФ (на 5 – 10 дБ) и устойчивым уровнем ее боковых выбросов (на ~ 10 дБ), независимо от вида СИП (рис. 1–3); более низкие

значения порогов помехоустойчивости (табл. 4); возможность улучшения показателей помехоустойчивости за счет увеличения количества периодов накопления. Наибольший выигрыш достигается в области боковых выбросов при воздействии СИП с широкополосной внутриимпульсной ЛЧМ вследствие особенности характера ее воздействия и независимости его и соответствующих показателей помехоустойчивости от количества периодов накопления. Области устойчивости формы ВКФ при воздействии данной СИП на приемник ЛЧМ импульсов отсутствуют.

3. Количественно оценен и детально проанализирован разнообразный и существенный вклад боковых выбросов ВКФ в определение помехоустойчивости рассматриваемых приемников. Разнообразие характера встречного изменения основного и боковых выбросов ВКФ, локального поведения боковых выбросов в различных областях интервала $[\tau_{\text{min}}, \tau_{\text{max}}]$ при воздействии рассматриваемых СИП зависит от их структуры и вида внутриимпульсной модуляции, вида полезного сигнала, соотношений параметров импульсов помехи и сигнала и количества накапливаемых импульсов. Получены значения порогов помехоустойчивости исследуемых корреляционных приемников, которые характеризуются следующими значениями входного отношения сигнал–помеха (при числе периодов накопления 125): –15 дБ при воздействии помех СИП шумовая (N_4) и СИП ЛЧМ1 (N_3) в случае приема шумового сигнала; 5 дБ и –5 дБ при приеме смесей ЛЧМ сигнала и СИП ЛЧМ2 (N_5), N_4 , соответственно. Подавление основного лепестка наблюдалось при различном характере имитирующего влияния помех для значений входного отношения сигнал–помеха: –30 дБ при приеме шумового сигнала и помехи N_4 или N_3 ; –25 дБ и –30 дБ при приеме смесей ЛЧМ сигнала и помех N_5 , N_4 , соответственно.

4. Для реализации преимуществ рассматриваемого вида шумового сигнала, целесообразно уплотненную последовательность зондирующих импульсов с коротким периодом повторения, учитывая их статистическую независимость и возможность устранения неоднозначности измерения дальности при этом.

5. Показана возможность применения предложенной совокупности показателей помехоустойчивости при воздействии имитирующих СИП. При этом отмечается зависимость показателей изменений ВКФ для области основного лепестка и независимость показателей для области существования боковых лепестков ее сигнальной составляющей от изменения входного отношения сигнал–помеха. Только показатели помехоустойчивости корреляционного приемника шумового импульсного сигнала зависят от изменения количества накапливаемых импульсов и при его увеличении улучшаются.

Используемая методика оценки помехоустойчивости и полученные результаты могут быть использованы при анализе ЭМС совместно функционирующих в произвольных диапазонах длин волн шумовых и ЛЧМ импульсных радиолокаторов.

Авторы выражают благодарность канд. физ.-мат. наук В.В. Кулику за помощь и обсуждение результатов работы.

Литература

- [1] Лукин К. А. Шумовая радарная технология / К. А. Лукин // Радиофизика и электроника: сб. науч. трудов. — Харьков: ИРЭ НАНУ, 1999. — Т. 4, № 3. — С. 105–111.
- [2] Винокуров В.И. и др. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных устройств. Л., Судостроение, 1986.
- [3] Теория и методы электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств. Под ред Ю.А. Феоктистова. — М., Радио и связь, 1988. — 216 с.
- [4] Kantsedal V.M. Estimation of Mutual Interferences at the Receiver Input of Noise radars Operating Simultaneously as Electronic Facility Group. Proceedings of International Radar Symposium IRS 2006, 24 - 26 May, Krakow, Poland, pp. 565–568.
- [5] Лукин К.А., Канцедал В.М., Кулик В.В., Коновалов В.М., Могила А.А., Паламарчук В.П., Сущенко П.Г. Экспериментальная оценка помехоустойчивости шумового импульсного радиолокатора ближнего действия в условиях воздействия непрерывных активных помех // Радиофизика и электроника— Харьков: ИРЭ НАНУ, 2011. — Т. 2 (16), № 2. — С. 77–89.
- [6] Lukin K.A., Kantsedal V.M., Kulyk V.V., Konovalov V.M., Suschenko P.G. Results of Computer Imitation Modeling of Immunity of Correlator Affected by Active Continues Interferences at the Processing of Wideband Noise or LFM Sequences of Pulses. MSMW'07, Symposium Proceeding. — Kharkov, Ukraine, June 25 - 30, 2007, Vol. 1. — P. 487–489.
- [7] Lukin K.A., Mogyla A.A., Kovalenko N.P. and R.P. Kovalenko. Comparative study of SAR image generation using liner FM and Noise waveforms // Proceedings 4th European Conference on Synthetic Aperture Radar, 4-6 June 2002, Cologne, Germany. — P. 511–514.
- [8] Вакин С.А., Шустов Л.Н. Основы радиопротиводействия и радиотехнической разведки. — М.: Сов. радио, 1968. — 448 с.
- [9] Радиотехнические системы. Ю.П. Гришин, В.П. Ипатов, Ю.М. Казаринов и др. Под ред. Ю.М. Казаринова. — М.: Высш. шк., 1990. — 496 с.
- [10] A. G. Stove. Using Noise Modulation in Practical Radar Systems - Including a Comparison. with FMCW Modulation // Proceedings of II-th International Radar Symposium IRS-2010, VILNIUS, LITHUANIA JUNE 16-18, 2010. VOLUME 2. — P. 340–343.
- [11] Диксон Р.К Широкополосные системы. Пер. с англ./Под ред. В.И. Журавлева. — М.: «Связь», 1979. — 304 с.

Поступила в редколлегию 22.07.2013



Лукин Константин Александрович, доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий отделом нелинейной динамики электронных систем ИРЭ НАН Украины. Научные интересы: широкополосная шумовая радиолокация и радиосвязь, генерация, синтез и обработка хаотических и псевдослучайных сигналов.

Канцедал Валерий Михайлович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник отдела нелинейной динамики электронных систем ИРЭ НАН Украины. Научные интересы: помехозащищенность широкополосной радиолокации, средства радиоэлектронного противодействия радиотехнической разведке и защиты радиолокаторов от активных помех.



УДК 621.396.96: 621.391

Оцінка впливу синхронних імпульсних перешкод на завадостійкість ширококуглових кореляційних приймачів імпульсних РЛС із шумовою та лінійною частотною модуляцією сигналів / К.О. Лукін, В.М. Канцедал // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. — 2013. — Том 12. — № 3. — С. 408–416.

Наведено результати порівняння оцінок завадостійкості кореляційних приймачів радіолокаторів, які використовують послідовності коротких ЛЧМ і некорельованих шумових імпульсів з широким спектром (з базою ~50) при дії двократних синхронних імпульсних завад з різною внутрішньоімпульсною модуляцією, які створюються групою РЕС у робочому діапазоні частот. Уточнено парним методом аналізу ЕМС особливості маскуючого та імітуючого впливів цих завад. Оцінки порогів завадостійкості досліджуваних приймачів та результати порівняння їх завадостійкості отримані із застосуванням сукупності статистичних показників змін форми взаємно кореляційних функцій в умовах завад. Показано перевагу у завадостійкості кореляційного приймача шумових імпульсів в умовах дії синхронних імпульсних завад з широким спектром і внутрішньоімпульсною ЛЧМ.

Ключові слова: шумовий імпульсний радіолокатор, ширококугловий кореляційний приймач, завадостійкість, активна завада.

Табл.: 06. Іл.: 04. Бібліогр.: 11 найм.

UDC 621.396.96: 621.391

Estimation of synchronous pulse interferences influence on interference immunity of wideband correlative receivers of pulse radars with noise and LFM of signals / K. A. Lukin, V. M. Kantsedal // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. — 2013. — Vol. 12. — № 3. — P. 408–416.

Some results of comparative analysis of resistance against jamming for radar correlation receivers of sequences of short LFM pulses and noise pulses with power spectral density providing the signal base ~ 50 are presented. The influence of double synchronous pulsed jamming signals with various frequency modulation, created by a RES group in a operation frequency range has been studied. Features of masking and imitating influence of these interferences are specified using reliable methods of the EMC analysis. Estimations of thresholds of a noise resistance of the receivers under investigation and results of comparison of their noise stability have been obtained using a set of statistical parameters of mutual correlation functions shapes under jamming conditions. An advantage of noise radar in resistance against jamming with synchronous (coherent) wideband LFM pulses is shown.

Keywords: noise pulse radar, wideband correlation receiver, interference immunity, active pulse interference.

Tab.: 06. Fig.: 04. Ref.: 11 items.