

официального оппонента на диссертационную работу Леговцовой Елены Витальевны "Исследование когерентности сигналов и помех в импульсных радиолокационных системах", представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 - Радиофизика

Актуальность работы. В последнее десятилетие и особенно в последние годы (в связи с ведением нашей страной специальной военной операции) появилась возможность с обеих сторон широко использовать в коммерческих, некоммерческих и особенно в военных целях нового класса летательных аппаратов (БПЛА) с их уникальными характеристиками. Это низкая эффективная площадь рассеяния (ЭПР), малые скорости (вплоть до нуля у квадрокоптеров) и новые маневренные возможности. Эти особенности БПЛА существенно затрудняют их обнаружение существующими радиолокационными системами (РЛС) в сложной помеховой обстановке из комплекса активных помех: прицельных, имитирующих (шумовых, импульсных, сигнало-подобных) и других видов.

Все эти обстоятельства ставят в настоящее время крайне актуальную задачу защиты применяемых радиолокационных систем от действия различного класса пассивных и особенно активных помех.

Исследование, проведённое в диссертационной работе Е.В. Леговцовой, представляет собой развитие и активное применение выявленных в последние годы новых качественных характеристик принимаемых сигналов, а именно их пространственной когерентности. Это даёт основание утверждать, что научная проблема, сформулированная в диссертации, а именно "исследование когерентности сигналов и помех в импульсных радиолокационных системах" является актуальной.

Объём и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы.

В первой главе анализируется степень когерентности полезных радиолокационных сигналов с флуктуациями с ограниченной дисперсией их параметров: амплитуды, частоты и фазы. Используется в качестве количественной меры степень когерентности сигналов новый критерий (он предложен в последние годы), а именно, энтропия распределения энергии сигнала по собственным подпространствам сигнальной корреляционной матрицы. Этот критерий позволяет получить количественную оценку степени когерентности рассматриваемых полезных сигналов и помех и сравнивать их по этому критерию.

Во второй главе проводится анализ основных факторов, которые влияют на когерентность активной шумовой помехи, а именно, её ширины спектра и нестационарности помеховой обстановки, которая обусловлена изменением в процессе работы угловых соотношений между лучом антенны решётки и приходящим лучом источника помехи. Рассматриваются 2 случая, а именно: активная шумовая помеха создана одним источником шума малого углового размера и двумя источниками с некоррелированными между собой шумами. В обоих случаях предполагается, что время воздействия помех на РЛС превышает время обработки принимаемой радиолокационной информации. В обоих случаях рассчитаны энтропии и построены соответствующие графики для различных отношений мощностей помехи к мощности собственного шума приёмника РЛС. В обоих случаях энтропия уменьшается с ростом отношений рассматриваемых мощностей и стремится к некоторому пределу, который определяется модулем скалярного произведения собственных векторов рассматриваемых помех при стремлении этого отношения к некоторому минимальному значению.

Однако соискательница пошла дальше и исследовала зависимость энтропии ещё для 3-х подходов, а именно: 1) от направления прихода электромагнитных волн принимаемых помех (приведены расчёты для прихода ортогональных фронтов), 2) от ширины спектра одной шумовой помехи, 3) от нестационарности помеховой обстановки. Рассмотрено влияние соотношения ширины спектра активной помехи и полезного радиолокационного сигнала:

$\Delta f_{\text{АШП}} = \alpha \cdot \Delta f_c$, $\alpha = 1, 2, \dots$ Полученные результаты позволили ещё раз подтвердить два понятия: широкополосной ($\Delta f_{\text{АШП}} = N \cdot \Delta f_c$) и узкополосной ($\Delta f_{\text{АШП}} < N \cdot \Delta f_c$) (прицельной) помехи.

Заслуживает внимания третий из указанных выше подходов, а именно, учёт влияния нестационарности помеховой обстановки. В этом проявляется имеющее место перемещение радиолокационных объектов наблюдения и изменение угловых соотношений между лучами антенн РЛС и постановщика помех. Это ведёт к эффекту рассогласования параметров весовых коэффициентов автокомпенсатора, что ведёт к существенному снижению коэффициента подавления активной шумовой помехи.

Рассмотрено также влияние времени воздействия шумовой помехи на степень её когерентности. В этом случае время воздействия помехи удовлетворяет условию: $t_{\text{АШП}} < t_{\text{обр}}$.

Активная шумовая помеха излучается не непрерывно, а прерывается. Это приводит к флуктуациям коэффициентов автокомпенсатора и, как следует, к уменьшению коэффициента подавления помех и, возможно, к срыву компенсации активной помехи.

В третьей главе выполнен анализ степени когерентности сигналов РЛС, отражённых от источников пассивных помех и приводится график зависимости энтропии от отношения мощностей полезного сигнала к мощности собственного шума. В этом случае с ростом этого отношения энтропия смеси стремится к нулю, а в случае сигнала РЛС, отражённого от источника пассивной помехи, энтропия стремится к некоторому постоянному значению $N_{\text{пп, мин}}$, которая будет являться ограничением пассивной помехи при подавлении в системе селекции движущихся целей (СДЦ). В главе приведено выражение для оценки максимального коэффициента подавления пассивной помехи на выходе СДЦ и приведено его исследование для различных параметров: это учёт различных скоростей ветра, длины выборки и длины волны λ излучаемого РЛС сигнала. Показаны причины уменьшения коэффициента подавления пассивной помехи. Проведено также рассмотрение когерентности суммы сигналов РЛС, отражённых от полезной движущейся цели и пассивного источника помех при наличии собственного шума. На рис.3.8 приведены результаты исследования для случая ортогональности сигналов, отражённых от движущейся цели и источника пассивных помех. Здесь же вводится известное понятие "подпомеховой видимости" как отношение, которое показывает во сколько раз мощность сигнала цели может быть меньше, чем мощность одновременно приходящей с ним помехи.

Четвёртая глава посвящена синтезу методов пространственно-временной обработки полезных сигналов и помех с учётом их когерентных свойств. Синтезирован алгоритм 3-х канального автокомпенсатора активной шумовой помехи на основе метода непосредственного обращения её корреляционной матрицы посредством процедуры линейной интерполяции коэффициентов настройки автокомпенсатора. Проведено компьютерное моделирование, которое показало, что использование процедуры линейной интерполяции весовых коэффициентов автокомпенсатора позволяет увеличить коэффициент подавления активной шумовой помехи ещё на 15-20 дБ и получить конечный результат ~ 35 дБ за счёт выбора оптимального количества служебных зон при обеспечении минимальных потерь при обнаружении полезных сигналов системой межпериодной обработки. В работе выполнен синтез системы СДЦ когерентной импульсной РЛС. Показано, что при высокой степени когерентности принимаемой пачки полезных импульсов (энтропия пачки $N < 10^{-5}$) достичь при определённых условиях подавления пассивной помехи больше 50-60 дБ, что соответствует современным требованиям к радиолокационным системам. Для решения задачи минимизации потерь в обнаружении полезного сигнала предложен и реализован проекционный метод квазиоптимальной межпериодной временной обработки полезных сигналов. При этом моделирование показало, что предложенный алгоритм обработки сигнала более устойчив по сравнению с применением метода весовых окон (окна Дольфа-Чебышева, Кайзера-Бесселя и др.). На его основе предложен новый алгоритм селекции движущихся целей, который позволил значительно снизить требования по производительности к специализированной цифровой вычислительной машине (СЦВМ), которая реализована в РЛС.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, определяется согласованностью научных выводов и рекомендаций с фундаментальными положениями статистической радиотехники и радиофизики, теории информации, статистической теории приёма и обработки сигналов, согласованностью аналитических результатов с результатами математического моделирования и с известными экспериментальными результатами.

Научная новизна результатов диссертации состоит в следующем.

1. Предложен новый метод оценки степени когерентности сигналов с флуктуациями параметров (амплитуды, частоты, фазы) на основе оценки энтропии в виде распределения энергии сигнала по собственным числам выборочной корреляционной матрицы. В отличие от существующих методов оценка когерентности позволяет давать количественную оценку процессов с различным уровнем и видом флуктуаций (амплитудных, частотных, фазовых).

2. Предложен новый метод оценки степени когерентности активных шумовых помех в импульсных радиолокационных системах на основе оценки энтропии в виде распределения энергии помехи по собственным числам её корреляционной матрицы. В отличие от существующих методов это позволяет придать спектральным свойствам (узкополосная, широкополосная) активных помех количественную оценку.

3. Предложен новый метод оценки степени когерентности пассивных помех в импульсных радиолокационных системах на основе оценки энтропии в виде распределения энергии помехи по собственным числам её корреляционной матрицы. Впервые обоснована возможность использования меры когерентности для качественной оценки максимальной подпомеховой видимости и максимального коэффициента подавления пассивной помехи.

4. Впервые обоснована возможность использования проекционного метода квазиоптимальной межпериодной временной обработки пачки импульсов на фоне пассивной помехи с заданными корреляционными свойствами для синтеза системы селекции движущихся целей импульсной РЛС с учётом степени когерентности принимаемого сигнала.

Достоинством диссертационной работы является практическая направленность полученных результатов для задач совершенствования и разработки современных с высокими качественными характеристиками радиолокационных систем. Для всех изучаемых вопросов в диссертации приведены практические рекомендации по использованию корреляционных свойств полезных сигналов и помех, что очень актуально в настоящее время.

Основные результаты диссертации опубликованы в 25 работах, из них 8 работ опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК (из них: 6 работ по специальности 1.3.4 – Радиофизика, из них 5 работ в ведущих изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science, Scopus); 15 работ – в журналах, включённых в РИНЦ, и доклады на научных конференциях; исключительно важным является то обстоятельство, что результаты исследований, выполненных в диссертации, защищены двумя патентами.

Общие замечания по диссертационной работе.

Имеют место некоторые неточности в формулировках и определениях.

1. На стр. 19 указано, что 8 работ опубликованы в изданиях, рекомендуемых ВАК, а в расшифровке (в скобках) их одиннадцать.

2. На стр. 26 нет чёткости в определении отношения мощностей сигнала и шума.

Общая оценка диссертационной работы.

Указанные недостатки не снижают общей положительной оценки диссертации, которая представляет собой законченный научный труд и носит теоретический характер с рекомендациями практического применения. Выполненная на высоком научном уровне с применением статистической теории обработки сигналов диссертационная работа обладает новизной и актуальностью. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Общий вывод. Диссертационная работа "Исследование когерентности сигналов и помех в импульсных радиолокационных системах" полностью соответствует требованиям "Положения о присуждении учёных степеней", предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Леговцова Елена Витальевна заслуживает присвоения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.4.3 - радиофизика.

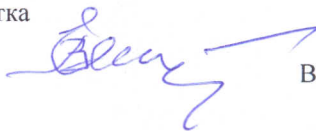
Официальный оппонент, доктор физико-математических наук,
с.н.с., профессор кафедры "Электроника и сети ЭВМ"
Института Радиоэлектроники и Информационных Технологий (ИРИТ)
Федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего профессионального образования
"Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева".

Адрес: г. Н. Новгород, ул. Минина, 24.

Шифр специальности, по которой защищена диссертация:

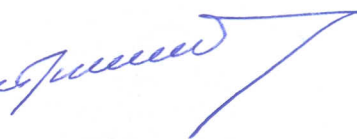
05.13.01 Системный анализ, управление и обработка
информации (по отраслям).

E-mail: esipenko@nntu.ru, тел: 89308011261.



В.И. Есипенко

Подпись В.И. Есипенко заверяю
Учёный секретарь НГТУ



Мерзляков И.Н.

18.02.2025г.