УДК 621.39

И.Г. Леонов[1], А.Е. Присяжный[1], Д.С. Сидоренко[2], Р.Н. Животовский[3]

[1] *Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков*
[2] *Харьковский радиотехнический техникум, Харьков*
[3] *Центральный научно-исследовательский институт ВВТ ВС Украины, Киев*

ИНВАРИАНТНЫЙ ПОДХОД К ОБНАРУЖЕНИЮ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ НА ФОНЕ ПАССИВНЫХ ПОМЕХ В УСЛОВИЯХ АПРИОРНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

В статье рассматривается одна из важных задач современных систем радиолокации и навигации: обнаружение сигналов в условиях параметрической априорной неопределённости, когда вероятностные распределения наблюдаемых данных содержат мешающие параметры вследствие того, что уровень сигналов, мощности шумов, коэффициент передачи канала связи обычно бывают неизвестны на приёмной стороне. Даётся формулировка статистической задачи обнаружения и основных требований к решающим алгоритмам в этих условиях. Приводятся решения ряда практических задач обнаружения сигналов на фоне шумов неизвестной мощности. Показана реализация полученных оптимальных алгоритмов обработки принятых колебаний в виде соответствующих функциональных схем. Представлены результаты компьютерного моделирования режекторного фильтра, позволяющего не только подавить помеху, но и построить доплеровский измеритель скорости.

Ключевые слова: *инвариантность, пассивные помехи, обнаружение сигналов, режекторный фильтр.*

Введение

Постановка проблемы. Для современных радиотехнических систем различного назначения характерна работа в сложной помеховой обстановке. При проектировании систем связи, радиолокации и других все чаще приходится сталкиваться с задачей обнаружения сигналов в шумах, когда их статистические характеристики заранее неизвестны либо подвержены изменениям.

В настоящее время обнаружение сигнала общепринято трактовать как статистическую задачу с априорной неопределенностью. Для ряда задач характерна также нестационарность параметров сигналов и помех в процессе обнаружения, приводящая к неоднородности анализируемой выборки. В этих условиях классические алгоритмы обнаружения, «специализированные», как правило, на нормальный шум, могут оказаться неэффективными. При отклонении закона распределения шума от нормального такие обнаружители утрачивают свою оптимальность, а при изменении только параметра нормального шума (дисперсии), оставаясь структурно оптимальными, не обеспечивают расчетных показателей обнаружения.

Большинство внешних помех радиотехническим системам является случайным процессом с негауссовским законом распределения вероятности мгновенных значений. Существенно негауссовскими являются атмосферные и индустриальные помехи, взаимные помехи радиосредств, активные помехи радиопротиводействия, пассивные помехи в широкополосных системах связи, шумы океана в пассивных гидроакустических системах обнаружения и др.

При негауссовских помехах качество обнаружения сигналов определяется распределениями вероятности помехи. Помимо того, что реально существуют шумы, распределение которых отлично от нормального, в ряде случаев приходится отказываться от гауссовской модели для шумов, которые традиционно считаются нормальными. Дело в том, что точность аппроксимации нормальным законом реального распределения оказывается на практике достаточно высокой для средней части кривой распределения (плотности вероятности), на «хвостах» же кривой точность быстро убывает по мере удаления от ее средней части.

Специфика некоторых систем обнаружения (например, радиолокационных) такова, что вероятность ложного обнаружения выражается весьма малой величиной $10^{-3} - 10^{-12}$, не характерной для вероятностей ошибок, с которыми обычно имеет дело математическая статистика. Столь малым вероятностям соответствуют «хвосты» распределения шума, где его нормальная аппроксимация неудовлетворительна.

Поэтому особенно актуальной становится проблема разработки и синтеза обнаружителей, функционирование которых не зависит от закона распределения помех.

Анализ литературы. Как показано в [1 – 3], перспективным методом определения сигналов в условиях априорной неопределенности является использование инвариантных правил обнаружения.

Суть инвариантных правил заключается в однозначном преобразовании сигналов и помех, которое не изменяет их достаточную статистику. Статистика до преобразования связана со статистикой после преобразования линейным однозначным оператором.

Такой подход позволяет синтезировать оптимальные правила обнаружения для сигналов с экспоненциальными законами распределения (одномодовые экспоненциальные законы).

Принцип инвариантности в задачах обнаружения и различения m сигналов основан на представлении априорной неопределенности в форме воздействия на наблюдаемый процесс (или выборку из этого процесса) некоторого произвольного преобразования g из фиксированной группы преобразований G.

К статистическим критериям, применяемым для обнаружения сигнала в условиях априорной неопределенности, предъявляется требование малой чувствительности к значениям мешающих параметров. Критерии, уровень значимости и мощность которых не зависят от неизвестных параметров, называются относительно них инвариантными. Среди инвариантных представляют интерес критерии, обладающие наибольшей по сравнению с другими мощностью и называются равномерно наиболее мощными (РНМ) в этой области. Поиск критериев, обладающих высокой мощностью и малой чувствительностью к мешающим параметрам, является одним из актуальных направлений развития теории статистических решений.

Целью данной статьи является краткий обзор возможностей инвариантного подхода к обнаружению сигналов на фоне пассивных помех в условиях априорной неопределенности.

Основная часть

1. Элементы теории инвариантных алгоритмов обнаружения и различения сигналов

Многие задачи обнаружения и различения сигналов обладают симметрией, которую можно использовать для синтеза устойчивых в условиях априорной неопределенности алгоритмов обнаружения и различения. Математическим выражением симметрии является инвариантность относительно подходящей группы преобразований G. Под группой G понимается совокупность элементов, удовлетворяющих следующим условиям:

1. Определена операция группового умножения, которая любым элементам g_1, $g_2 \in G$ ставит в соответствие элемент $g_3 \in G$, называемый произведением элементов g_1 и g_2 и обозначаемый g_1g_2.

2. Групповое умножение ассоциативно, т.е. $g_1(g_2g_3) = (g_1g_2)g_3$.

3. Существует единичный элемент $e \in G$ такой, что $ge = eg = g$ для всех $g \in G$.

4. Для каждого элемента $g \in G$ имеется обратный элемент $g^{-1} \in G$ такой, что $gg^{-1} = g^{-1}g = e$.

Задачи с симметричными семействами распределений вероятностей наблюдаемой выборки и инвариантными множествами значений параметров этих распределений при гипотезах соответственно называются далее симметричными относительно группы преобразований G.

Выделяются правила с инвариантными функциями мощности. Для симметричных задач условие инвариантности функции мощности выполняется, если решающая функция алгоритма обнаружения инвариантна относительно группы G, т.е. $\varphi(gx) = \varphi(x)$ при всех $x \in X$ и $g \in G$.

Лишь в том случае, когда семейство распределений наблюдаемой выборки обладает полными достаточными статистиками, РНМ инвариантный алгоритм совпадает с РНМ алгоритмом с инвариантной функцией мощности.

В теории синтеза РНМ инвариантных алгоритмов обнаружения сигналов большую роль играют специальные статистики – максимальные инварианты (МИ). Максимальным инвариантом группы G называется такая статистика Z(x), для которой выполняются следующие условия:

а) $Z(gx) = Z(x)$, при всех $X \in x$ и $g \in G$;

б) из равенства $Z(x') = Z(x'')$ следует $x'' = gx'$ для некоторого $g \in G$.

Статистика МИ обладает тем важным свойством, что она принимает, в отличие от просто инвариантных статистик, разные значения на различных траекториях группы G (под траекторией понимается совокупность всех точек $x \in X$, связанных друг с другом преобразованиями $g \in G$). Таким образом, МИ обеспечивает наибольшую редукцию наблюдаемых данных и может быть использован для представления любой инвариантной статистики.

Алгоритм обнаружения сигнала будет инвариантным тогда и только тогда, когда его решающая функция $\varphi(x)$ будет зависеть от x только через максимальный инвариант Z(x), т.е. когда существует такая функция $\psi(\cdot)$, что $\varphi(x) = \psi[Z(x)]$.

Если статистика Z(x) инвариантна относительно группы преобразований G, и если $\gamma(\theta)$ является максимальным инвариантом относительно индуцированной в параметрическое пространство группы преобразований G^*, то распределение вероятностей статистики Z(x) зависит только от $\gamma(\theta)$. Это еще раз подтверждает независимость функции мощности инвариантного алгоритма от изменения параметра под действием преобразований группы.

Ключевым моментом при использовании принципа инвариантности является построение МИ. Часто инвариантную статистику находят интуитивно, а затем, используя известные соотношения, проверяют, является ли она максимальным инвариантом.

Однако, такой способ пригоден далеко не для всех групп преобразований, поэтому большой интерес представляют регулярные способы построения МИ.

Если группа преобразований G является коммутативной и существует такая коммутативная группа Λ, что

а) $\lambda g = g\lambda$ при всех $g \in G$ и $\lambda \in \Lambda$;

б) пересечение $G \cap \Lambda = e$, e – единичное преобразование;

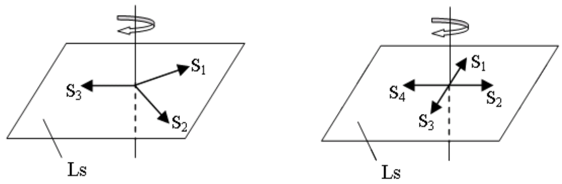
в) совокупность $D = \{d{:}d = \lambda g;\ g \in G;\ \lambda \in \Lambda\}$ транзитивна в X, то для любых $x, x_o \in X$ найдутся единственные преобразования $\lambda_x \in \Lambda$ и $g_x \in G$, при которых $\lambda_x g_x x = x_0$; функция $Z(x) = g_x x$ является МИ группы G.

2. Обнаружение сигналов на фоне пассивных помех с неопределенными параметрами

Рассмотрим задачу обнаружения сигнала при совместном воздействии гауссовского шума и пассивных помех. Известны методы борьбы с пассивными помехами, когда они адекватно представляются гауссовским коррелированным шумом. Однако не всегда для пассивных помех справедлива гауссовская аппроксимация. В ряде случаев вообще отсутствуют основания для представления пассивной помехи случайным процессом с устойчивым распределением. Поэтому представляют интерес правила обнаружения при минимальных априорных данных о пассивной помехе, когда задано только множество ее реализаций без определения на нем вероятностного распределения. Ниже рассмотрен вариант такого правила, полученного с использованием принципа инвариантности.

В качестве наблюдаемого процесса возьмем колебание на выходе линейного тракта приёмника (ЛТП) с П-образной амплитудно-частотной характеристикой. Спектральную плотность гауссовского шума считаем постоянной в пределах полосы Δf пропускания ЛТП. При этих предположениях комплексные огибающие $\dot{s}(t)$, $\dot{\xi}(t)$ и $\dot{n}(t)$ сигнала, пассивной помехи и шума на выходе ЛТП аппроксимируются финитными по частоте процессами, принадлежащими гильбертову пространству H с воспроизводящим ядром. Воспроизводящее ядро пространства H равно корреляционной функции комплексной огибающей шума на выходе ЛТП. Комплексная огибающая наблюдаемого процесса $\dot{x}(t) = \dot{s}(t) + \dot{\xi}(t) + \dot{n}(t)$ также принадлежит пространству H. Конкретный вид реализации $\dot{\xi}(t)$ пассивной помехи считаем неизвестным. Единственное предположение о помехе состоит в том, что совокупность всех ожидаемых реализаций $\dot{\xi}(t)$ образует подпространство $L \subset H$. А плотность распределения смеси сигнала и пассивных помех относится к классу экспоненциальных распределений.

Действие пассивной помехи на наблюдаемый процесс равносильно преобразованию его комплексности огибающей группой $G = \left\{g : \dot{x}(t) \to \dot{x}(t) + \dot{\xi}(t); \dot{\xi}(t) \in L\right\}$ аддитивных операторов. В связи с этим для построения правила обнаружения, устойчивого относительно пассивной помехи, воспользуемся принципом инвариантности. Максимальным инвариантом (МИ) группы G является процесс $\dot{Z}(t) = \dot{x}(t) - \hat{x}(t)$, где $\hat{x}(t) = \Pr\left[\dot{x}(t)\right]$ – ортогональная проекция наблюдения $\dot{x}(t)$ в подпространство L. Оператор Pr ортогонального проектирования (рис. 1) существует, так как L – подпространство в пространстве H и $\dot{x}(t) \in H$.



а б

Рис. 1. Ортогональное преобразование сигналов:
а – три эквидистантных сигнала;
б – четыре биортогональных сигнала

Полученный МИ принадлежит ортогональному дополнению Q подпространства L и состоит из сигнальной $\dot{s}(t) - \hat{s}(t)$ и шумовой $\dot{\xi}(t) = \dot{n}(t) - \hat{n}(t)$ компонент, где $\hat{s}(t) = \Pr\left[\dot{s}(t)\right]$ и $\hat{n}(t) = \Pr\left[\dot{n}(t)\right]$. Пассивная помеха отсутствует в процессе $\dot{Z}(t)$, так как $\dot{x}(t) + \dot{\xi}(t) - \Pr\left[\dot{x}(t) + \dot{\xi}(t)\right] = \dot{x}(t) - \Pr\left[\dot{x}(t)\right]$ в силу равенства $\Pr\left[\dot{\xi}(t)\right] = \dot{\xi}(t)$. Это создает необходимые предпосылки для устойчивости правила обнаружения к действию пассивной помехи. В связи с линейностью оператора Pr процесс $\dot{Z}(t)$ является гауссовским со средним значением $\dot{s}(t) - \hat{s}(t)$ и некоторой корреляционной функцией $B_\xi(t_1;t_2)$.

Образуем выборку $\dot{Z}(t) = (\dot{Z}_1, ..., \dot{Z}_\nu), \nu = \Delta f T$, из отсчетов $\dot{Z}_i$ процесса $\dot{Z}(t)$ в моменты времени $t_i = i/\Delta f$. Плотность вероятности этой выборки

$$W(\dot{Z}) = k \exp\left[-\frac{1}{2}\operatorname{Re}\left\langle \dot{Z} - (\dot{s} - \hat{s}); \dot{Y}\right\rangle\right], \tag{1}$$

где $\dot{s} - \hat{s} = (\dot{s}_1 - \hat{s}_1, ..., \dot{s}_\nu - \hat{s}_\nu)$ – выборка из отсчетов сигнальной компоненты процесса $\dot{Z}(t)$; $\dot{Y}(t) = (\dot{Y}_1, ..., \dot{Y}_\nu)$ – вектор, удовлетворяющий уравнению

$$B_\xi \dot{Y} = \dot{Z} - (\dot{s} - \hat{s}) \tag{2}$$

с матрицей $B_\xi = \left[B_\xi(t_i;t_k)\right]$. Используя свойство воспроизведения пространства H и заменяя (2) интегральным уравнением с ядром $B_\xi(t_i;t_2)$, можно показать, что при большом значении $\nu = \Delta f T$ уравнение (2) имеет решение $\dot{Y} \approx \left[\dot{Z} - (\dot{s} - \hat{s}\right] / (2N_0 \Delta f)$, где N_0 – спектральная плотность гауссовского шума на входе ЛТП. С учетом этого решения плотность вероятности (1) принимает вид

$$W(\dot{Z}) = k\exp\left[-\frac{1}{4N_0\Delta f}\|\dot{Z}\|^2 + \right.$$
$$\left. +\frac{1}{2N_0\Delta f}\mathrm{Re}\langle\dot{Z};\dot{s}-\hat{s}\rangle - \frac{1}{4N_0\Delta f}\|\dot{s}-\hat{s}\|^2\right]. \qquad (3)$$

При достаточно большом объеме выборки $\dot{Z}$ статистика $\frac{1}{\Delta f}\|\dot{Z}\|^2 \approx \|\dot{Z}\|_H^2$ и статистика $\frac{1}{\Delta f}\langle\dot{Z};\dot{s}-\hat{s}\rangle \approx \langle\dot{Z};\dot{s}-\hat{s}\rangle_H$, где $\|\bullet\|_H$ и $\langle\bullet;\bullet\rangle_H$ – соответственно норма и скалярное произведение в пространстве H. Ниже указанные статистики выражаются через норму и скалярное произведение в пространстве H, поэтому индекс «н» при записи этих статистик опускается.

Распределения с плотностью вероятности (3) образуют экспоненциальное семейство, для которого выполняются условия существования равномерно наиболее мощного (РНМ) инвариантного правила. Так как (3) совпадает с выражением для плотности вероятности при обнаружении сигнала в белом шуме с той только разницей, что наблюдаемая выборка x заменена вектором $\dot{Z}$ и обнаруживаемый сигнал $\dot{s}$ – сигналом $\dot{s}-\hat{s}$. При построении РНМ инвариантного правила в случае когерентного обнаружения (начальная фаза сигнала известна) и априорно неопределенной спектральной плотности шума получаем с учетом равенства $\langle\dot{Z};\dot{s}-\hat{s}\rangle = \langle\dot{x};\dot{s}-\hat{s}\rangle$ решающую функцию РНМ инвариантного правила

$$\varphi(x) = \begin{cases} 1 \text{ ï ðè } \mathrm{Re}\langle\dot{x};\dot{s}\text{-}\hat{s}\rangle \ge C(\alpha)\sqrt{\|\dot{x}-\hat{x}\|^2}; \\ 0 \text{ â î ñòàëüíûõ ñëó÷àÿõ.} \end{cases} \qquad (4)$$

При некогерентном обнаружении (начальная фаза сигнала произвольная) и априорно неопределенной спектральной плотности шума решающая функция

$$\varphi(x) = \begin{cases} 1 \text{ ï ðè } |\langle\dot{x};\dot{s}\text{-}\hat{s}\rangle|^2 \ge C(\alpha)\|\dot{x}-\hat{x}\|^2; \\ 0 \text{ â î ñòàëüíûõ ñëó÷àÿõ.} \end{cases} \qquad (5)$$

Правила (4) и (5) обеспечивают инвариантность вероятностей ложной тревоги и правильного обнаружения к воздействию пассивной помехи. Они имеют также стабильную вероятность ложной тревоги при изменении уровня шума, а правило (5) – инвариантную к начальной фазе сигнала вероятность правильного обнаружения. Вероятность правильного обнаружения у этих правил максимальна среди всех правил, инвариантных к действию пассивной помехи рассмотренного вида.

3. Режекторный фильтр – автокомпенсатор пассивных помех

Остановимся на вычислении статистик $\langle\dot{x};\dot{s}-\hat{s}\rangle$ и $\|\dot{x}-\hat{x}\|^2$. Значение статистики $\langle\dot{x};\dot{s}-\hat{s}\rangle$ равно в некоторый момент времени t_0 отклику фильтра, согласованного с сигналом $\dot{s}(t)-\hat{s}(t)$. Нормированная импульсная реакция этого фильтра $g(t) = h^*(t_0 - t)$, где

$$h(t) = [\dot{s}(t)-\hat{s}(t)]/\|\dot{s}-\hat{s}\|. \qquad (6)$$

Фильтр (6) режектирует пассивную помеху $\dot{\xi}(t)\in L$, так как функция h(t) ортогональна подпространству L. Такой режекторный фильтр (РФ) наряду с подавлением пассивной помехи выделяет также полезный сигнал $\dot{s}(t)$ с максимальным выходным отношением сигнал-шум, т.е. оказывается своего рода оптимальным в классе всех РФ, подавляющих помеху и выделяющих сигнал.

Реализация схемы будет зависеть от выбора самого выгодного в данном случае оператора Pr.

При борьбе с пассивными помехами обычно используют синусно-косинусные (квадратурные) преобразования либо смещение (задержку) на период. Однако в этом случае качество подавления определяется законами распределения сигнала, помехи и их стационарностью.

Авторами предложено формирование двух инвариантных копий принятой смеси $\dot{x}(t)$, причем первая копия отличается от исходной несущей частотой, а вторая – частотой и инверсной фазой. При этом несущие частоты обоих копий равны. Суммирование данных копий является реализацией режекторного фильтра с импульсной характеристикой (6).

Получение инвариантных копий возможно путем двухчастотного гетеродинирования. Это позволяет не только разделить сигналы от подвижных целей и пассивных помех, но и скомпенсировать последние (рис. 2).

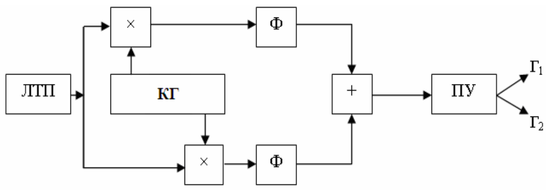


Рис. 2. Структурная схема режекторного фильтра, позволяющего не только разделить сигналы т подвижных целей и пассивных помех, но и скомпенсировать последние

Результаты моделирования работы схемы в САПР SystemView представлены на рис. 3 – 5.

Выводы

Создание современных автоматизированных устройств обнаружения сигналов требует преодоления априорной неопределенности.

Задачи обнаружения с параметрической априорной неопределенностью образуют важный класс задач, при решении которых существенная роль принадлежит методу получения инвариантных алгоритмов, позволяющему находить правила обнаружения с четкими свойствами устойчивости (робастности) и оптимальности при любом конечном времени наблюдения, что отвечает требованиям практики.

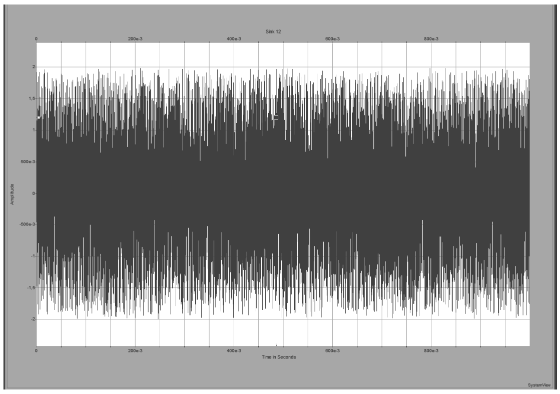


Рис. 3. Осциллограмма аддитивной смеси (сигнал + шум), поступающей на вход режекторного фильтра (отношение сигнал-шум – 1:1)

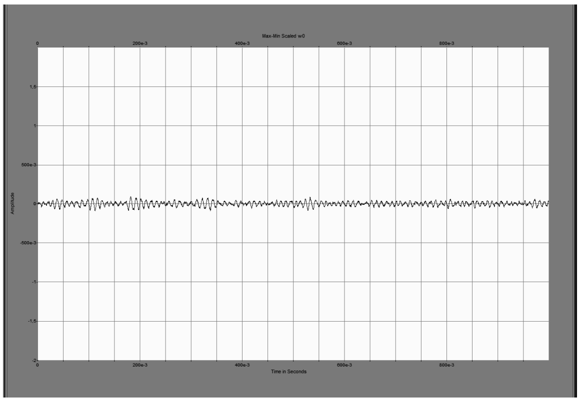


Рис. 4. Осциллограмма на выходе режекторного фильтра: движущаяся цель отсутствует, пассивная помеха скомпенсирована (отношение сигнал-шум – 1:1)

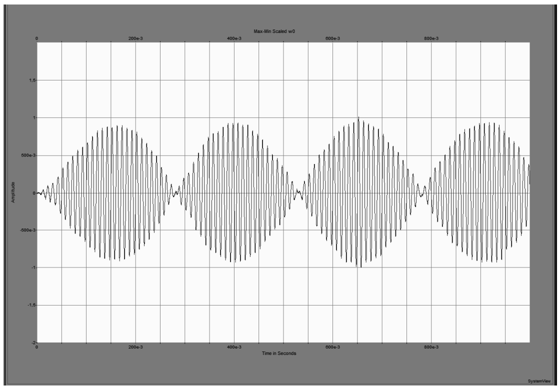


Рис. 5. Осциллограмма на выходе режекторного фильтра: в принимаемом сигнале обнаружена движущаяся цель (Fд = 2 Гц), пассивная помеха скомпенсирована

Авторами статьи предложена методика реализации режекторного фильтра, который наряду с подавлением пассивной помехи выделяет также полезный сигнал с максимальным отношением сигнал-шум и позволяет построить доплеровский измеритель скорости.

Такой подход в подавлении помех, безусловно, является новым и требует дальнейшего исследования.

Список литературы

1. *Богданович В.А. Теория устойчивого обнаружения, различения и оценивания сигналов; 2-е изд., испр. / В.А. Богданович, А.Г. Вострецо. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 320 с.*
2. *Румянцев К.Е. Инвариантные алгоритмы обнаружения сигналов при априорной неопределённости помеховой обстановки: Учебное пособие / К.Е. Румянцев, В.Н. Прокофьев. – Таганрог: ТРТИ, 1990. – 45 с.*
3. *Теория обнаружения сигналов / П.С. Акимов, П.А. Бакут, В.А. Богданович и др.; Под ред. П.А. Бакута. – М.: Радио и связь, 1984. – 440 с.*

Поступила в редколлегию 17.06.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Д. Карлов, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

ІНВАРІАНТНИЙ ПІДХІД ДО ВИЯВЛЕННЯ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ НА ФОНІ ПАСИВНИХ ПЕРЕШКОД В УМОВАХ АПРІОРНОЇ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

І.Г. Леонов, А.Є. Присяжний, Д.С. Сидоренко, Р.М. Животовський

У статті розглядається одне з важливих завдань сучасних систем радіолокації та навігації: виявлення сигналів в умовах параметричної апріорної невизначеності, коли ймовірнісні розподіли спостережуваних даних містять заважаючі параметри унаслідок того, що рівень сигналів, потужності шумів, коефіцієнт передачі каналу зв'язку зазвичай бувають невідомі на приймальній стороні. Надається формулювання статистичного завдання виявлення та основних вимог до алгоритмів розв'язування в цих умовах. Наводяться розв'язання ряду практичних задач виявлення сигналів на фоні шумів невідомої потужності. Показана реалізація отриманих оптимальних алгоритмів обробки прийнятих коливань у вигляді відповідних функціональних схем. Представлені результати комп'ютерного моделювання режекторного фільтру, що дозволяє не тільки подавити заваду, але і побудувати доплеровський вимірювач швидкості.

Ключові слова: *інваріантність, пасивні завади, виявлення сигналів, режекторний фільтр.*

INVARIANT RULES OF FINDINGOUT RADAR SIGNALS ON BACKGROUND THE PASSIVE HINDRANCES IN THE CONDITIONS OF APRIORY PROBABILITY

I.G. Leonov, A.Y. Prisyazhniy, D.S. Sidorenko, R.M. Zhyvotovskiy

In the article is examined one of important tasks of the modern signal systems: findingout signals in the conditions of a apriory self-reactance probabilities, when the probabilistic distributing of the looked after information is contained preventing parameters because of that level of signals, powers of noises, transmitivity channel to connection usually are unknown on a receiving side. Presented the results of computer designed filter, allowing not only to crush down a hindrance but also build the dopler's measuring device of speed.

Keywords: *invariance, passive hindrances, finding out signals, filter.*