УДК 621.396.9:

С.В. ЮДИН, А.И. ЛИТВИН-ПОПОВИЧ, В.Н. ОЛЕЙНИКОВ, канд. техн. наук

ПОДАВЛЕНИЕ ЗЕМНОЙ ПОМЕХИ В РЛС ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА НЕЧЕТКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ

Для измерения профиля скорости и направления ветра в последние десятилетия наряду с использованием аэрологического зондирования широко используются радиолокационные станции вертикального зондирования (РЛС ВЗ), в которых используется явление отражения электромагнитных волн от турбулентных неоднородностей атмосферы.

На вход приемного устройства РЛС ВЗ поступает сигнал, содержащий составляющую, обусловленную рассеянием излученного зондирующего импульса от движущихся с преобладающим ветром турбулентных неоднородностей атмосферы, а также компоненты, обусловленные шумами и помехами. В антенной системе РЛС ВЗ часть энергии, рассеянная наземными объектами, попадает в боковые лепестки диаграммы направленности (ДН). Эффективная поверхность рассеяния наземных объектов, значительно выше эффективной поверхности рассеяния атмосферных неоднородностей и гидрометеоров. В результате мощность земной помехи (ЗП) на входе приемника РЛС соизмерима с мощностью полезного сигнала. Экспериментальные измерения показали, что когерентные помехи, приходящие по боковым лепесткам ДН антенны, являются основной трудностью при практическом использовании РЛС ВЗ [1]. Спектр земной помехи симметричен относительно нулевой частоты, ширина спектра земной помехи обычно существенно уже ширины спектра сигналов, рассеянных турбулентными неоднородностями. Уровень земной помехи для малых дальностей зондирования значительно (иногда на 20 – 40 *дБ*) превосходит уровень полезного сигнала. Наличие в спектральной плотности мощности рассеянного сигнала шумов и помех усложняет определение параметров сигнальной части спектра, вызывая смещение оценок доплеровского сдвига в сторону меньших абсолютных значений [1, 3].

Для снижения воздействия ЗП в антенной системе РЛС ВЗ применяются бленды и экранирующие ограждения, кромки антенн и бленд покрываются радиопоглощающим материалом, что позволяет снизить уровень ЗП на 16 – 20 *дБ* [4,5]. Алгоритмические методы подавления ЗП позволяют в процессе обработки информации снизить воздействие ЗП в спектральной области, при этом обычно используются режекторные фильтры, настроенные на подавление сигналов нулевой частоты, вейвлет-фильтрация помеховых составляющих [3] и другие методы.

Применение теории нечетких множеств и нечеткой логики для подавления земной помехи

Теория нечетких множеств [6] позволяет описывать качественные, неточные понятия и производить их математическую обработку, с целью получения новой информации. Нечетким множеством $\widetilde{A}$ на универсальном множестве U называется совокупность пар $(\mu_A(u),u)$ где $\mu_A(u)$ степень принадлежности элемента $u \in U$ нечеткому множеству $\widetilde{A}$. Функцией принадлежности μ_A называется функция, позволяющая для произвольного элемента универсального множества U вычислить степень его принадлежности нечеткому множеству $\widetilde{A}$:

$$\widetilde{A} = \int_{u \in U} \mu_A(u)/u\,. \qquad (1)$$

Для подавления ЗП в РЛС ВЗ методом нечеткой классификации зададим характерные признаки ЗП и их функции принадлежности, которые описывают характерный вид спектра ЗП: спектральная плотность мощности быстро нарастает и спадает, спектр ЗП сосредоточен около частоты нулевого доплеровского сдвига, спектр ЗП симметричен относительно частоты нулевого доплеровского сдвига.

Из описания признаков спектральной характеристики ЗП выделим четыре параметра спектра, по которым производится классификация:

1. Модули первой $\alpha_1(f) = |S'(f)|$ и второй $\alpha_2(f) = |S''(f)|$ производной спектра описывают скорость нарастания и спада СПМ. Функции принадлежности для этих параметров описываются выражениями $\mu_1(f) = S(f)^{x_1}$ и $\mu_2(f) = S(f)^{x_2}$ изображены на рис. 1. Коэффициенты x_1 и x_2 описывают степень прогиба функции принадлежности.

2. Модуль частоты описывает степень отклонения от нулевой частоты доплеровского сдвига $\alpha_f(f) = |f|$. Функция принадлежности (рис. 1) для этого параметра описывается формулой $\mu_f(f) = 1 - S(f)^{x_f}$

3. Симметричность спектра описывается параметром $\alpha_s(f) = |S(f) - S(-f)|$ функция принадлежности для этого параметра описывается формулой $\mu_s(f) = 1 - S(f)^{x_s}$. Функции принадлежности для характеристик спектра приведены на рис. 1: 1 – первой и второй производной, 2 – модуля частоты, 3 – симметричности спектра.

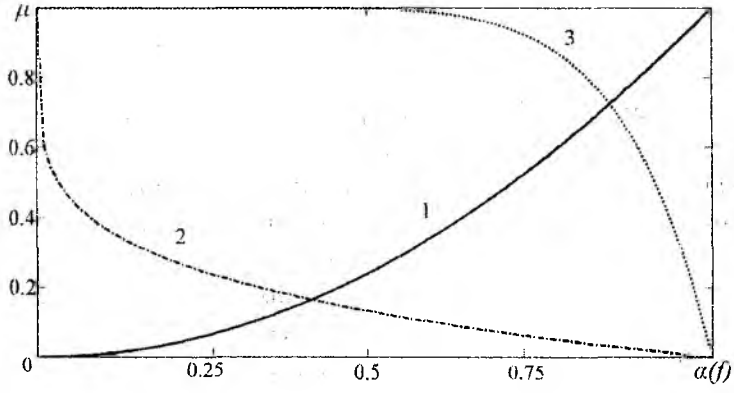


Рис. 1

Процесс классификации ЗП состоит из двух основных этапов – фазификации и композиции [6], в результате этих операций получается общая функция принадлежности спектра к спектру земной помехи. На этапе фазификации для каждой из четырех характеристик спектра, находятся их степени принадлежности. Процедура композиции описывается выражением

$$\mu_{зп}(f) = \frac{\alpha_1 \times \mu_1(f) + \alpha_2 \times \mu_2(f) + \alpha_f \times \mu_f(f) + \alpha_s \times \mu_s(f)}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_f + \alpha_s}. \quad (2)$$

Спектр принятого сигнала перемножается с общей функцией принадлежности, получается частотный спектр земной помехи, который вычитается из исходного принятого сигнала.

Обработка спектра принятого сигнала

Эффективность метода подавления ЗП, при помощи нечеткой логической классификации проверена при обработке радиолокационной информации РЛС ВЗ дециметрового диапазона [1]. На рис. 2 изображен спектр принятого сигнала с высоты 1,2 *км*, который содержит отражения от наземных предметов –1 и от атмосферы –2.

В результате проведения процедуры нечеткой классификации ЗП, по четырем основным признакам, получена общая функция принадлежности СПМ принятого сигнала к СПМ ЗП. Форма функции принадлежности рис. 3, повторяет СПМ отражений от наземных объектов. Вычитание спектра ЗП из принятого сигнала производится по формуле

$$S(f)_{рез} = S(f) - \mu_{зп} \cdot S(f) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots 3)$$

Полученный спектр $S(f)_{рез}$ приведен на рис. 4.

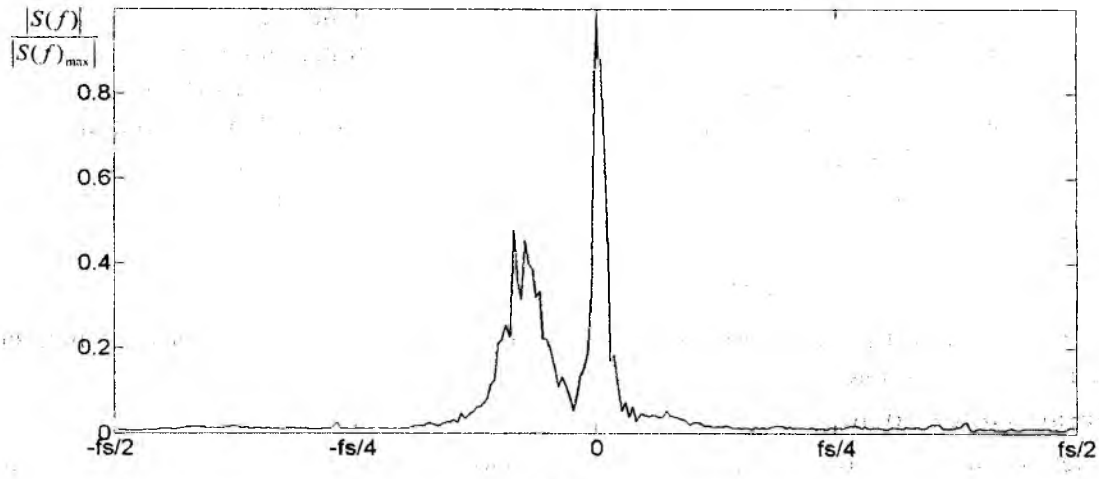


Рис. 2

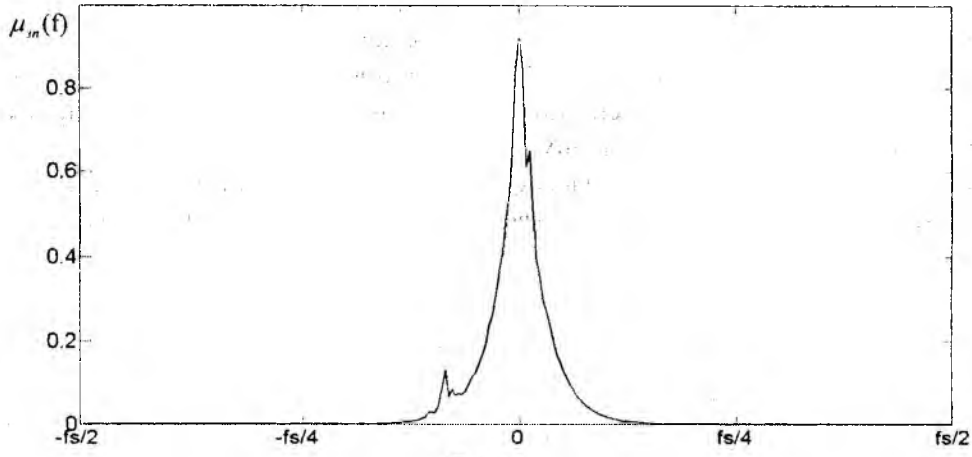


Рис. 3

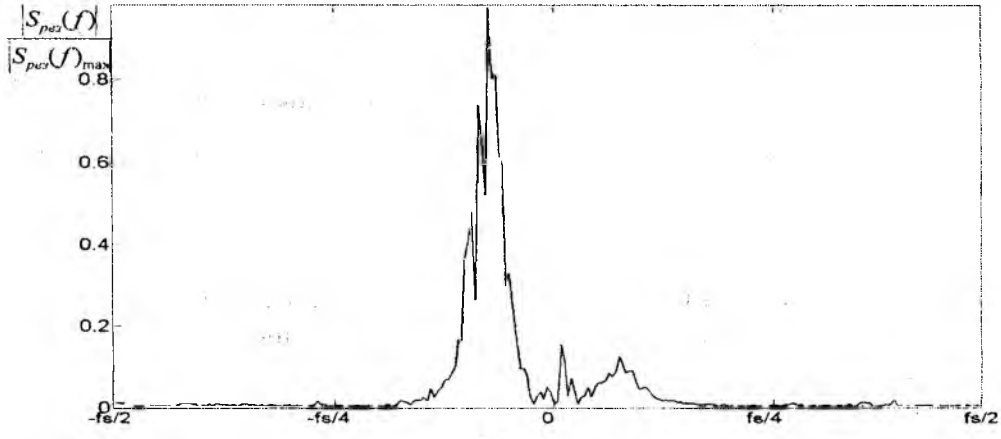


Рис. 4

Приведенный пример показывает эффективность применения метода нечеткой логической классификации для снижения уровня ЗП.

Процедура имитационного моделирования

Верификация методов подавления земной помехи и сравнение их эффективности проводилось путем имитационного моделирования [3]. При этом формировался сигнал со спектром, являющимся суммой спектральной плотности мощности (СПМ) рассеянного сигнала и земной помехи. СПМ ЗП задавалась в виде функции Гаусса с математическим ожиданием, равным нулю, и малой дисперсией. К реализации, полученной в результате обратного преобразования Фурье, прибавлялся белый гауссовый шум. Отношение сигнал/шум в модели

составляет 20 *дБ*, спектральная ширина полезного сигнала равна 1,5 *м/с*, полный диапазон однозначного определения скорости ±25 *м/с*, число отсчетов в выборке 256. При моделировании использовались модели рассеянного сигнала и ЗП, описанные в [8]. В качестве меры эффективности обработки применен комплексный критерий, учитывающий среднеквадратическое отклонение (СКО) оценки спектральной плотности мощности рассеянного сигнала в его смеси с ЗП, и СКО оценок скорости ветра методом наименьших квадратов:

$$s_1 = \frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(x-x')^2\,,\ s_2 = \frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(v-v')^2\,. \qquad (4)$$

При моделировании рассматривались два случая – равномерный и нормальный законы распределения скоростей ветра.

Представление результатов

Для оценки эффективности подавления ЗП методом нечеткой классификации по минимуму отклонений оценок скорости ветра, произведем его сравнение с другими методами. Далее приведены результаты СКО оценок скорости ветра без фильтра для подавления ЗП, с режекторным фильтром и двумя вариантами вейвлет-фильтров. Режекторный фильтр реализован в виде цифрового фильтра верхних частот 11-го порядка с затуханием в полосе заграждения 80 *дБ*. На рис. 5 приведены зависимости СКО спектра после фильтра от спектра без ЗП: а) моделируемая скорость ветра распределена по равномерному закону, б) моделируемая скорость ветра распределена по нормальному закону. Условные обозначения на рис. 5, 6: 1 – фильтрация отсутствует, 2 – фильтр нечеткой классификации, 3 – режекторный фильтр, 4,5 – вейвлет-фильтры (мягкое и жесткое ограничение коэффициентов, соответственно) [3].

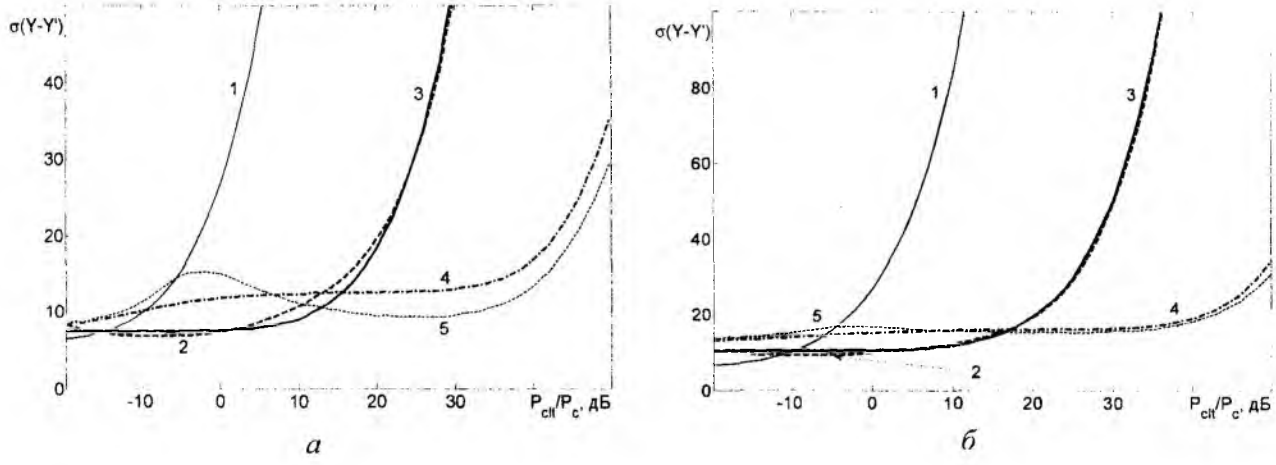


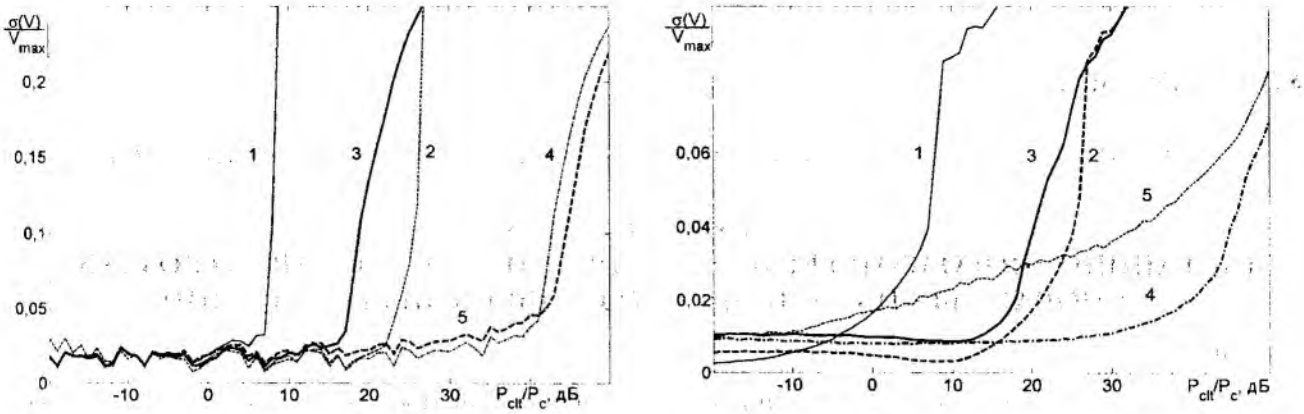
Рис. 5

Для всех методов обработки СКО оценок СПМ возрастает с увеличением мощности ЗП. Наименьшие погрешности при большой мощности ЗП обеспечивают вейвлет-фильтры.

На рис. 6 приведены зависимости СКО оценок скорости ветра, а) моделируемая скорость ветра распределена по равномерному закону, б) моделируемая скорость ветра распределена по нормальному закону.

СКО оценок (рис. 6) возрастает с увеличением мощности ЗП. Фильтр, основанный на методах нечеткой классификации, дает худшие результаты при соотношениях P_{clt}/P_c>25 *дБ*, однако более эффективен при малых мощностях ЗП. Наименее эффективен режекторный фильтр. Это обусловлено, по-видимому, искажением спектра рассеянного сигнала при его частотном перекрытии со спектром ЗП.

Поскольку в процессе обработки информации методом нечеткой классификации применяются простые математические операции, скорость обработки этим методом в 2-4 раза выше, чем при использовании других приведенных здесь методов.



а *б*

Рис. 6

Выводы

Результаты моделирования показывают, что фильтр для подавления ЗП, основанный на методе нечеткой классификации при соотношениях $P_{зп}/P_{пс}$ до 20 *дБ*, эффективно подавляет ЗП. При соотношениях $P_{зп}/P_{пс}$ до 15 *дБ* применение метода нечеткой классификации приводит к меньшим отклонениям оценок скорости ветра, и в этом диапазоне он является более эффективным из рассмотренных методов. На больших соотношениях $P_{зп}/P_{пс}$ более эффективным является метод вейвлет-фильтрации. Также применение фильтра для подавления ЗП, основанного на методе нечеткой классификации требует проводить меньше вычислительных операций, что приводит к существенному уменьшению времени обработки радиолокационной информации. Появление микропроцессоров с встроенной архитектурой нечеткой логики, позволяет осуществлять обработку радиолокационной информации в реальном режиме времени и с высоким временным разрешением. При практическом применении целесообразно использовать комбинированный метод подавления ЗП. На нижних высотах зондирования, на которых мощность земной помехи высокая применять вейвлет фильтрацию, а на остальных применять фильтр на основе метода нечеткой классификации.

Авторы хотели бы поблагодарить И.В.Галяса (БГУИР, Минск) за помощь в проведении расчетов.

Список литературы: 1. *Дистанционные* методы и средства исследования процессов в атмосфере Земли / Под общ. ред. Кащеева Б. Л.,. Прошкина Е. Г, Лагутина М. Ф.. Харьков: Харьк. нац. ун-т радиоэлектроники; Бизнес Информ, 2002. 426 с. 2. *Довиак Р., Зрнич Д.* Доплеровские локаторы и метеорологические наблюдения. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 503 с. 3. *Литвин-Попович А.И.* Применение вейвлет-фильтрации для подавления земной помехи в РЛС вертикального зондирования атмосферы / А.И. Литвин-Попович, В.Н. Олейников // Прикладная радиоэлектроника. 2008. Т. 7, №1. С.30-36. 4. *Нарбут В.П.* О влиянии противофоновых отражающих экранов на боковое излучение зеркальных антенн // Радиотехника и электроника. 1976. №10. С. 2205-2210. 5. *Ямпольский В.Г., Фролов О.П., Антенны и ЭМС.* М.: Радио и связь, 1983. 272 с. 6. *Нечеткие* множества и теория возможностей / Под ред. Ягера Р. М.: Радио и связь, 1986. 408 с. 7. *Штовба С.Д.* Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М. Горячая линия, 2007. 288 с. 8. *Литвин-Попович А.И.* Параметризация спектров рассеянных сигналов в РЛС вертикального зондирования атмосферы / А.И. Литвин-Попович, В.Н. Олейников // Радиотехника. 2008. Вып. 152. С. 49-52.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 12.01.2010