

АДАПТИВНЫЕ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ РЛС ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

Литвин-Попович А.И., Олейников В.Н.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

61166, Харьков, пр. Ленина, 14, кафедра РЭС

Тел. 8(057)702-15-87, e-mail: andrey_res@ukr.net

Radar wind profilers are used widely for atmospheric state monitoring for means of an air transport meteorological support, ecological monitoring, and atmospheric physics studying. These systems used electromagnetic wave scattering on nonhomogenities of dielectric permeability. In comparison with target-detection radars, wind profilers are used to work with a lot weaker signals that cause some special aspects in the signal processing systems used there.

Радиолокационные системы вертикального зондирования атмосферы (РЛС ВЗ), наряду с системами радиоакустического зондирования (РАЗ), лазерными локационными системами (лидарами) и метеорологическими радиолокаторами (МРЛ) широко применяются для дистанционного мониторинга состояния атмосферы. Условия применимости и характеристики систем дистанционного зондирования обусловлены их принципом действия [1] – так, МРЛ неэффективен в отсутствии облачности или зон осадков, высотный диапазон системы РАЗ ограничен несколькими сотнями метров вследствие затухания акустической волны в атмосфере, а значительное поглощение оптических волн облаками ограничивает применимость лидаров. РЛС ВЗ, из рассматриваемых систем, обеспечивают работу в различных погодных условиях, включая осадки, при этом имея высотный диапазон обзора порядка до 16...18 км в зависимости от энергетического потенциала конкретной РЛС.

Работа РЛС ВЗ основана на рассеянии электромагнитных колебаний неоднородностями диэлектрической проницаемости атмосферы, образование которых обусловлено наличием атмосферной турбулентности. Эффективная площадь рассеяния (ЭПР) неоднородностей в импульсном объеме определяется как $\sigma_0 = \sigma_V \cdot V_u$, где $\sigma_V = 0,38 C_n^2 / \sqrt[3]{\lambda}$, структурная функция коэффициента преломления C_n^2 может быть аппроксимирована зависимостью $C_n^2 = 10^{-(15,5+0,2h)}$, а импульсный объем $V_u = \frac{h^2 \pi^2 \lambda^2 c \tau_u}{8 A_{эф}}$ [1,2] и имеет порядок 10^{-9} м^2 .

Малый уровень рассеянного сигнала приводит к необходимости применения последетекторного накопления энергии рассеянного сигнала.

Дополнительными факторами, влияющими на метрологические характеристики РЛС ВЗ, являются помехи: земная помеха (ЗП); мешающие отражения от летательных аппаратов, птиц и насекомых; промышленные помехи. Повышение требований к оперативности и точности оценивания метеопараметров и появление более совершенных аппаратурных и вычислительных средств создают предпосылки к разработке и внедрению более эффективных методов обработки сигналов в РЛС ВЗ.

Когерентное накопление энергии сигнала проводится во временной области путем усреднения N значений рассеянного сигнала с каждой из высот за определенный интервал времени. Выигрыш в отношении сигнал/шум составляет $\Delta q = 10 \cdot \log(N)$, при этом время накопления не должно превышать интервал стационарности рассеянного сигнала, который составляющий $T_k = 0,2 \lambda / \sigma_V$, где λ - длина волны РЛС, а σ_V^2 - дисперсия скоростей ветра в импульсном объеме [1]. Вместе с тем, диапазон однозначно определяемых скоростей зависит от времени накопления, что ограничивает кратность когерентного накопления. Промехи измерений для всех методов наблюдаются при выходе скорости ветра за пределы диапазона однозначного определения.

Поскольку необходимый диапазон измеряемых скоростей ветра определяется метеобстановкой, меняется во времени и непостоянен с высотой, целесообразно устанавливать кратность когерентного накопления для каждой из высот в отдельности, периоди-

чески обновляя оценки кратности накопления на основании оценок максимальной скорости ветра. Оценивание оптимального времени когерентного накопления производится по формуле $t = \frac{c \cdot n_p}{v_{\max} \cdot f_0}$, где n_p - количество точек в реализации, c - скорость света в вакууме, $v_{\max}$ - максимальная скорость ветра на данной высоте $v_{\max} = 3\sigma(v)$, f_0 - несущая частота РЛС. Оценивание $v_{\max}$ производится при малой кратности когерентного накопления, заведомо обеспечивающей однозначное измерение любых возможных скоростей ветра.

Некогерентное накопление реализуется путем суммирования N спектров [2]. При этом достигается выигрыш в отношении сигнал/шум $\Delta q = 10 \cdot \log(\sqrt{N})$, если изменение центральной частоты сигнала за время накопления не превышает ширины спектра сигнала. Целесообразно выбирать кратность некогерентного накопления для каждого высотного слоя в отдельности на основании анализа предыстории развития атмосферных процессов. На рисунке 1 приведена зависимость выигрыша в отношении сигнал/шум от диапазона скоростей при фиксированном суммарном времени накопления.

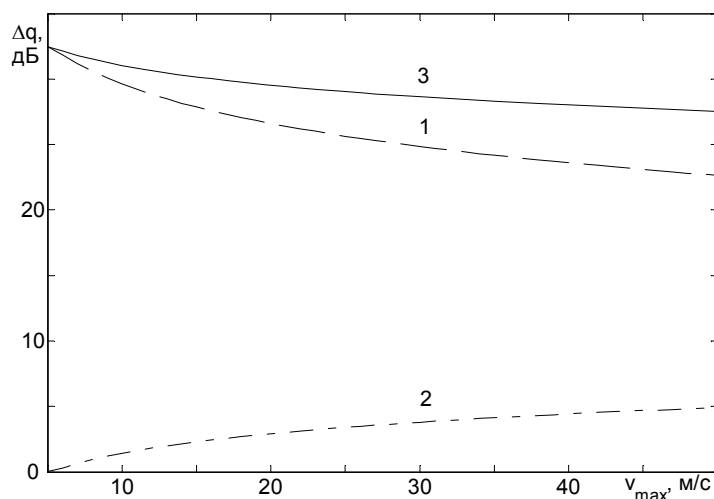


Рис. 1. Зависимость предельного выигрыша в отношении сигнал/шум, получаемого при когерентном (1), и некогерентном (2) накоплении, а также суммарного выигрыша при их совместном применении (3), от диапазона скоростей ветра

Земная помеха представляет собой отражение зондирующего сигнала от земной поверхности, зданий и сооружений, регистрируемое по боковым и задним лепесткам диаграммы направленности (ДН) антенны. Несмотря на значительное подавление ЗП боковыми лепестками ДН, превышение ЭПР земной поверхности над ЭПР атмосферных неоднородностей обуславливает отношение мощности ЗП к мощности рассеянного сигнала порядка 20...40дБ для малых высот. При этом погрешность параметризации спектров рассеянных сигналов значительно превосходит предельное значение, принятое в рекомендации ИКАО для систем метеобеспечения авиации [1], рис. 2.

Для снижения влияния ЗП на точность измерения метеопараметров, применяют как аппаратные (бленды на антеннах РЛС, дополнительный приемный канал с ненаправленной антенной), так и алгоритмические (различные режекторные фильтры) методы. Режекторные фильтры реализуют подавление ЗП в частотной области и обеспечивают значительный эффект, когда спектры ЗП и рассеянного сигнала не перекрываются. В случае частотного перекрытия, фильтр искажает рассеянный сигнал, что приводит к смещению оценок метеопараметров (рис. 3, 1 – без фильтра, 2,3 – режекторные фильтры).

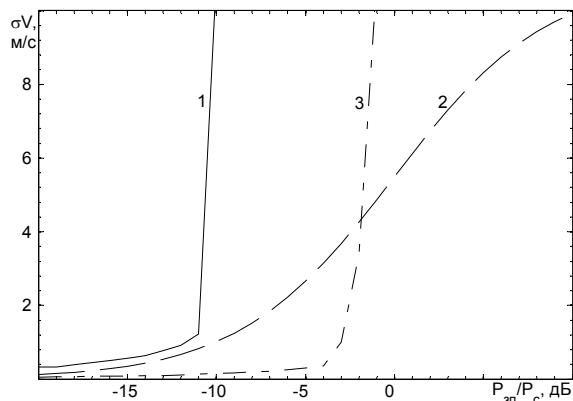


Рис. 2. Зависимость СКО оценки скорости ветра от отношения мощности ЗП к мощности рассеянного сигнала [4]

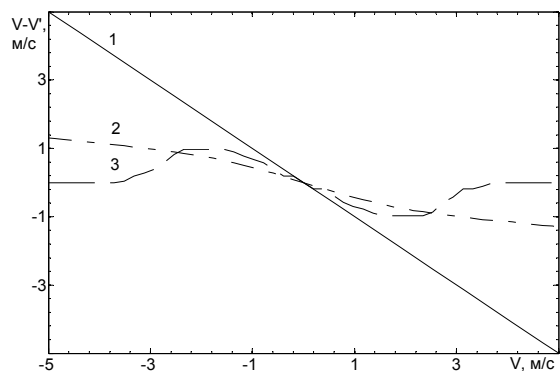


Рис. 3. Зависимость отклонения оценки скорости ветра от истинного значения скорости ветра. Отношение мощности ЗП к мощности рассеянного сигнала -5дБ.

Для подавления земной помехи может использоваться вейвлет-фильтр ([3], рис. 4). Принцип действия фильтра основан на ограничении коэффициентов вейвлет-разложения суммы рассеянного сигнала и земной помехи. По сравнению с методами, основанными на частотных спектрах сигналов, обеспечивается лучшее разделение коэффициентов.

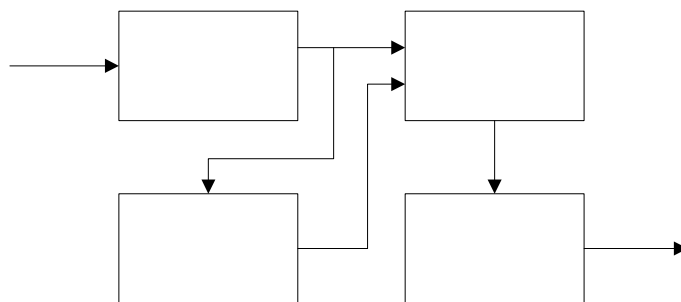


Рис. 4. Структурная схема вейвлет-фильтра земной помехи

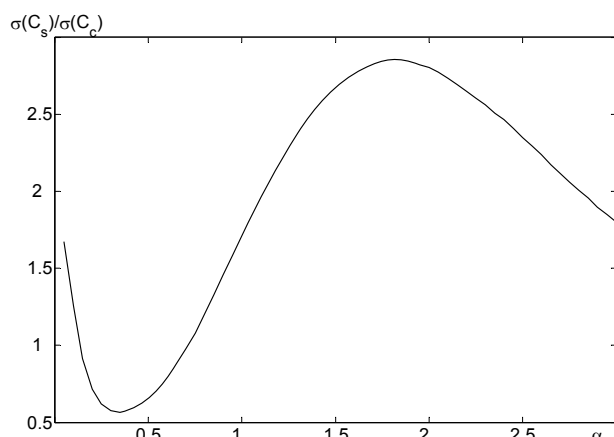


Рис. 5. Зависимость отношения СКО коэффициентов сигнала к СКО коэффициентов ЗП

Вейвлет выбирается из условия ускорения сходимости ряда результатов разложения, порог – из условия максимального отношения СКО коэффициентов разложения рассеянного сигнала к СКО коэффициентов разложения ЗП (рисунок 5). Наиболее предпочтительным из рассмотренных вейвлетов по итогам имитационного моделирования оказался DB3. Результаты имитационного моделирования процесса подавления ЗП приведены на рис. 6-7. Значение порога, соответствующего минимальной СКО оценки скорости ветра, согласуется с результатами, приведенными на рис. 6.

Вейвлет-фильтр с жестким ограничением коэффициентов [3] более эффективен в области значительных уровней ЗП, однако имеет большую остаточную погрешность в отсутствие ЗП.

Исходные
реализации

Дискретное
вейвлет-

преобразование

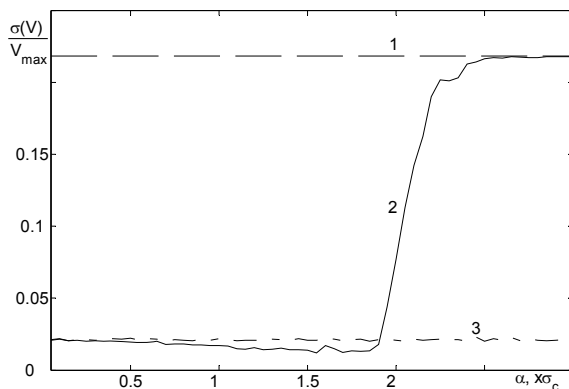


Рис. 6. Зависимость СКО оценки скорости ветра от порога ограничения. Входное отношение мощностей ЗП/сигнал 20 дБ, значение СКО без фильтра отмечено пунктиром (1). Вейвлет DB3, мягкое ограничение (2), жесткое ограничение (3)

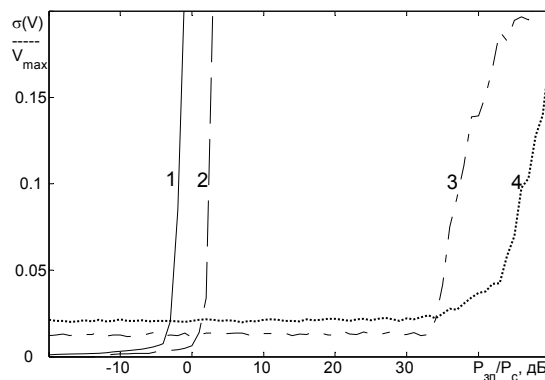


Рис. 7. Зависимость СКО оценки скорости ветра от отношения мощности ЗП к мощности рассеянного сигнала: 1 – без фильтра, 2 – режекторный фильтр, 3...4 – вейвлет-фильтры (3 – мягкое ограничение, 4 – жесткое ограничение)

Рассмотренный метод адаптивного управления кратностью накопления позволяет получить выигрыш в отношении сигнал/шум порядка 3...8 дБ по сравнению с постоянной кратностью за счет учета специфики среды распространения радиоволн. Вейвлет-фильтр земной помехи обеспечивает выигрыш в подавлении ЗП порядка 20 дБ по сравнению с режекторным фильтром, что позволяет снизить погрешность оценивания метеопараметров в приземном слое, где влияние земной помехи наиболее существенно.

Литература

1. Дистанционные методы и средства исследования процессов в атмосфере Земли / Под общ. ред. Б. Л. Кашеева, Е. Г. Прошкина, М. Ф. Лагутина. Харьков: Харьк. нац. ун-т радиоэлектроники; Бизнес Информ, 2002. 426 с.
2. Довиак Р., Зрнич Д. Доплеровские локаторы и метеорологические наблюдения. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 503 с.
3. Volker Lehmann and Gerd Teschke. Wavelet based methods for improved wind profiler signal processing. Ann. Geophysicae, 19,825-836, 2001.