

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ РЛС ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

А.И. ЛИТВИН-ПОПОВИЧ, В.Н. ОЛЕЙНИКОВ

В работе рассмотрены методы повышения метрологических характеристик РЛС вертикального зондирования. Предложено использовать адаптивное управление кратностью когерентного и некогерентного накопления энергии рассеянного сигнала. Приведены результаты имитационного моделирования процесса обработки рассеянных сигналов.

This article highlights the experimental research results on the radio-probe station characteristics improvement. Target-to-clutter ratio was computed. Adaptive control proposed to be applied. Simulation model of the returned signal processing was implemented. The test data are presented.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение требований к оперативности и точности измерения метеопараметров привело к значительным усовершенствованиям систем метеорологического обеспечения в последние десятилетия. На смену станциям аэрологического зондирования приходят радиолокационные станции вертикального зондирования атмосферы (РЛС ВЗ), которые обеспечивают достаточно высокую точность оценивания направления и скорости ветра в тропосфере и нижней стратосфере, обладают временным разрешением порядка единиц минут и работоспособны при практически любых погодных условиях. Особенностью РЛС ВЗ является работа при крайне низком отношении сигнал/шум, что обусловлено малой эффективной площадью рассеяния атмосферных неоднородностей. Информативными параметрами рассеянных сигналов в РЛС ВЗ являются доплеровский сдвиг частоты, спектральная ширина и мощность рассеянного сигнала. Оценка этих параметров (параметризация) производится по спектру рассеянного сигнала. Флуктуационная погрешность определения доплеровского смещения частоты и других параметров при параметризации спектров определяется отношением сигнал/шум, поэтому для его повышения в процессе обработки рассеянных сигналов применяются цифровые методы обработки.

1. АНАЛИЗ ОПТИМАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ КОГЕРЕНТНОГО НАКОПЛЕНИЯ

Одним из методов повышения отношения сигнал/шум является когерентное накопление. Эта операция представляет собой суммирование реализаций рассеянного сигнала. При суммировании N реализаций (кратность когерентного накопления N) получаемый энергетический выигрыш может достигать N раз. Это справедливо для случаев, когда время накопления меньше интервала стационарности рассеянного сигнала. Интервал стационарности атмосферных процессов оценивается как $T_k = 0,2\lambda/\sigma_V$ [1,3], где λ — длина волны РЛС, а σ_V^2 — дисперсия скоростей ветра в импульсном объеме, имеющая порядок 1м/с

в приземном слое атмосферы [1]. При этом максимальная кратность когерентного накопления составляет $N_{\max} = \frac{0,1c\lambda}{h_{\max}\sigma_V}$.

Кратность когерентного накопления также определяет диапазон однозначно определяемых скоростей [2]. Максимальная однозначно определяемая скорость для системы с когерентным накоплением кратности N определяется как

$$v_{\max} = \frac{c^2}{2h_{\max}f_0N}. \text{ При превышении значением}$$

скорости ветра диапазона однозначного определения возникают промахи измерений, обусловленные неоднозначностью измерения скорости ветра. Для ряда методов параметризации спектров, в частности, для метода моментов и метода наименьших квадратов (МНК) [4] характерно наличие краевых эффектов. Краевые эффекты приводят к возрастанию погрешностей оценивания скорости ветра при приближении значения скорости к границам диапазона однозначно определяемых скоростей. Таким образом, при малых кратностях когерентного накопления погрешности оценивания метеопараметров возрастают за счет малого отношения сигнал/шум, а при больших кратностях — за счет краевых эффектов и ограничения диапазона однозначно определяемых скоростей. Получение оперативных оценок скорости ветра с заданной точностью ограничивает максимальную кратность когерентного накопления. Целесообразно использовать максимальную кратность когерентного накопления, при которой выполняется условие стационарности рассеянного сигнала, и регистрируемая скорость ветра попадает в диапазон однозначно определяемых скоростей.

Оптимальное время накопления $t = TNn_p$, где n_p — количество отсчетов в реализации рассеянного сигнала, отсюда:

$$t = \frac{cn_p}{v_{\max}f_0}. \quad (1)$$

Данный параметр более информативен по сравнению с оптимальной кратностью когерентного накопления, поскольку его значение не зависит от высотного диапазона зондирования.

Вопрос об оптимальности выбранного времени когерентного накопления был исследован методом имитационного моделирования. В качестве меры оптимальности времени накопления выбран минимум среднеквадратического отклонения (СКО) оценки скорости ветра от заданного

в модели значения: $\sigma_V = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (v_i - v'_i)^2}$ [1].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование проводилось для РЛС ВЗ дециметрового диапазона, параметры которой приведены в [1]. При этом, исходя из данных о параметрах станции, был построен высотный профиль отношения сигнал/шум, который использовался при моделировании. Мощность рассеянного сигнала определяется структурной характеристикой флуктуаций коэффициента преломления C_n^2 , которая существенно зависит от состояния атмосферы, однако может в среднем быть аппроксимирована выражением [1]:

$$C_n^2 = 10^{-(15,5+0,2h)} \quad (2)$$

Зависимости СКО от времени накопления для различных высот зондирования приведены на рис. 1, 2. Условные обозначения: 1 – параметризация методом максимумов, 2 – методом моментов, 3 – циклическим методом моментов, 4 – МНК, 5 – циклическим МНК. Отношение сигнал/шум до накопления принято равным $q_0 = -20$ дБ.

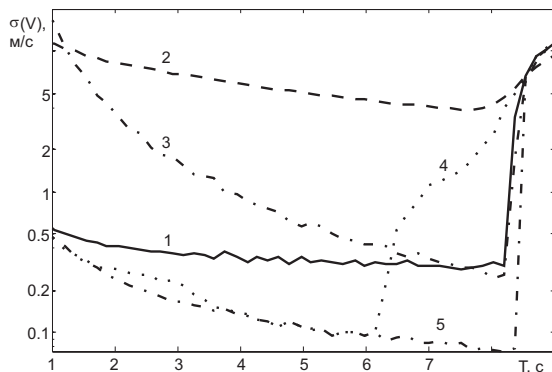


Рис. 1. Зависимость СКО оценки скорости ветра от времени когерентного накопления

Анализ результатов моделирования показывает, что погрешность монотонно уменьшается с увеличением времени накопления. При времени накопления (1), соответствующем диапазону измеряемых скоростей, заданному в модели, погрешность скачкообразно возрастает. Это вызвано промахами измерения скорости ветра при ее выходе за пределы диапазона однозначного определения. Для методов, имеющих ярко выраженные краевые эффекты [4], минимум погрешности достигается при меньшем времени когерентного накопления. При этом отношении сигнал-шум меньше, чем для методов без краевых эффектов, что приводит к увеличению флуктуационной погрешности. Для методов с краевыми эффектами кратность когерентного накопления целесообразно уменьшить.

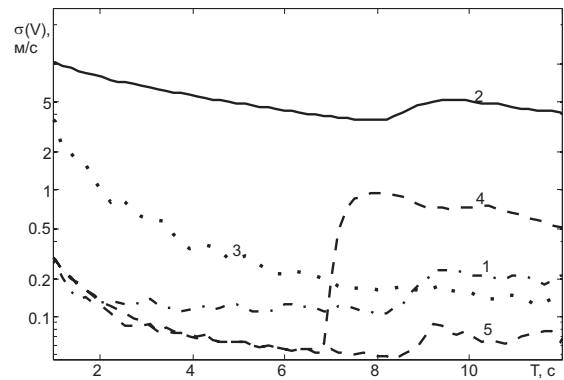


Рис. 2. Зависимость СКО оценки скорости ветра от времени когерентного накопления (после устранения неоднозначности отсчета скорости)

Устранение неоднозначности отсчета скорости ветра основывается на грубой оценке скорости ветра по данным, полученным с малой кратностью когерентного накопления. Значительные краевые эффекты у метода моментов (кривая 2) и МНК (кривая 4) вызывают повышение остаточной погрешности.

Устранение неоднозначности снижает погрешность оценивания скорости ветра при времени накопления больше оптимального. Однако погрешность в таком случае все же больше, чем при оптимальном времени накопления. Исходя из этого, применение мер по устранению неоднозначности отсчета скорости ветра нецелесообразно. Более эффективным способом снижения погрешностей оценивания скорости ветра, как показало моделирование, является правильный выбор диапазона измеряемых скоростей.

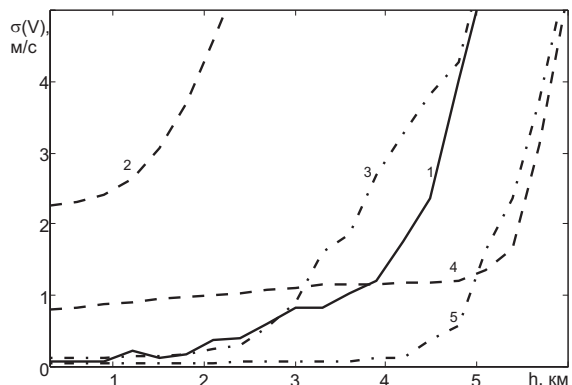


Рис. 3. Высотный профиль СКО оценки скорости ветра для $T=7$ сек

Анализ высотного профиля СКО оценки скорости ветра для рассматриваемых методов параметризации для нескольких значений времени накопления показывает, что методы параметризации со значительными краевыми эффектами обеспечивают большую погрешность оценивания скорости ветра по сравнению с методами, использующими представление спектров рассеянных сигналов в полярных координатах [4].

Диапазон флуктуаций скорости ветра определяется состоянием атмосферы. Распределение скоростей различно для разных высотных слоев и непостоянно со временем. В связи с этим целесообразно изменять кратность когерентного накоп-

ления на основе анализа статистики изменения высотного профиля скорости ветра. Это возможно осуществить при реализации итерационного алгоритма обработки сигнала. Вначале используется малая кратность когерентного накопления и обеспечивается грубая оценка максимальной скорости ветра на основании анализа статистики оцененных скоростей ветра. Далее используется переменная кратность накопления, определяемая исходя из ранее полученных оценок, и производится уточнение оценок моментов спектра рассеянных сигналов.

В наиболее распространенных системах вертикального зондирования когерентное накопление выполняется в специализированном вычислительном устройстве [1]. Это позволяет сократить поток данных, поступающих в систему обработки сигналов РЛС ВЗ, что снижает требования к аппаратным ресурсам. Вместе с тем, устройство препроцессорной обработки имеет жесткую архитектуру и не позволяет реализовывать когерентное накопление с различной кратностью для разных высот, что, как видно из результатов моделирования, необходимо для минимизации погрешности оценивания метеопараметров во всем высотном диапазоне.

3. АППАРАТУРНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РЛС ВЗ

Анализ статистики изменения скорости ветра в тропосфере по данным зондирования показывает, что высотный градиент скоростей часто незначителен по сравнению с максимальным значением скорости ветра в высотном диапазоне зондирования. Это обусловлено инерционностью атмосферы. На рис. 4 приведена статистика высотного распределения скоростей ветра за период наблюдения 10 часов.

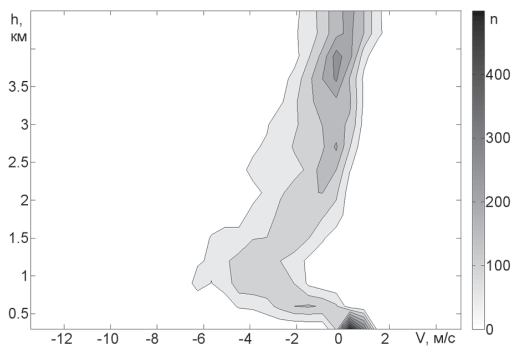


Рис. 4. Статистика распределения скоростей ветра для натурального эксперимента

Из результатов п. 2 следует, что оптимальная кратность накопления зависит от диапазона однозначного определения скоростей. Более узкий диапазон скоростей позволяет реализовать больший выигрыш в отношении сигнал/шум. Сокращение максимального по модулю значения скорости ветра достигается путем смещения всего диапазона так, чтобы он был центрирован относительно нулевой частоты.

Аналого-цифровое преобразование рассеянных сигналов в РЛС ВЗ может производиться путем оцифровки на промежуточной частоте (ПЧ), путем оцифровки в квадратурных каналах [1, 2] или оцифровки на пониженной частоте, полученной переносом сигнала промежуточной частоты. Из этих трех методов, оцифровка на ПЧ с цифровым формированием сигналов квадратурных каналов дает наиболее широкие возможности по организации предлагаемого метода обработки. Это обусловлено простотой реализации дополнительного переноса спектра рассеянного сигнала умножением на комплексную экспоненту [5]. Схема устройства регистрации рассеянных сигналов с оцифровкой на ПЧ приведена на рис. 5.

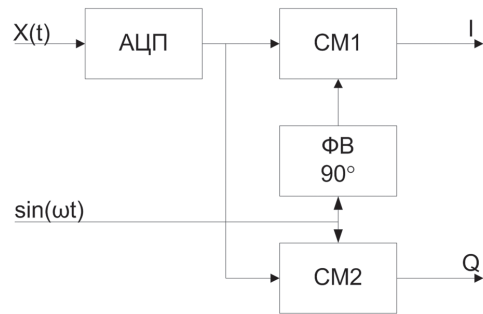


Рис. 5. Схема устройства регистрации рассеянных сигналов с оцифровкой на промежуточной частоте

В исходной схеме частота сигнала, подаваемого на второй вход смесителей $\omega = \omega_{ПЧ}$. Для центрирования профиля скорости ветра достаточно изменить частоту ω таким образом, чтобы $\omega = \omega_{ПЧ} + \omega_{СР}$, где $\omega_{ПЧ}$ – промежуточная частота, а $\omega_{СР} = \frac{4 \cdot \pi \cdot \bar{v}}{c} \cdot f_0$, \bar{v} – средняя скорость ветра в высотном диапазоне зондирования, f_0 – несущая частота РЛС ВЗ. Оценка распределения скоростей производится при обработке рассеянных сигналов. Значение средней скорости добавляется к оценкам, полученным в результате параметризации.

Величина получаемого выигрыша существенно зависит от статистики высотного распределения скорости ветра. На рис. 6 приведена зависимость получаемого выигрыша в отношении сигнал/шум от высотного градиента скорости ветра.

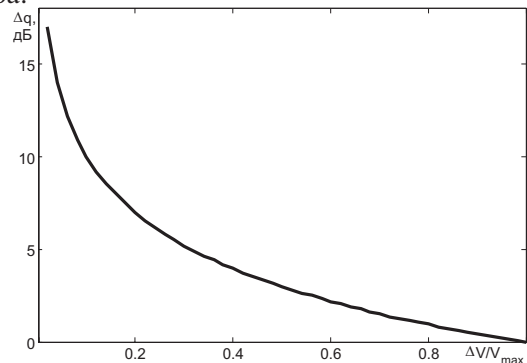


Рис. 6. Зависимость полученного выигрыша в отношении сигнал/шум от характеристик ветрового режима тропосферы

4. НАКОПЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ СИГНАЛА

Существует два способа реализации некогерентного накопления – накопление огибающих рассеянных сигналов после детектора или накопление амплитудных спектров рассеянных сигналов [2]. Обеспечиваемый выигрыш в отношении сигнал/шум оценивается как \sqrt{N} раз при накоплении N спектров. Выигрыш обеспечивается при условии, что среднеквадратическое отклонение скорости ветра от его среднего за время накопления значения не превысило спектральную ширину рассеянного сигнала [1]:

$$\sigma(v) \leq \sigma_V. \quad (3)$$

Спектральная ширина рассеянного сигнала существенно зависит от характеристик атмосферной турбулентности. Значение спектральной ширины возрастает с увеличением степени турбулизованности атмосферы. Кратность некогерентного накопления зависит от суммарного времени накопления, а также от выполнимости условия (3).

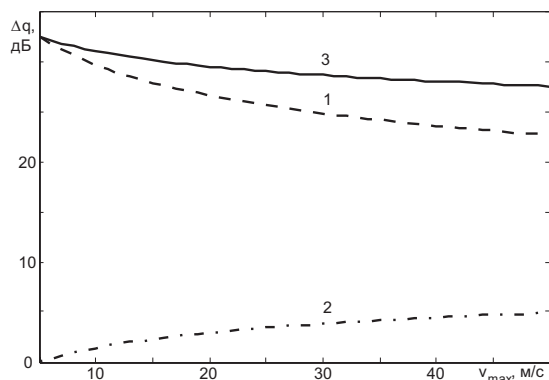


Рис. 7. Зависимость предельного выигрыша в отношении сигнал/шум, получаемого при когерентном (1) и некогерентном (2) накоплении, а также суммарного выигрыша при их совместном применении (3), от диапазона однозначно определяемых скоростей ветра

Зависимость выигрыша, обеспечиваемого накоплением энергии сигнала, от диапазона измеряемых скоростей приведена на рис. 7. При этом кратность когерентного накопления определяется исходя из заданного диапазона скоростей согласно (1), а суммарное время получения оценки скорости ветра фиксировано и составляет $t = \frac{2h_{\max} N_K N_H n_p}{c}$, где N_K – кратность когерентного накопления, а N_H – кратность некогерентного накопления.

При прочих равных условиях выгоднее увеличивать кратность когерентного накопления, поскольку тот же выигрыш в отношении сигнал/

шум достигается при меньшем суммарном времени накопления.

ВЫВОДЫ

Проведенный анализ показал, что оптимальное время когерентного и некогерентного накопления существенно зависит от состояния атмосферы. Для достижения минимального среднего значения СКО скорости ветра по всему высотному диапазону целесообразно определять оптимальное время накопления для каждого высотного слоя на основе проводимого анализа динамики изменения скорости ветра. Величина полученного выигрыша определяется параметрами ветрового режима атмосферы. При этом кратность когерентного накопления может быть повышена, вследствие чего получается дополнительный выигрыш в отношении сигнал/шум.

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] *Strauch R. G.* Data analyses techniques: spectral processing // Handbook for middle atmosphere program. – Urbana, Illinois. – 1983. – Vol. 9. – P. 528-531.
- [4] *А.И.Литвин-Попович, В.Н.Олейников.* Параметризация спектров сигналов в радиолокационных станциях вертикального зондирования атмосферы. // Радиотехника, 2008, вып. 152. – С. 49-52.
- [5] *Сергиенко А.Б.* Цифровая обработка сигналов: Учебник для вузов. 2-е изд. – СПб.: Питер, 2006. – 751 с.: ил.

Поступила в редколлегию 21.11.2008



Литвин-Попович Андрей Игоревич, аспирант кафедры РЭС Харьковского национального университета радиоэлектроники. Научные интересы: цифровая обработка радиолокационных сигналов.



Олейников Владимир Николаевич, кандидат технических наук, профессор кафедры РЭС Харьковского национального университета радиоэлектроники. Научные интересы: радиолокационные методы исследования атмосферных динамических процессов.