

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В АТМОСФЕРНЫХ РЛС ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Постановка задачи

Для получения информации о высотных профилях скорости ветра, температуры и среднеквадратических пульсаций скорости ветра в атмосферном пограничном слое (АПС) бесконтактными методами применяются радио-, радиоакустические и акустические РЛС вертикального зондирования. В подобных РЛС информация о скорости ветра, его среднеквадратических пульсациях и температуре содержится в первых двух моментах доплеровских вариаций спектральной плотности мощности (СПМ) принимаемых сигналов. При этом одно из основных требований к радиолокационным системам вертикального зондирования атмосферы, используемым для метеорологического обеспечения полетов – получение достоверных результатов в реальном масштабе времени. Поэтому для подобных РЛС актуальна задача уменьшения времени оценивания нулевого и первых двух моментов доплеровских вариаций СПМ принимаемых сигналов.

При оценивании первых двух моментов СПМ в соответствии с [1] выполняются следующие этапы обработки принятого сигнала:

- 1) производится квадратурная обработка принимаемого сигнала с дискретизацией по времени и квантованием по уровню квадратурных составляющих;
- 2) рассчитывается СПМ по временной выборке длиной в N отсчетов одним из классических либо неклассических методов [2];
- 3) оцениваются первые два момента СПМ одним из методов параметрического оценивания. При параметрическом оценивании СПМ в качестве аппроксимирующей кривой согласно работе Вудмана [3] используется гауссоида

$$S(f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(f-f_0)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (1)$$

где f_0 – центральная частота спектра отраженного сигнала; σ – половина ширины спектрального максимума по уровню 0.607; f – отклонение частоты от центральной.

Для уменьшения времени спектральной и параметрической обработки принимаемых сигналов необходимо снижать вычислительную сложность второго и третьего этапов обработки.

Следует отметить, что при практической реализации вычисления СПМ наиболее часто используются быстрое преобразование Фурье (БПФ) и периодограммный метод Уэлча, а при параметрическом оценивании – метод наименьших квадратов (НК) и метод моментов. Применение трех последних методов связано с их малой чувствительностью к влиянию шума на результат вычисления СПМ и параметрического оценивания по сравнению с другими методами, как показано в работах [2,4,5]. Поэтому сравнительный анализ вычислительных затрат на вычисление СПМ и параметрическое оценивание при длинах временных выборок квадратурных составляющих от $N=64$ до $N=4096$ отсчетов проведем только для вышеперечисленных методов. Результаты анализа представлены на рис. 1. На данном рисунке при расчете СПМ кривой 1 соответствует количество операций сложения и умножения при использовании БПФ; кривой 2 – периодограммного метода Уэлча; кривой 3 – неклассический метод расчета СПМ по коэффициентам авторегрессии (АР), найденным с использованием алгоритма Берга; кривой 4 – с использованием ковариационного алгоритма. Количеству операций при параметрическом оценивании по методу НК соответствует кривая 5, а по методу моментов – кривая 6.

Анализ рис. 1 показывает, что методы параметрического оценивания, которые наиболее часто применяются, по вычислительной сложности соизмеримы с вычислением СПМ. Кроме этого, особенность применения метода НК либо метода моментов заключается в том, что для получения достоверных результатов параметрического оценивания при малых отношениях сигнал/шум необходимо:

- выполнять параметрическое оценивание перекрывающихся участков выборочной СПМ;
- для метода наименьших квадратов построить функцию минимизации среднеквадратической ошибки аппроксимации

$$f_{\min}(\sigma, f_0) = \min \{S'(f) - S(f)\}^2,$$

где $S'(f)$ – выборочная СПМ.

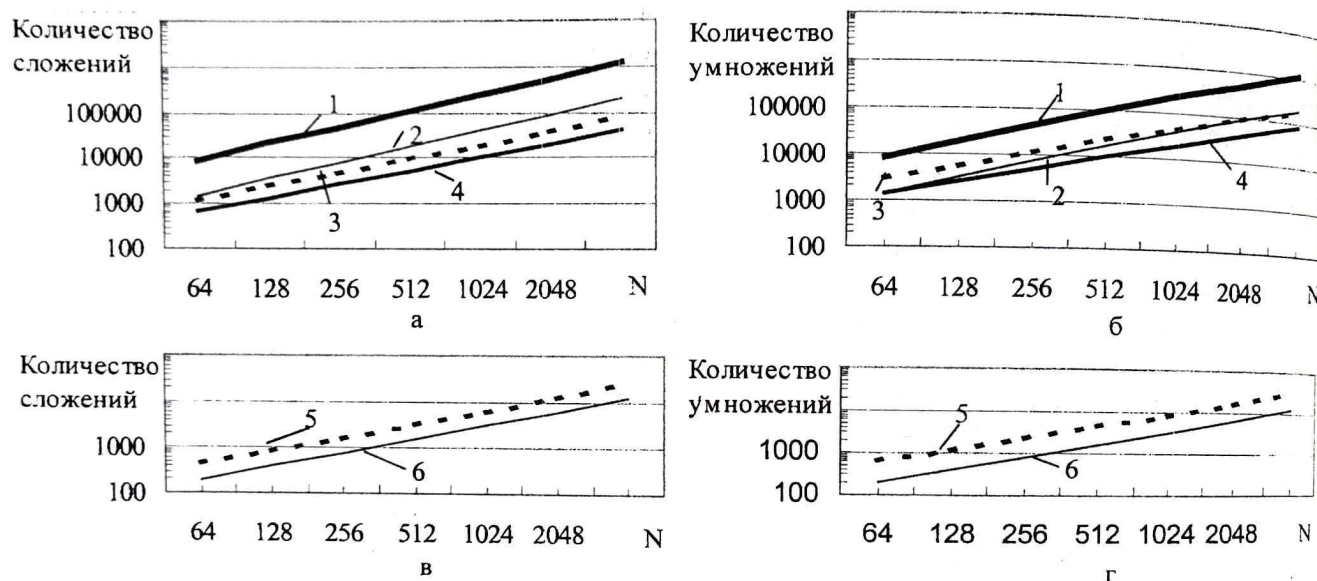


Рис. 1

Далее выбрать параметры аппроксимирующей гауссоиды (1), соответствующие минимуму функции $f_{\min}(\sigma, f_0)$. Для метода моментов необходимо построить функцию максимизации нулевого момента и определить значения σ и f_0 , соответствующие максимуму этой функции. Как следствие, значительно увеличивается вычислительная сложность параметрического оценивания. Так, например, если при построении функции минимизации среднеквадратической ошибки аппроксимации использовать 50 %-е перекрытие участков выборочной СПМ, количество операций сложения возрастет в 1.74 раза, умножения – 2 и деления в 1.08 раза.

Метод решения

Уменьшить вычислительные затраты на вычисление СПМ и параметрическое оценивание можно, имея априорную информацию о доплеровском смещении спектрального максимума рассеянного сигнала. Для этого предлагается оценивать 1-й момент СПМ с использованием АР анализа и в дальнейшем проводить параметрическое оценивание участка СПМ, содержащего главный максимум по методу НК либо методу моментов. Однако достичь уменьшения требуемого количества вычислительных операций при комбинированных методах можно только при использовании неклассических методов расчета СПМ. При их применении рассчитанные коэффициенты авторегрессии будут использоваться как для вычисления СПМ, так и для оценивания доплеровского смещения главного максимума. Следовательно, не требуется проведение значительных дополнительных вычислений (приблизительно 2/3 от общего числа операций, требуемого для вычисления коэффициентов АР и СПМ) при расчете коэффициентов авторегрессии.

На практике наибольший интерес представляют сигналы с одномодовым спектром (сигнал, отраженный от ясного неба) и с двумодовым спектром (в спектре присутствуют отражения от птиц, остатки земной помехи). Поэтому остановимся на рассмотрении именно этих сигналов.

В работе [6] получены выражения, связывающие параметры СПМ (центральную частоту моды и ее ширину по половинному уровню мощности) с выборочными коэффициентами АР для одномодового процесса

$$\begin{aligned}\Phi_c[1] &= e^{-2 \cdot \pi \cdot \Delta f \cdot T / 2} \cos(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot T), \\ \Phi_s[1] &= e^{-2 \cdot \pi \cdot \Delta f \cdot T / 2} \sin(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot T),\end{aligned}\quad (3)$$

где f_0 – центральная частота моды; T – период следования отсчетов во временной выборке; $\Phi_c[1], \Phi_s[1]$ – косинусная и синусная составляющие комплексного коэффициента авторегрессии первого порядка; Δf – ширина полосы моды по уровню 0.5 СПМ.

Из (1) получаем, что

$$\begin{aligned}f_0 &= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot T} \arctan\left(\frac{\Phi_s[1]}{\Phi_c[1]}\right), \\ \Delta f &= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot T} \ln\left(\frac{\Phi_c[1]}{\Phi_s[1]} \tan(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot T)\right).\end{aligned}\quad (4)$$

Ширина полосы Δf связана с σ соотношением

$$\sigma = \sqrt{-\Delta f^2 / (2 \cdot \ln(0.5))}. \quad (5)$$

Определяя выигрыш по вычислительным затратам, который обеспечивают предложенные комбинированные методы, учтем, что при вычислении значений функций $\tan$, $\arctan$, $\ln$, $\exp$ с использованием стандартных рядов разложения достаточно ограничиться четвертым членом. Результаты расчета необходимого количества операций умножения, сложения и деления представлены на рис. 2.

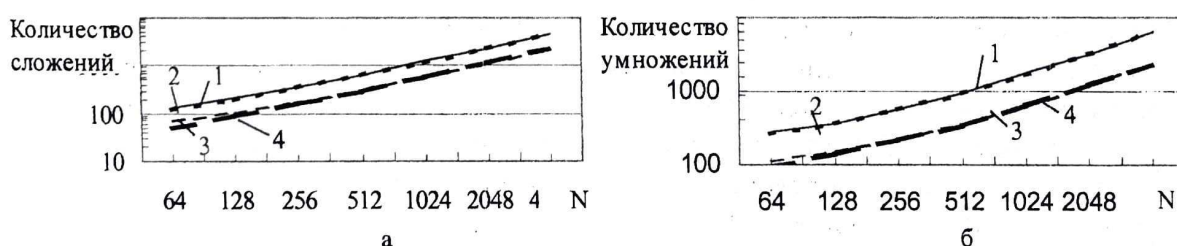


Рис. 2

На рис. 2 кривой 1 соответствует требуемое количество математических операций при комбинации метода наименьших квадратов и АР-анализа с использованием модели АР первого порядка; кривой 2 – метода НК- и АР-анализа с использованием модели АР второго порядка; кривой 3 – метода моментов и АР-анализа с использованием модели АР первого порядка; кривой 4 – метода моментов и АР-анализа с использованием модели АР второго порядка.

Анализируя рис. 2, можно сделать вывод, что комбинация метода НК- и АР-анализа при параметрическом оценивании в диапазоне отношений сигнал/шум свыше 10 позволяет уменьшить необходимое количество операций сложения в 3,5...5,3 раз при длинах временных выборок от 64 до 4096 отсчетов соответственно. Общее количество операций умножения и деления уменьшается в 2,1...5,2 раз соответственно. Комбинация метода моментов и

АР- анализа позволяет уменьшить количество операций сложения в 4,1...5,3 раз, а умножения и деления – в 1,65...5,15 раза при тех же длинах временных выборок. При малых отношениях сигнал/шум (меньше 10) выигрыш от применения комбинированных методов увеличивается еще в 2 раза.

В случае двумодового процесса, воспользовавшись формулой для расчета СПМ по коэффициентам АР [2], получаем

$$S(f) = \frac{\rho_w^2}{|1 - \dot{\Phi}_1 \cdot z^{-1} - \dot{\Phi}_2 \cdot z^{-2}|^2} = \frac{\rho_w^2}{|z^2 - \dot{\Phi}_1 \cdot z - \dot{\Phi}_2|^2}, \quad (6)$$

где $z = e^{j \cdot 2\pi \cdot f \cdot T}$; $\dot{\Phi}_1, \dot{\Phi}_2$ – комплексные коэффициенты АР; ρ_w – дисперсия шумов предсказания.

Так как максимумам $S(f)$ соответствуют нули квадратного уравнения $z^2 - \dot{\Phi}_1 \cdot z - \dot{\Phi}_2 = 0$, то, рассчитав корни p_1 и p_2 этого уравнения,

$$p_{1,2} = \frac{\dot{\Phi}_1 \pm \sqrt{\dot{\Phi}_1^2 + 4 \cdot \dot{\Phi}_2}}{2}, \quad (7)$$

можно определить частоты мод

$$f_1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot T} \arctan\left(\frac{\text{Im}(p_1)}{\text{Re}(p_1)}\right), \quad (8)$$

$$f_2 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot T} \arctan\left(\frac{\text{Im}(p_2)}{\text{Re}(p_2)}\right).$$

Результаты расчета необходимого количества математических операций для двумодового процесса приведены на рис. 2. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что комбинация метода НК и модели АР в диапазоне отношений сигнал/шум выше 10 позволяет уменьшить необходимое количество операций сложения в 2,6÷5,2 раз при длинах временных выборок от 64 отсчетов до 4096 отсчетов соответственно. Общее количество операций умножения и деления уменьшается в 1,87÷5,15 раз соответственно. При комбинации метода моментов и модели АР количество операций сложения уменьшается в 2÷5,2 раз, а умножения и деления в 1,72÷5,18 при тех же длинах временных выборок. При отношении сигнал/шум менее 10 выигрыш в требуемом количестве математических операций от применения комбинированных методов увеличивается еще в два раза.

Не менее важным результатом применения комбинированного метода, вытекающим из выражения для расчета СПМ (6), является уменьшение требуемого количества вычислений при расчете СПМ неклассическими методами. В отличие от БПФ, используя выражение (6), можно не вычислять все N отсчетов СПМ, а рассчитать лишь те отсчеты СПМ, которые соответствуют главному максимуму. Так, например, если при длинах временных выборок от 64 до 4096 отсчетов рассчитывать 3/16 от общего числа отсчетов СПМ, соответствующие главному максимуму, то применение комбинированных методов позволяет уменьшить количество операций сложения в 2,3 раза (для алгоритма Берга) и в 1,25 раз (для ковариационного алгоритма), а общее количество операций умножения и деления уменьшается в 2,7 раз и 1,6 раз соответственно.

Для экспериментальной проверки предлагаемого способа сокращения времени обработки отраженного сигнала на фоне шумов использовалась модель рассеянного сигнала, в соответствии с которой был сгенерирован ансамбль из 100 временных реализаций случайного

процесса. Длина каждой реализации – 128 отсчетов. Параметры СПМ, описываемой функцией (1) следующие: центральная частота – $f_0 = (10/128) \cdot f_d$; ширина спектрального максимума $\sigma = (4/128) \cdot f_d$, где f_d – частота следования отсчетов.

К каждой реализации сигнала добавлен аддитивный белый гауссов шум. В диапазоне отношений сигнал/шум от 1 до 10 рассчитана выборочная СПМ ковариационным методом и проведено параметрическое оценивание СПМ методами: моментов, наименьших квадратов, комбинированными методами. По выборочным оценкам σ и f_0 рассчитаны среднеквадратические отклонения выборочных оценок (СКО) от задаваемых. Результаты сравнительных вычислений СКО при применении метода наименьших квадратов и моментов, а также их комбинаций с АР-анализом представлены на рис. 3. На рис. 3 кривой 1 соответствует комбинация метода наименьших квадратов и АР-анализа; кривой 2 – метод наименьших квадратов; кривой 3 – комбинация метода моментов и АР анализа; кривой 4 – метод моментов.

Анализируя зависимости на рис. 3, можно сделать вывод, что при оценивании ширины полосы спектрального максимума σ комбинированными методами наблюдается уменьшение погрешности оценки на 1.5% при отношении сигнал/шум 1. С ростом отношения сигнал/шум уменьшение погрешности составляет 0.5...0.1%. При оценивании доплеровского сдвига комбинированными методами погрешность оценки уменьшается на 0.4...0.1%.

Апробация метода была проведена на временных реализациях сигналов, отраженных от турбулентной атмосферы, на выходе квадратурного детектора стратосферно-тропосферной РЛС вертикального зондирования.

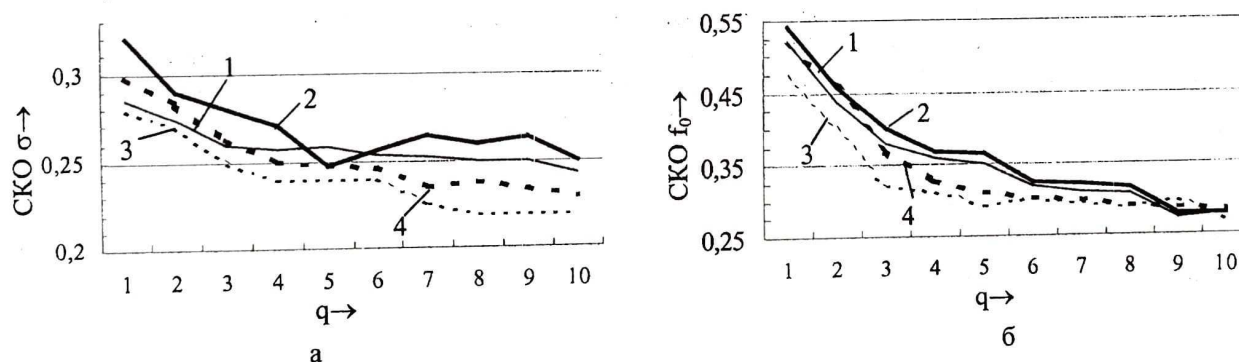


Рис. 3

Анализ результатов показал, что при параметрическом оценивании среднеквадратических пульсаций скорости ветра методами наименьших квадратов, моментов и комбинированными методами величина σ отличается не более чем на 1%, а результаты оценивания скорости ветра отличаются не более чем на 0,45%.

Научная новизна полученных результатов

- 1) Для сокращения числа вычислительных операций и, следовательно, времени выполнения параметрического оценивания первых двух моментов СПМ доплеровских вариаций отраженного сигнала в РЛС вертикального зондирования предложены комбинированные методы: НК с авторегрессионным анализом и моментов с авторегрессионным анализом. Применение первого комбинированного метода позволяет уменьшить общее число операций сложения, умножения и деления в 2,8-5,25 раз при использовании модели АР 1-го порядка для анализа временных выборок длительностью 64-4096 отсчетов соответственно. При использовании модели АР 2-го порядка общее количество математических операций уменьшается в 2,2-5,17 раз соответственно. Применение второго комбинированного метода позволяет снизить общее количество операций сложения, умножения и деления в 2,8-5,2 раза при использовании модели АР 1-го порядка и в 1,8-5,2 раза при использовании модели АР 2-го порядка для анализа временных выборок той же длительности.
- 2) При отношениях сигнал/шум меньше 10 выигрыш в требуемом количестве математических операций увеличивается еще в 2 раза.

- 3) Предлагаемые комбинированные методы позволяют уменьшить число операций при числении СПМ в 1,4-2,5 раза в зависимости от применяемого алгоритма для расчета коэффициентов авторегрессии.
- 4) Комбинированные методы позволяют уменьшить погрешность измерения скорости и его среднеквадратических пульсаций на 1,5-0,1% в диапазоне отношений сигнал/шум 1 до 10 соответственно.

Практическая ценность полученных результатов

Полученные результаты позволяют расширить функциональные возможности радиоакустических и акустических РЛС вертикального зондирования, то есть, например, увеличить количество обрабатываемых высот зондирования при тех же аппаратных возможностях систем, либо снизить стоимость таких систем за счет уменьшения аппаратной сложности при неизменных функциональных возможностях систем благодаря предложенным программным методам обработки принимаемых сигналов.

Список литературы: 1. *Pekour M.S.* Removal of bird contamination in wind profiler signal spectra / *Proceedings of the 3rd symposium on acoustic remote sensing of the atmosphere and oceans*. 1998. С. 80-83. 2. *Бокс Дж., Дженкинс* Анализ временных рядов. Прогноз и управление: Пер. с англ. Вып. 1 / Под ред. В.Ф. Писаренко. М.: Мир, 1979. 406 с. 3. *Woodman R.F.*, Spectral moment estimation in MST radars, *Radio Sci.*, 1985, 20(6), P. 1185 – 1195. 4. *Moru Yamamoto, Toru Sato, Peter T / May, Toshitaka Tsuda, Shoichiro Fukao, Susumo Kato* Estimation error of spectral parameters of mesosphere-stratosphere-troposphere radars obtained by least fitting method and its lower bound, *Radio Science*, Volume 23, 1988, P. 1013 – 1021. 5. *Young Bok, Song Park* // Estimation of mean frequency and variance of ultrasonic Doppler signal by using second-order autoregressive model. 1991 *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control* Vol. 32, N. 3. 6. *Кармалита В.А.* Цифровая обработка случайных колебаний. М.: Машиностроение, 1986. 88 с.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 21.10.2003