

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ВЕТРА И ОЦЕНКА ТУРБУЛЕНТНОСТИ АТМОСФЕРЫ МЕТОДАМИ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА В АТМОСФЕРНЫХ РЛС ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Атмосферные РЛС вертикального зондирования (РЛС ВЗ) являются на сегодняшний день техническим средством, обеспечивающим наилучшие точность, высотное и временное разрешение, вертикальный диапазон высот при измерении скорости ветра в тропосфере. В материалах международных программ, посвященных атмосферным РЛС вертикального зондирования атмосферы, подчеркивается необходимость совершенствования аппаратуры и методики обработки сигналов в них, повышения достоверности получаемых данных.

Один из методов получения информации о динамических параметрах атмосферы – параметрическое оценивание спектральной плотности мощности (СПМ) сигналов, рассеянных от турбулентной атмосферы в случае радиозондирования либо отраженных от акустического пакета в случае радиоакустического зондирования.

В общем случае сигнал, отраженный от турбулизованного объема в пределах телесного угла диаграммы направленности антенны радиолокатора, на высоте H , представляется в виде

$$x(t) = A(t) \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + \varphi(t)), \quad (1)$$

где $A(t)$ – огибающая; $\varphi(t)$ – фаза, содержащая информацию о динамических параметрах атмосферы. В работах [1,2] показано, что огибающая (1) распределена по обобщенному закону Рэлея-Райса, а распределение плотности мощности спектра можно описать нормальным законом. При применении квадратурной обработки в совокупности с преобразованием выражения (1) в цифровую форму и временным усреднением отсчетов $x(t)$ формируется ряд комплексных значений

$$\dot{x}(k \cdot T) = A_r(k \cdot T) + j \cdot A_i(k \cdot T), \quad (2)$$

где T – временной интервал между соседними значениями ряда. Спектр мощности сигнала (2), полученного при радиозондировании атмосферы, является односторонним и содержит информацию о скорости ветра (доплеровское смещение спектрального максимума по частотной оси F_d), и турбулентности атмосферы (ширина спектрального максимума Δf). Точная аналитическая зависимость между шириной спектрального максимума и интенсивностью турбулентности до настоящего момента не получена, однако в работе [1] показана прямая зависимость Δf от интенсивности турбулентности (среднеквадратических пульсаций скорости ветра в турбулентном объеме). В работе [3] турбулентности в соответствии с величиной среднеквадратических пульсаций скорости ветра σ_v условно разделены на 4 класса: $\sigma_v \leq 0.5$ м/с – слабая турбулентность; $0.5 \text{ м/с} \leq \sigma_v \leq 2.5$ м/с – умеренная; $2.5 \text{ м/с} \leq \sigma_v \leq 4$ м/с – сильная; $\sigma_v > 4$ м/с – штормовая. Поэтому, определив диапазон возможных значений Δf отраженных сигналов по экспериментальным данным радиозондирования и разбив этот диапазон на 4 поддиапазона в соответствии с вышеприведенным делением по величине σ_v , можно оценочно классифицировать турбулентности по оцененному значению Δf .

Существуют классические и неклассические методы нахождения СПМ сигнала. К классическим относятся: быстрое преобразование Фурье, периодограммные методы Бартлетта и Уэлча с применением различных спектральных окон. К неклассическим относится метод построения авторегрессионного спектра процесса порядка p , коэффициенты которого определяются в результате решения уравнения Юла-Уокера, по алгоритму Берга, ковариационному алгоритму и т.д. Задача параметрического оценивания F_d и ширины спектрального максимума по СПМ, найденной классическими методами, уже решалась авторами [4,5,6].

Предложенные в [5,6] модель и методика исследований имеют ряд недостатков. Исследовались только два метода параметризации – метод центра тяжести и метод вписывания гауссианы минимизацией квадрата ошибки. При этом рассматривалось фиксированное расположение сигнальной кривой – на нулевой доплеровской частоте. Шумы и помеховые компоненты принимаемого сигнала ограничивались стационарным гауссовым шумом. Следует отметить также, что кривые зависимостей ошибок параметризации от отношения сигнал/шум при $c/\psi \rightarrow \infty$ не стремились к нулевому значению, то есть применяемые методы (или их программная реализация) были либо неэффективными, либо смещенными оценками. Основным недостатком применения классических методов было значительное время обработки результатов зондирования и невозможность получения оценок в реальном масштабе времени.

Цель данной работы – показать, что неклассические методы спектрального анализа не уступают классическим по точности определения первых двух моментов доплеровских вариаций отраженного сигнала (доплеровского смещения спектрального максимума и ширины спектрального максимума), и значительно превосходят классические по быстродействию, а, следовательно, наиболее целесообразны для практического применения.

Описание алгоритмов спектрального анализа и параметрического оценивания

Так как спектр мощности сигнала, отраженного от турбулентной атмосферы, описывается нормальным законом [1], то для нахождения первых трех моментов доплеровских вариаций этого сигнала необходимо выполнить параметрическое оценивание его СПМ, вычисленной одним из методов спектрального анализа. Применяемые классические методы спектрального анализа достаточно полно описаны в [7]. Остановимся лишь на некоторых особенностях этих методов. На результат оценки спектра методом Уэлча сильно влияет выбор окна. Для исследований были выбраны окна: Хэмминга (лучшее с точки зрения [7] для оценки спектра), Гаусса (соответствующее в спектральной области виду оцениваемого спектра), Блэкмана (имеющее минимальный уровень боковых лепестков -58,2 дБ и высокую скорость спада -18 дБ/октаву).

В неклассических методах на основе решений уравнений Юла-Уокера или с использованием гармонического алгоритма Берга спектр строится по оцененным коэффициентам авторегрессии (коэффициентам отражения). Основная сложность – это выбор порядка модели авторегрессии. В рекурсивных алгоритмах оценки порядка модели на каждом шаге уточнения вычисляется значение дисперсии возбуждающего белого шума $\sigma_{\text{шум}}$. Типовая зависимость

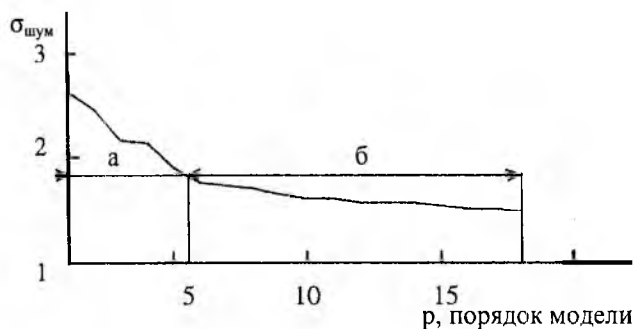


Рис. 1

выделить 2 диапазона значений r : а – диапазон быстрого спада величина $\sigma_{\text{шум}}$ с увеличением порядка модели и б – диапазон медленного спада $\sigma_{\text{шум}}$. Поэтому за оценку порядка модели $r_{\text{оц}}$ можно принять такое значение порядка r , при котором скорость уменьшения $\sigma_{\text{шум}}$ существенно снижается, то есть когда значение производной в точке $r_{\text{оц}}$ значительно уменьшается по сравнению с предыдущими значениями. Второй критерий идентификации, согласно [8], требует оценки частной корреляционной функции в результате решения матричного уравнения

$$\phi_p = R_p^{-1} \cdot r_p, \quad (3)$$

где R_p – матрица значений нормированной корреляционной функции p -го порядка;

$\Phi(\mathbf{r})$ – вектор-столбец значений частной корреляционной функции r -го порядка.

За оценку порядка модели r принималось значение, соответствующее r -му сдвигу частной корреляционной функции, при котором абсолютное значение этой функции не выходит за пределы удвоенного значения стандартной ошибки. Идентификация модели производилась с использованием обоих изложенных критериев.

Для аппроксимации СПМ с целью нахождения первых трех моментов доплеровских вариаций была выбрана функция

$$S(f, B, f_0, \Delta f) = \left(B / \sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \Delta f \right) \cdot \exp\left(- (f - f_0)^2 / 2 \cdot \Delta f^2 \right), \quad (4)$$

где f_0 – центральная частота спектра; f – отклонение частоты от центральной; B – масштабный коэффициент; $2 \cdot \Delta f = \sqrt{\sum_{k=1}^N (f - f_0)^2 / N} = \langle S(f) \rangle_{0,607}$ – ширина спектрального пика по

уровню 0,607. Доплеровский сдвиг и ширина спектра отраженного сигнала оценивались по параметрам выражения (4) после проведения аппроксимации спектра сигнала, отраженного от турбулентной атмосферы, по методу наименьших квадратов. Для этого минимизировалась функция FS в соответствии с методикой, описанной в [9]

$$FS = \sum_i^N (y_i - S(f, B, f_0, \Delta f))^2 = \min, \quad (5)$$

где N – число отсчетов спектрального ряда; y_i – мощности составляющих спектрального ряда.

При аппроксимации спектра следует уделить внимание краевым эффектам, когда величина доплеровского смещения приближается к половине частоты дискретизации $\pm f_{\text{диск}}/2$. В этом случае спектральный максимум смещается к краю частотной оси и часть спектральных составляющих циклически переходит на частоты $\mp f_{\text{диск}}/2$. При аппроксимации такого спектра по методу наименьших квадратов необходимо либо аппроксимировать спектр участками функции (4), либо рассматривать несколько реализаций спектра, циклически сдвинутых относительно исходного. Второй вариант предпочтительнее, так как не требует существенного изменения алгоритма аппроксимации, поэтому он был выбран для практической реализации.

Модель отраженного сигнала

Чтобы выбрать метод спектрального анализа, позволяющий оценить F_d и ширину спектрального максимума с наименьшей погрешностью, обусловленной шумами, необходимо провести исследования на моделях сигналов, адекватных реальным, с заданными параметрами спектра ($f_0, \Delta f$). Предлагаемая модель сигнала, отраженного от турбулентной атмосферы, была разработана на основе теоретических работ [1,2] и экспериментальных данных зондирования атмосферы, полученных на стратосферно-тропосферной РЛС ВЗ [4], параметры которой приведены ниже :

- несущая частота 57.3 МГц;
- длительность зондирующего импульса 2 мкс;
- разрешение по высоте 300 м ;
- диапазоны: исследуемых высот 2...14 км, измеряемых скоростей ветра 0...50 м/с

Результаты одного сеанса зондирования представлены в виде 40 временных рядов значений квадратурных составляющих радиосигналов, отраженных от неоднородностей атмосферы с 40 высот. Длина ряда в 128 отсчетов соответствует временному интервалу 12 с. Каждая точка ряда получена в результате усреднения по ансамблю из 450 реализаций отраженного сигнала. По этим экспериментальным данным, в результате параметрического оценивания второго момента СПМ, был определен диапазон значений ширины спектрального максимума Δf от-

раженного сигнала по уровню 0,607. Он составил от $0.2f_T/128$ до $3.98f_T/128$, где $f_T=1/T$, а T - период когерентного накопления. Этот диапазон условно был разделен на 4 поддиапазона в соответствии с делением турбулентностей по величине среднеквадратических пульсаций скорости ветра: $\Delta f \leq 0.3f_T/128$ – слабая турбулентность; $0.3f_T/128 \leq \Delta f \leq 1.55f_T/128$ – умеренная; $1.55f_T/128 \leq \Delta f \leq 2.48f_T/128$ – сильная; $\Delta f > 2.48f_T/128$ – штормовая. При моделировании генерировались отраженные сигналы с шириной спектрального максимума $\Delta f = f_T/128$ и $4f_T/128$. Доплеровское смещение спектрального максимума бралось равным 0 и $5f_T/16$, что соответствовало $V_{\text{ветра}}=0$ и 40 м/с. Так как огибающая СПМ отраженного сигнала должна описываться законом Гауса согласно [1], то для формирования реализаций комплексного узкополосного сигнала (2) использовалась схема формирователя сигнала с одной боковой полосой, описанная в [10]. На вход формирователя подавались реализации случайного процесса $(y_1(1) \dots y_1(N \cdot T))$, распределение амплитуд отсчетов в которых подчиняется нормальному закону и осуществлялась их фильтрация в полосе, удовлетворяющей требованиям узкополосности генерируемого процесса. В данном случае амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) фильтра $\hat{S}_\Phi(k/T) = \hat{S}_\Phi(k \cdot f_T)$ должна соответствовать функции нормального закона с заданными значениями Δf и F_D .

Так как реальный сигнал принимается на фоне шумов, то к сформированному ряду сигнала добавлялся аддитивный нормальный белый шум $\dot{n}(k \cdot T)$ с односторонним спектром $\dot{n}(k \cdot f_T)$. Для задания требуемой величины отношения сигнал/шум $q_{\text{треб}}$ по мощности в реализации сигнала с шумом необходимо находить текущее отношение сигнал/шум q для каждой реализации

$$q = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N \cdot T} |\dot{x}(k \cdot T)|^2 / \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N \cdot T} |\dot{n}(k \cdot T)|^2 \quad (7)$$

и умножать значения ряда сигнала на коэффициент $C = \sqrt{q_{\text{треб}}/q}$.

Результаты моделирования и экспериментальная проверка полученных результатов

При моделировании на ЭВМ исследовались зависимости стандартных ошибок определения первых трех моментов доплеровских вариаций отраженного сигнала, от которых в конечном итоге можно перейти к оценкам скорости ветра и интенсивности турбулентности на высоте H в диапазоне соотношений сигнал/шум по мощности от 1 до 10. Полученные результаты показали, что использование периодограммного метода Уэлча с окнами Хэмминга и Блэкмана, а также неклассического метода построения авторегрессионного спектра в результате решения уравнения Юла-Уокера позволяет определять первые два момента доплеровских вариаций с минимальными значениями стандартных ошибок. Результаты моделирования представлены на рис. 2

На рис.2 а и 2 в представлены зависимости стандартной ошибки определения ширины спектрального максимума от соотношения сигнал/шум, а на рис.2 б и 2 г зависимости стандартной ошибки определения скорости ветра для турбулентностей с шириной спектрального максимума $f_T/128$ до $4f_T/128$ соответственно. На этих рисунках кривой 1 – соответствуют зависимости Δf и $V_{\text{ветра}}$ от q , для случая обработки спектра, построенного методом Уэлча с окном Хэмминга, 2 – с окном Блэкмана, 3 – неклассическим методом авторегрессионного построения спектра на основе решений уравнений Юла-Уокера. Из рис 2.а видно, что при оценке Δf для отраженных сигналов с заданным значением $\Delta f = f_T/128$ относительная погрешность измерений составляет (50-40%) при соотношениях сигнал/шум меньше 4 и (25-8%) при $q \geq 4$ в случае применения периодограммного метода Уэлча с окном Хэмминга. На 3-2% уступают в точности: классический метод Уэлча с окном Хэмминга. При оценке скорости ветра (рис. 2 б) наилучшие результаты дает метод Уэлча с окном Блэкмана. Абсолютная

погрешность измерения от 0,5 м/с до 0,3 м/с при $q < 4$ и от 0,3 до 0,18 м/с при $4 \leq q \leq 10$. На 0,04-0,1 м/с уступают в точности метод Уэлча с окном Хэмминга и неклассический на основе решений уравнений Юла-Уокера.

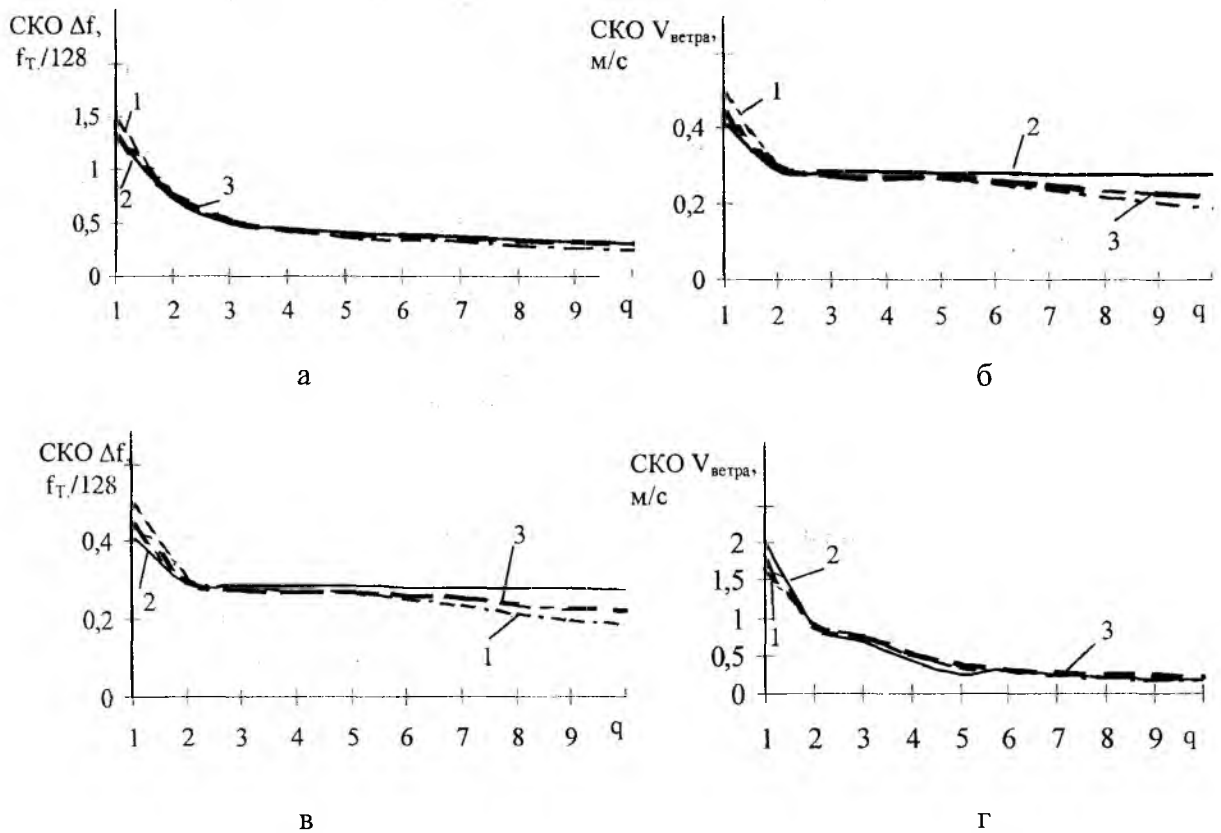


Рис. 2

Результаты оценок первых двух моментов доплеровских вариаций отраженных сигналов с $\Delta f = 4f_T/128$ представлены на рис. 2 в, 2 г. При оценке Δf наилучшие результаты дает алгоритм Уэлча с окном Блэкмана (погрешность 40-19 %) при соотношениях сигнал/шум меньше 4 и 12-4% при $q \geq 4$. На 3-1% уступает в точности метод Уэлча с окном Блэкмана и неклассический метод построения спектра авторегрессии на основе решений уравнений Юла-Уокера.

Экспериментальная проверка разработанных моделей была проведена на временных рядах сигналов, полученных на атмосферной РЛС вертикального зондирования [4]. Перед использованием выбранных алгоритмов спектрального анализа из реализаций отраженного сигнала удалялась земная помеха, принимаемая по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны.

На рис. 3 а изображен оцененный с использованием выбранных алгоритмов профиль скорости ветра по высоте (сплошная линия – метода Уэлча, пунктирная – неклассический метод на основе решения уравнений Юла-Уокера), а на рис. 3 б – профиль ширины спектрального максимума отраженного сигнала по высоте.

Из рис. 3 видно, что оценки скорости ветра и ширина спектрального максимума, найденные обоими методами, идентичны до высот 10 км. Расхождения оценок методов на высотах 10-12 км объясняется тем, что величина соотношения сигнал/шум близка к пороговой и спектр сильно искажен шумами. На рис. 3.б сплошными вертикальными линиями показано условное оценочное деление турбулентностей на 4 класса по ширине спектрального максимума: I – слабая турбулентность; II – умеренная турбулентность; III – сильная турбулентность; VI – штормовая турбулентность.

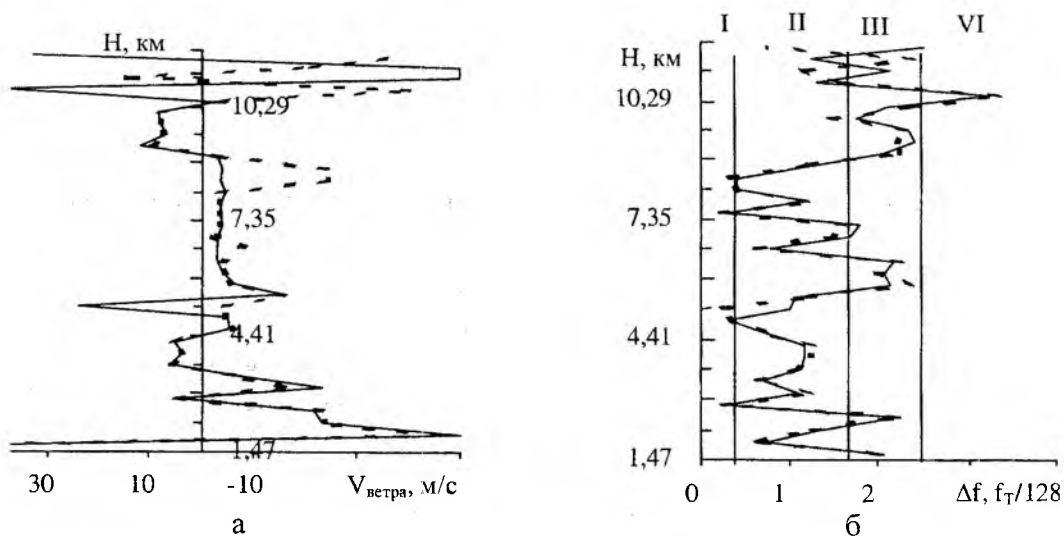


Рис. 3

Выводы

1. Минимальной погрешностью определения скорости ветра и ширины спектрального максимума при спектральном анализе классическими методами обладает метод Уэлча, а среди проанализированных неклассических – построение спектра авторегрессии, коэффициенты которого найдены в результате решения уравнений Юла-Уокера. 2. Неклассический метод построения авторегрессионного спектра на основе решения уравнений Юла-Уокера по точности уступает классическому на 2-5%, однако существенно выигрывает в скорости (4-10 раз при моделировании). 3. Для отраженных сигналов с шириной спектрального максимума $\Delta f = 4f_T/128$ относительная погрешность определения Δf и $V_{\text{ветра}}$ меньше, чем для сигналов с $\Delta f = f_T/128$. Данный результат можно объяснить тем, что чем более узкополосный сигнал, тем больше отсчетов должна содержать выборка этого сигнала для получения высокой точности определения коэффициентов авторегрессии и построения спектра процесса авторегрессии. Для уменьшения погрешности оценок первых трех моментов доплеровских вариаций отраженного сигнала выборка должна содержать 200-250 отсчетов. В результате эксперимента при длине выборки в 256 отсчетов было установлено, что относительная погрешность определения ширины спектрального максимума уменьшилась на 7-3% в диапазоне соотношений сигнал/шум от 1 до 10 соответственно. 4. Предложенная классификация турбулентностей по величине ширины спектрального максимума является оценочной. Получение более точных аналитических зависимостей является предметом дальнейших исследований.

Список литературы: 1. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1976. 586с. 2. Петров В.А., Карташов В.М. Анализ структурно-физической модели рассеяния волн в турбулентной атмосфере // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2000. Вып. 114. С. 37-39. 3. Винниченко Н.К. Турбулентность в свободной атмосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 326 с. 4. Исследования атмосферных динамических процессов в нижней термосфере и тропо-стратосфере / Б.Л. Кашеев, В.В. Жуков, В.Н. Олейников и др. // Метеор. исслед. 1988. № 14. С. 19 – 39. 5. Yamamoto M., Sato T., May P.T. et al. Estimation error of spectral parameters of mesosphere-stratosphere-troposphere radars obtained by least squares fitting method and it's lower bound. / Radio Sci.- Vol. 23.- № 6, November-December 1988.- P. 1013-1021. 6. Yamamoto M., Sato T., May P.T. et al. Estimation of spectral parameters of MST radar obtained by least squares fitting method // Handbook for middle atmosphere program.- Urbana, Illinois.- 1989.- Vol. 28.- P. 628-633. 7. Марпл С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990. 584 с. 8. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление: Пер. с англ. Вып. 1/Под ред. В.Ф. Писаренко. М.:Мир, 1974. 406 с. 9. Данилина Н.И., Дубровская Н.С., Кваша О.П. Численные методы. М.: Высш. школа, 1976. 368 с. 10. Гольденберг Л.М., Б.Д. Матюшкин, Поляк М.Н. . Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие. М.: Радио и связь, 1990. 287 с.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники.

Поступила в редколлегию 22.02.2002