

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДОВ ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАСSEЯННЫХ СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

Введение

Метеорологическое обеспечение авиации предъявляет достаточно жесткие требования к достоверности и оперативности информации. Традиционные методы сбора метеоинформации (измерение с помощью станций аэрологического зондирования и метеобашен) не удовлетворяют современным требованиям. Дело в том, что станции аэрологического зондирования обеспечивают информацию в значительном высотном диапазоне (до 30 км) в дискретные моменты времени (2 – 4 раза в сутки), в то время как метеобашни способны обеспечивать непрерывное измерение в приземном слое (до 200 м, ограничено высотой башни). Современные требования к метеообеспечению авиации включают оценку средних значений метеовеличин за 2 – 5 минут (точность определения скорости ветра не хуже 1 м/с), что невозможно с использованием метеозондов. Для преодоления этих ограничений были разработаны РЛС вертикального зондирования атмосферы, обеспечивающие измерение скорости ветра в высотном диапазоне 0.3 – 12 км (ограничено энергетическим потенциалом) с временным разрешением от единиц до десятков минут. РЛС ВЗ обеспечивают построение профиля скорости ветра по сигналам, отраженным от неоднородностей параметров атмосферы (в частности, от неоднородностей диэлектрической проницаемости), образование которых обусловлено неоднородным нагревом подстилающей поверхности [1]. Наиболее распространена оценка параметров сигнала по его спектру. Поскольку входной сигнал является случайным, измерение параметров непосредственно по выборочному спектру дает статистически неустойчивые оценки [2]. В связи с этим используется усреднение по времени, получаемая функция носит название спектральной плотности мощности (СПМ) сигнала.

При параметризации происходит оценивание информативных параметров рассеянного сигнала – его центральной частоты, ширины его спектра и мощности. К оценкам параметров предъявляются требования состоятельности, несмещенности и эффективности [3].

Методы параметризации принято разделять на параметрические и непараметрические. К параметрическим относятся методы, основанные на априорной информации и форме и параметрах СПМ рассеянного сигнала [1]. В литературе приводятся сведения о том, что форма спектра рассеянного сигнала сходится к функции Гаусса с увеличением времени накопления [4]. На этих предпосылках основан метод наименьших квадратов (МНК) [1, 5].

Введем условные обозначения: x – СПМ рассеянного сигнала, f_0 – искомое значение доплеровского сдвига частоты рассеянного сигнала, σ_f – ширина спектра рассеянного сигнала, p – мощность рассеянного сигнала, N – число отсчетов в реализации рассеянного сигнала, i – номер отсчета. Суть МНК состоит в минимизации невязки:

$$\varepsilon(f_0, \sigma_f, p) = \overline{[(x - \Phi(f_0, \sigma_f, p))]^2} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $\Phi(f_0, \sigma_f, p)$ является функцией-шаблоном спектра [5]. Осреднение в (1) проводится по всем возможным значениям доплеровского сдвига:

$$\varepsilon(f_0, \sigma_f, p) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [x_i - \Phi(f_0, i, \sigma_f, p)]^2 \quad (2)$$

Задача параметризации может быть сформулирована как минимизация функции трех переменных (2). Задачу можно упростить, поскольку искомая мощность рассеянного сигнала может быть определена как $p = \sum_{i=1}^N x_i^2$. Таким образом, (2) окончательно можно записать в виде

$$\varepsilon(f_0, \sigma_f) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [x_i - \Phi(f_0, i, \sigma_f)]^2 \rightarrow \min \quad (3)$$

Минимизация выражения (3) может проводиться несколькими способами, хотя и с разной эффективностью. Наиболее прост в реализации метод прямого перебора всех возможных значений аргументов целевой функции, однако он имеет неоправданно высокую вычислительную сложность.

Большинство поисковых методов используют процедуру отыскания минимума функции одной переменной. Эта процедура в процессе работы делает «шаги» по аргументам или в направлении градиента, размер этих шагов вычисляется автоматически, направление шагов определяется алгоритмом поиска. По принципу действия эти методы можно разделить на две категории – прямые (используют только значения целевой функции) и косвенные (используют производные целевой функции) [6, 7]. Косвенные методы обычно сходятся за меньшее число итераций, однако предъявляют требования к целевой функции, в частности требуют ее дифференцируемости, и имеют повышенную вычислительную сложность за счет процедур численного дифференцирования. Кроме того, результат косвенных методов может сходиться к точкам перегиба или локальным минимумам целевой функции вместо ее глобального минимума, что приведет к промахам в результатах.

К прямым методам минимизации функций одной переменной относится, в частности метод золотого сечения [6]. Его достоинством по сравнению с косвенными методами является отсутствие необходимости вычисления производных целевой функции, что ускоряет вычисления.

Метод покоординатного спуска [7] используется для минимизации функций многих переменных. Для квадратичной целевой функции (3) сходимость гарантируется при любом начальном приближении.

Постановка задачи

Поскольку вычислительные затраты и вероятность промахов при минимизации целевой функции (3) различными методами неодинакова, следует провести сравнение доступных методов. Сравнение проводилось методом имитационного моделирования, использовались следующие модификации метода наименьших квадратов:

1. МНК с покоординатным спуском, доплеровская частота и спектральная ширина определяются прямым перебором (МНК-1).
2. МНК с покоординатным спуском, доплеровская частота определяется прямым перебором, а спектральная ширина – методом золотого сечения (МНК-2).
3. МНК с покоординатным спуском, доплеровская частота определяется методом золотого сечения, а спектральная ширина – прямым перебором (МНК-3).
4. МНК с методом золотого сечения для минимизации функции двух переменных (МНК-4).
5. МНК с использованием метода Нелдера-Мида для минимизации функции двух переменных (МНК-5).

Кроме того, моделирование проведено для метода максимумов и метода моментов (кривые 6 и 7 на последующих графиках). При моделировании использовалась модель рассеянных сигналов, описанная в [4], моделирование проводилось для полного диапазона скоростей ветра $-25 - 25$ м/с и спектральной ширины рассеянного сигнала $0 - 3$ м/с. Отношение сигнал/шум, заданное в модели, изменялось в пределах $-20 - +20$ дБ.

Основные положения работы

Анализ результатов моделирования, приведенных на рис. 1, показывает, что из методов параметризации, рассматриваемых в статье, наименьшее СКО оценок скорости ветра обеспечивают методы МНК-1 и МНК-2.

Рассмотрим зависимость среднего по модулю смещения оценки скорости ветра от значения скорости, заданного в модели (рис. 2) и зависимость СКО оценки скорости ветра от ширины спектра рассеянного сигнала (рис. 3).

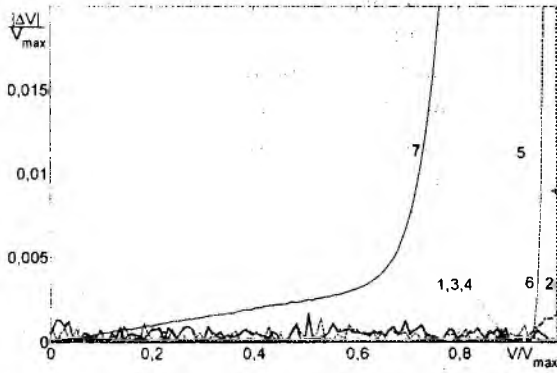


Рис. 2. Зависимость среднего по модулю смещения оценки скорости ветра от ее истинного значения, заданного в модели

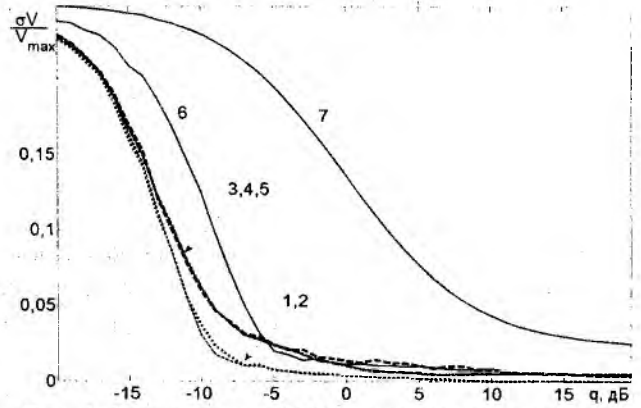


Рис. 1. Зависимость СКО оценки скорости ветра от отношения сигнал/шум

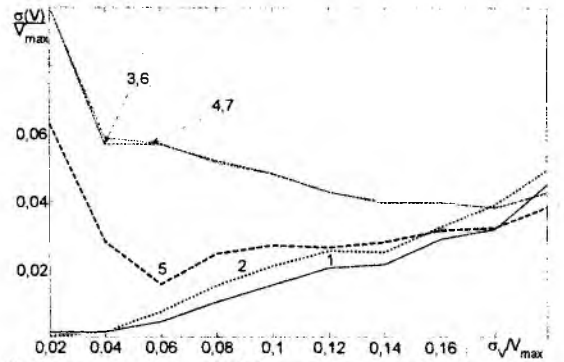


Рис. 3. Зависимость СКО оценки скорости ветра от спектральной ширины рассеянного сигнала

Наименьшие погрешности из рассматриваемых методов параметризации обеспечивает МНК-1. Оценки скорости методом моментов значительно смещены [5]. Рассмотрим статистические характеристики оценок. Результаты оценивания статистических характеристик приведены в таблице. Оценивание проводилось по имитационной выборке из 80000 спектров со случайными значениями ν , при $q=20$ дБ. Закон распределения ν - равномерный, в пределах полного диапазона однозначно определяемых скоростей. Под процентом сходимости в таблице понимается величина $\alpha = p_{QC} / P_{\Sigma}$, то есть отношение количества результатов, укладывающихся в допуски, к полному объему имитационной выборки, выраженное в процентах.

Метод параметризации	Процент сходимости		Оценка ν		Оценка σ_{ν}	
	ν	σ_{ν}	Смещение	СКО	Смещение	СКО
МНК-1	100	100	3.48E-06	0.0011	-0.0029	0.0040
МНК-2	100	100	-9.06E-06	0.0015	-0.0015	0.0037
МНК-3	99.04	99.58	-0.0049	0.0795	-0.0031	0.0099
МНК-4	99.12	99.65	-0.0048	0.0776	-0.0016	0.0084
МНК-5	96.94	97.14	0.0055	0.0837	-0.0054	0.0222
Метод максимумов	99.82	100	-9.8E-04	0.0449	-0.0020	0.0204
Метод моментов	93.16	3.03	-0.0019	0.0678	-0.1274	0.0861

Из таблицы следует, что методы МНК-1 и МНК-2 обеспечивают наилучшие точностные характеристики, причем метод МНК-1 является предпочтительным. Остальные рассматри-

ваемые методы обеспечивают существенно худшие характеристики, особенно метод моментов. Также следует отметить, что ни один из методов не обеспечивает несмещенную оценку в строгом смысле. Однако смещения оценок, получаемых методами МНК-1 и МНК-2, незначительны по сравнению с погрешностями, вносимыми другими факторами в процессе эксплуатации РЛС ВЗ, в частности, мешающими отражениями [1].

На рис. 4 – 17 приведены гистограммы невязок скорости и спектральной ширины: $\Delta v = (v - v') / v_{\max}$ и $\Delta(\sigma_v) = (\sigma_v - \sigma'_v) / v_{\max}$ соответственно. При этом v, σ_v – исходные значения скорости и спектральной ширины, заданные в модели, а v' и σ'_v – получаемые при параметризации оценки. Моделирование проводилось для отношения сигнал/шум $q=20$ дБ.

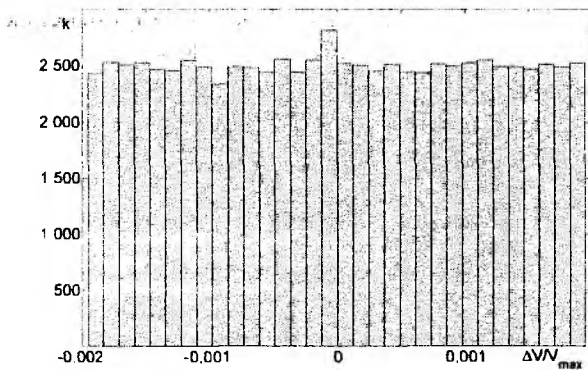


Рис. 4. Распределение оценок скорости ветра методом МНК-1

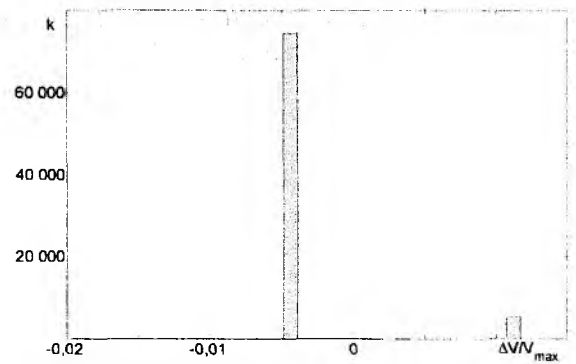


Рис. 5. Распределение оценок ширины спектра методом МНК-1

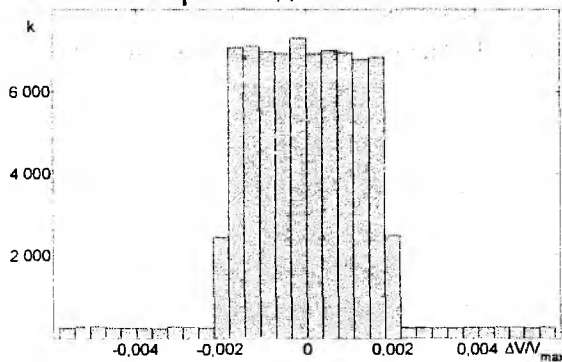


Рис. 6. Распределение оценок скорости ветра методом МНК-2

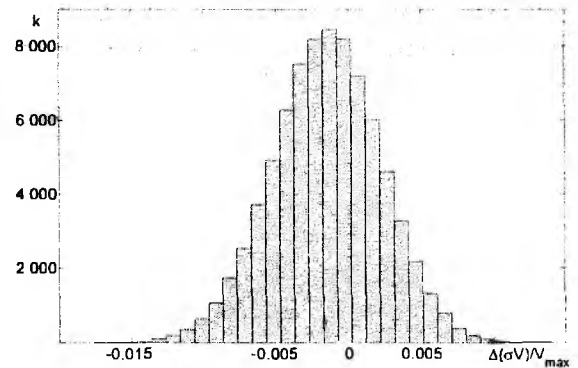


Рис. 7. Распределение оценок ширины спектра методом МНК-2

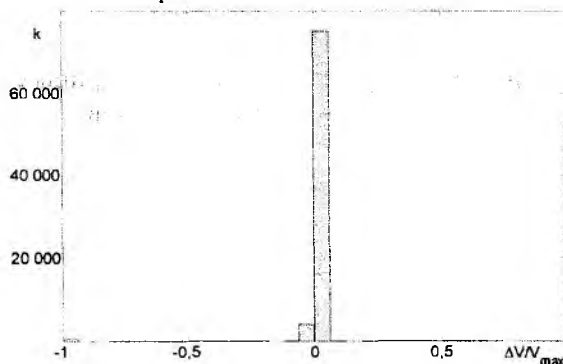


Рис. 8. Распределение оценок скорости ветра методом МНК-3

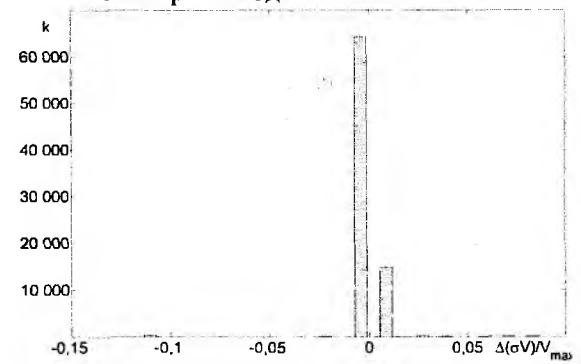


Рис. 9. Распределение оценок ширины спектра методом МНК-3

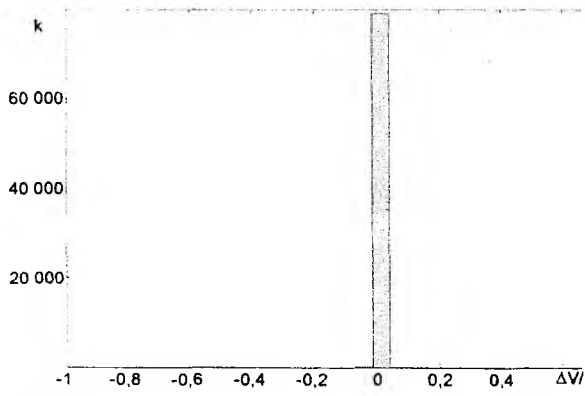


Рис. 10. Распределение оценок скорости ветра методом МНК-4

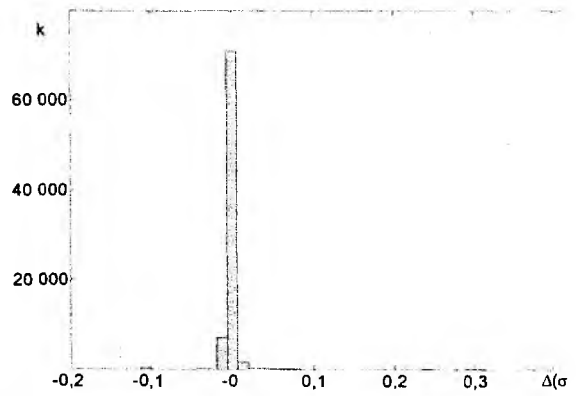


Рис. 11. Распределение оценок ширины спектра методом МНК-4

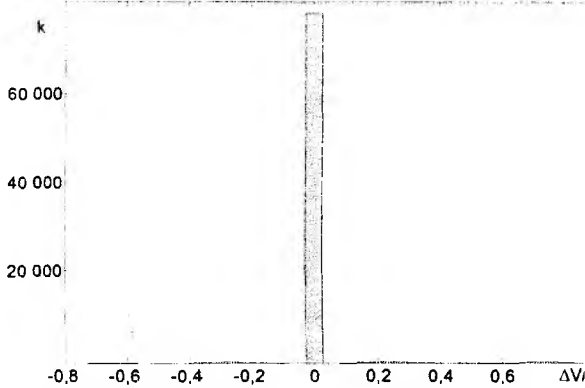


Рис. 12. Распределение оценок скорости ветра методом МНК-5

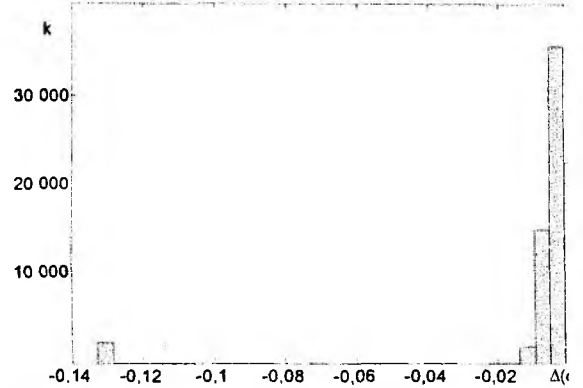


Рис. 13. Распределение оценок ширины спектра методом МНК-5

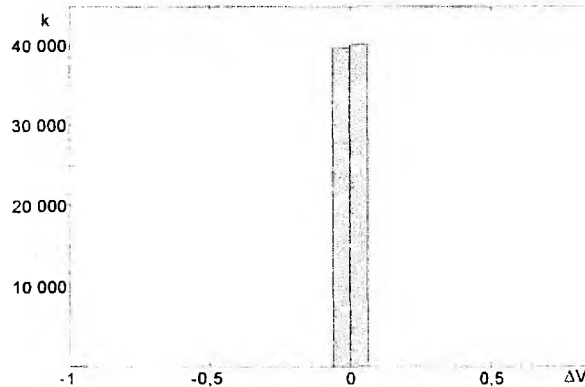


Рис. 14. Распределение оценок скорости ветра методом максимумов

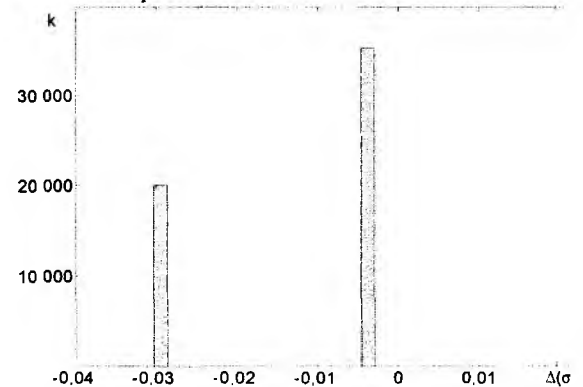


Рис. 15. Распределение оценок ширины спектра методом максимумов

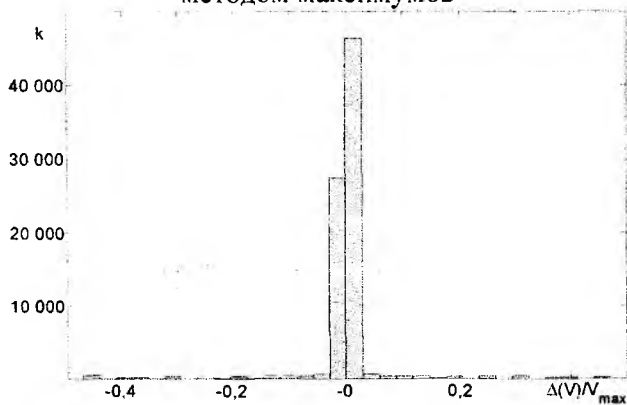


Рис. 16. Распределение оценок скорости ветра методом моментов

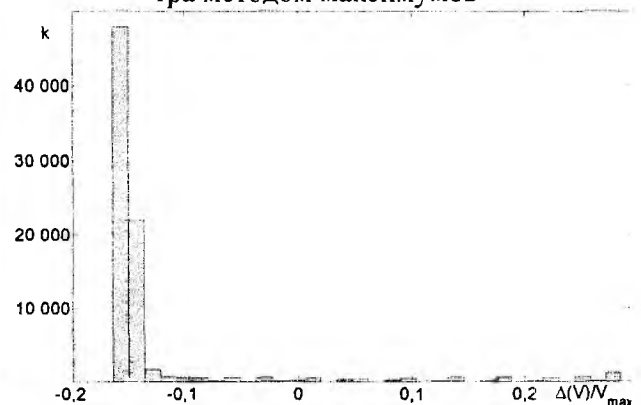


Рис. 17. Распределение оценок ширины спектра методом моментов

Методы параметризации МНК-1 и МНК-2 обеспечивают наименьший разброс оценок около истинного значения.

Рассмотрим зависимость времени выполнения параметризации от размера выборки рассеянного сигнала (рис. 18).

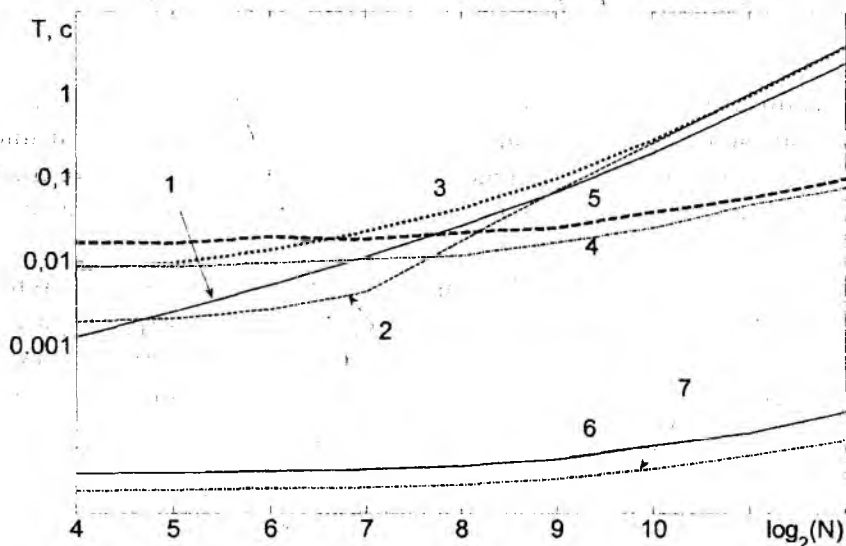


Рис. 18. Зависимость времени выполнения параметризации от размера выборки рассеянного сигнала.

Выводы

С точки зрения вычислительной эффективности, наиболее предпочтительны методы моментов и максимумов. Метод МНК-1, обеспечивающий наименьшие погрешности, занимает среднее положение по вычислительным затратам. Наибольшую вычислительную сложность из рассмотренных методов параметризации имеет метод МНК-3.

Из рассмотренных методов параметризации наиболее эффективным, с точки зрения погрешностей, является метод наименьших квадратов с минимизацией целевой функции методом покоординатного спуска (метод МНК-1). По вычислительной эффективности этот метод незначительно уступает методам, использующим специальные методы минимизации (МНК-4, МНК-5).

Список литературы. 1. *Дистанционные методы и средства исследования процессов в атмосфере Земли* / Под общ. ред. Б. Л. Кашеева, Е. Г. Прошкина, М. Ф. Лагутина. Харьков: ХНУРЭ; Бизнес Информ, 2002. 426 с. 2. *Основы цифровой обработки сигналов: Курс лекций. 2-е изд.* / А.И. Солонина, Д.А. Улахович, С.М. Арбузов и др. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 768 с. 3. *Тихонов В.И., Харисов В.Н.* Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем: учеб. пособие для вузов. М.: Радио и связь, 2004. 608 с. 4. *Довиак Р., Зрнич Д.* Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 512 с. 5. *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. 6. *Бахвалов Н.С.* Численные методы. М.: Наука, 1975. 630 с. 7. *Калиткин Н.Н.* Численные методы. М.: Наука, 1978. 512 с.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 30.10.2009