УДК 621.371.3

И. Е. АНТИПОВ, д-р техн. наук, Е.Ю. БОНДАРЬ, канд. техн. наук, Н. О. СОРОХ, О. А. СОЛЯНИК, канд. техн. наук

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ РАСПОЗНАВАНИЯ И АНАЛИЗА МЕТЕОРНЫХ АВХ

Введение

Свойство метеорных следов отражать радиоволны метрового диапазона позволяет исследовать метеорные явления и процессы в атмосфере Земли. Для этой цели требовалось создание специальных метеорных радиолокационных станций (МРЛС).

Задачи, стоящие перед метеорологами и астрономами, вызвали к жизни появление МРЛС третьего поколения, обеспечивающие получение оперативной информации для метеорологических (или астрономических) целей.

Метеорная автоматизированная радиолокационная система (МАРС)

Одним из первых в этом направлении решений было создание многопозиционной метеорной автоматизированной радиолокационной системы (МАРС), которая была разработана в 1965 – 1967 гг. [1].

Автоматизированная система МАРС имеет подсистему автоматического определения радиантов и орбит метеоров (ПАОРО), в которую входят два вынесенные приемно-ретранслирующие пункты ВП – 1 и ВП – 2. Эта подсистема, функционирующая в реальном масштабе времени, выдает на печать основные астрономические характеристики индивидуальных метеоров – время, скорость, координаты радианта, элементы орбиты. В работах А.А. Дьякова [2, 3] приведены алгоритмы первичной обработки и диспетчеризации.

Такая система автоматической обработки (САО) позволила более оперативно и с меньшими аппаратурными затратами получать необходимую информацию о радиантах и орбитах индивидуальных метеоров.

На первом этапе работы системы МАРС регистрация производилась фоторегистратором на кинопленку в виде отдельных кадров. При этом на визуальную обработку пленок и набивку данных на перфоленту суточного цикла измерений затрачивается 12 человеко-дней. Следует заметить, что полный расчет радианта и орбиты одного метеора на электронной вычислительной машине типа «Урал» занимал примерно 5 *мин*. [4].

За период времени, начиная с 1967 по 1972 г., было зарегистрировано около 1 957 300 отражений, которые размещаются на 1723 кинопленках, каждая длиной 30 *м*. Некоторые данные результатов ручной обработки регистраций за 1967 и 1968 гг. приведены в [1].

Архив кадровых регистраций в виде фотонегативов хранится на кинопленке. На рис. 1 приведен один кадр регистрации, который содержит грубую (нижняя) и точную (верхняя) шкалы дальности, амплитудно-временные характеристики (АВХ) основного и двух выносных пунктов, номер кадра (№ 457) и часы, на которых указана дата проведенной регистрации (05 апреля 1970 г.), фамилия дежурного оператора (Трубчанинов) и время регистрации отражений (04 *ч*, 23 *мин*, 59 *сек*).

На рис. 2 приведен фрагмент кадра, представленного на рис. 1, на котором имеется две шкалы дальности и АВХ, зарегистрированная на основном пункте.

По двум разверткам дальности определяется расстояние от РЛС до точки зеркального отражения на метеорном следе.

Комплекс МАРС работал с периодом повторения импульсов $T_п = 2$ *мс* ($F = 500$ *Гц*), а каждый пятый импульс был сдвоенным, что необходимо для однозначного определения дальности.

Оценка погрешности наклонной дальности при считывании показаний с электронно-лучевого индикатора дальности приняты исследователями при наблюдениях как $\Delta R = \pm 1$ *км*.

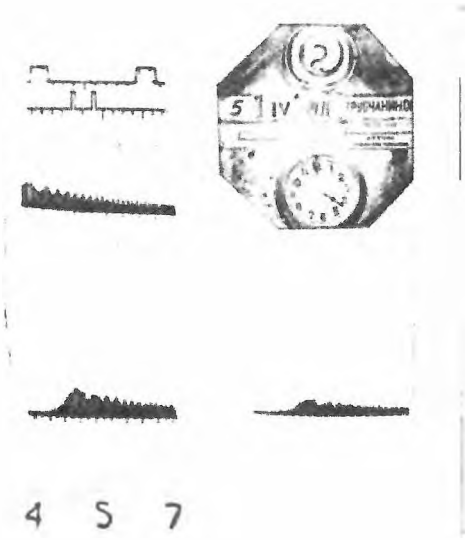

Рис. 1

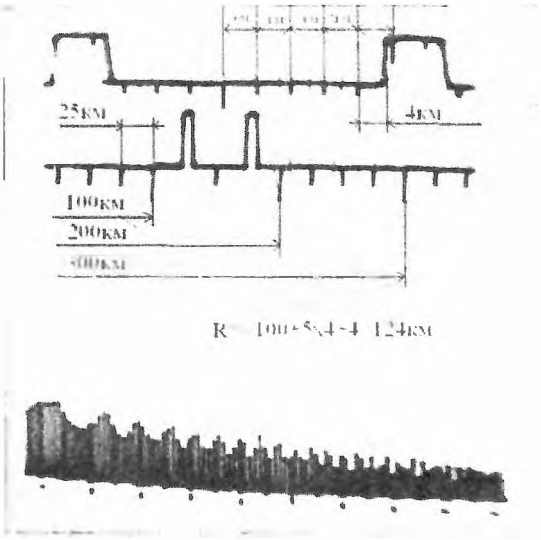

Рис. 2

На грубой шкале разверток имеются два типа меток: длинные и короткие. Крайняя слева длинная метка на грубой шкале соответствует наклонной дальности равной 100 *км*, средняя соответствует наклонной дальности 200 *км* и правая 300 *км*. Расстояние между короткими метками соответствует наклонной дальности равной 25 *км*. Над разверткой располагаются два импульса: левый и правый.

Наклонная дальность по грубой шкале состоит из нескольких составляющих:

- первая составляющая – это количество длинных меток, соответствующих дальностям 100 или 200 *км*, которые располагаются слева от переднего фронта левого импульса;

- вторая составляющая – это количество интервалов между короткими метками, которые заключены между левой длинной меткой и передним фронтом левого импульса. Количество интервалов может быть: 0; 1; 2; 3; 4. Каждый интервал между короткими метками соответствует наклонной дальности, равной 25 *км*.

По точной шкале разверток уточняется наклонная дальность на интервале 25 *км*.

Точная шкала разверток имеет два типа меток: длинные и короткие. Наклонная дальность между двумя длинными метками составляет 25 *км*, а короткие метки делят это расстояние на 5 участков по 5 *км*.

Наклонная дальность по точной шкале определяется расстоянием от длинной средней метки до переднего фронта правого импульса. Необходимо подсчитать количество полных интервалов и умножить на 5 *км*. За полными интервалами следует интервал, который занимается частью правого импульса. Часть наклонной дальности на этом 5 *км* интервале определяется расстоянием между короткой меткой полного последнего интервала и передним фронтом правого импульса.

Современные возможности вычислительной техники позволяют данные, хранящиеся на киноленте оцифровать и представить в виде, пригодном для проведения расчетов.

Рассеяние радиоволн на метеорных следах

Существует ряд основополагающих работ, которые дают детальное представление о физике отражений радиоволн от метеорных следов. Так, результаты работ Lovell A.C.B., и Clegg J.A. [5] были положены в основу радиолокационного метода исследования метеоров и связанных с ними явлений в верхней атмосфере.

Как показали Kaiser T.R. и Cross R.L. [6], если начальный радиус следа $r_0 << \lambda/2\pi$, следует различать ионизированные метеорные следы трех типов относительно их линейной электронной плотности α:

- ненасыщенные следы ($\alpha << 2{,}4\ 10^{12}$ *электрон/см*), рассеяние на электронах, которое можно рассматривать как независимое и когерентное;

- насыщенные следы ($\alpha > 2{,}4\ 10^{12}$ *электрон/см*), отражение от которого происходит как от металлического цилиндра;

- следы промежуточного типа ($\alpha \approx 10^{12}$ *электрон/см*), для которых $r_0 < \lambda/2\ \pi$ амплитуда отраженной волны зависит от ориентации электрического вектора падающей волны относительно оси следа и в случае продольной поляризации амплитуда отраженной волны будет такой же, как и в случае ненасыщенных следов.

На рис. 3 приведены образцы записей дифракционных картин сигналов, рассеянных на ионизированных метеорных следах различных типов (*а* – ненасыщенный; *б* и *в* – промежуточного типа; *г* и *д* – насыщенные; *г* – след с очень большой линейной электронной плотностью) [4].

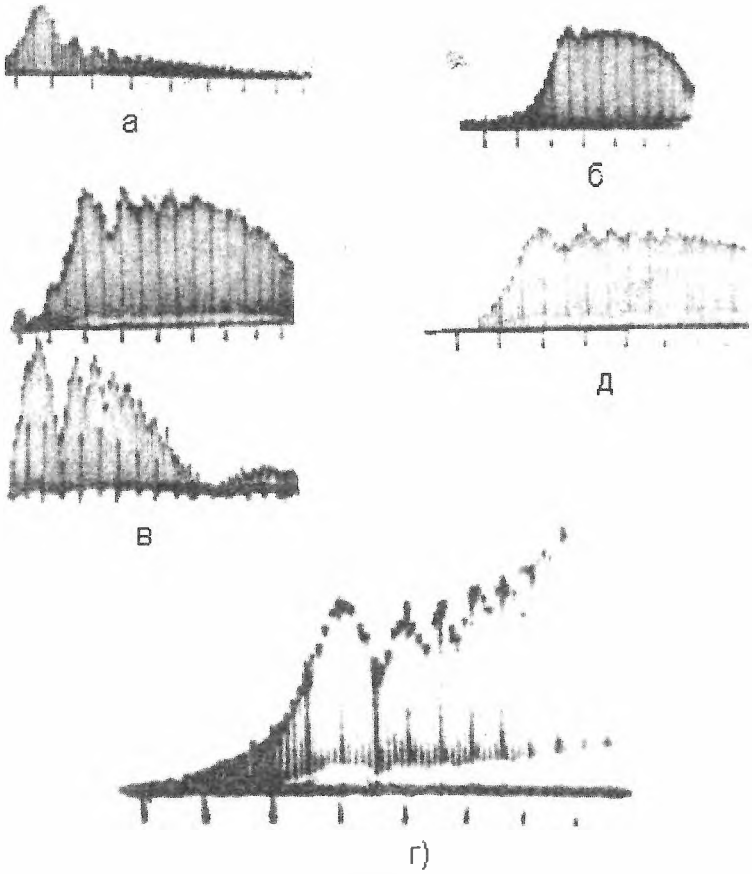

Рис. 3

В большинстве работ ионизированный след представляют как узкий круговой плазменный цилиндр бесконечной длины, на который перпендикулярно его оси падает электромагнитная волна.

Будем рассматривать исключительно ненасыщенные метеорные следы.

Во-первых, в случае если электронная концентрация в любой точке следа значительно ниже критической, это позволит рассматривать рассеяние на каждом электроне как независимое и когерентное.

И, во-вторых, радиолокационная система МАРС, результаты измерений которой обрабатывались, имела высокую эффективную чувствительность и более 95% отражений сигналов были от ненасыщенных следов.

На рис. 4 приведена геометрия траектории метеора относительно станции наблюдения.

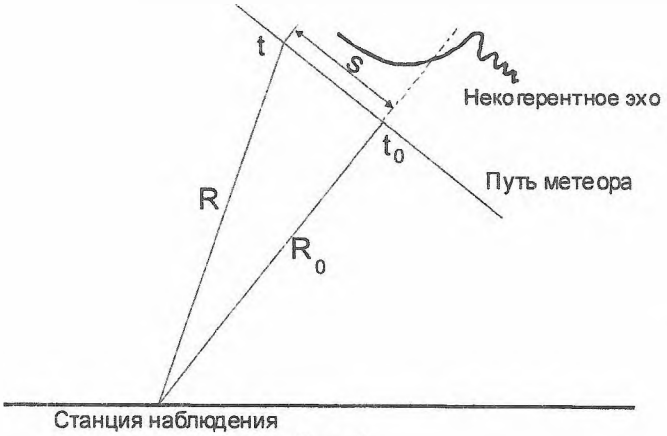

Рис. 4

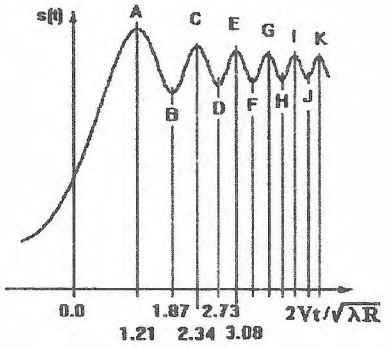

Рис. 5

Здесь s отсчитывается от точки зеркального отражения на следе в направлении движения метеора, s_0 характеризует положение головы следа. Элемент длины следа ds содержит αds электронов. В случае линейного следа эти электроны рассеивают синфазно. А напряжение на входе приемника, создаваемое сигналом, рассеянным на линейном следе, определяется интегралом по длине следа.

Основной вклад в напряжение на входе приемника E_r дают участки следа, близкие к точке зеркального отражения, для которых $s << R$, поэтому R можно представить как

$$R \approx R_0 + \frac{1}{2}\frac{s^2}{R_0}. \tag{1}$$

Тогда напряжение на входе приемника E_r определится выражением

$$E_r = \frac{\sqrt{R\lambda}}{2}(2R_{вх}\Delta P_r)^{\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{x_0} \alpha e^{i\frac{\pi}{2}x^2} dx, \tag{2}$$

где λ – длина волны РЛС; $R_{вх}$ – входное сопротивление приемника; ΔP_r – мощность сигнала, рассеянная одним электроном.

Согласно (2) при постоянном α изменение амплитуды сигнала, рассеянного на формирующемся метеорном следе, описывается интегралом Френеля. Идеализированная АВХ приведена на рис. 5.

Найденные по (2) положения максимумов и минимумов дифракционной картины, так называемой АВХ, могут быть использованы для определения скорости метеоров с помощью выражения

$$V_{из} = \frac{L_{BD}F\sqrt{\lambda R}}{2n}, \tag{3}$$

где $V_{из}$ – измеренная скорость, L_{BD} – длина соответствующей зоны Френеля, выраженная в нормированных единицах, (рис. 5), F – частота следования импульсов, λ – длина волны, R – наклонная дальность, n – число импульсов в зоне BD.

Нормированная длина зоны Френеля является табулированной величиной постоянной для данной зоны. Относительные величины зон Френеля приведены в таблице [7]:

Зона	AC	BD	CE	DF	EG	FH
Размер зоны	1,129	0,867	0,738	0,653	0,593	0,546

При вхождении метеора в атмосферу Земли на высотах 80 – 110 *км* за время порядка $10^{-3} - 10^{-5}$ *с*, происходит начальное расширение метеорного следа до величины начального радиуса – r_0. Распределение электронной плотности по сечению следа определяется выражением

$$n_e = \frac{\alpha}{4\pi Dt + \pi r_0^2} e^{-\frac{r^2}{4Dt + r_0^2}}, \tag{4}$$

где D – коэффициент амбиполярной диффузии.

После установления теплового равновесия с окружающей атмосферой дальнейшее уменьшение электронной концентрации в ионизированном метеорном следе происходит вследствие диффузного расширения следа, а также процессов рекомбинации и «прилипания» электронов.

Если радиус следа r_c сравним с длиной волны, то необходимо учитывать разность фаз волн, рассеянных различными электронами элемента длины следа ds, электронная плотность которого по сечению следа определяется выражением (4).

При этом максимальное значение мощности сигнала, рассеянного на ненасыщенном метеорном следе $P_{пр}$ может быть представлено следующим выражением [4]:

$$P_{пр} = \frac{P_{пер} G_{пер} G_{пр} \alpha^2}{32\pi^2} \left(\frac{\lambda}{R}\right)^3 \left(\frac{e^2}{mc^2}\right)^2 f^2(r_0) I^2, \qquad (5)$$

где

$$I = \left| \frac{1}{\sqrt{2}} \int_{-\infty}^{x_0} e^{i\frac{\pi}{2}x^2} e^{-\Delta(x_0 - x)} dx \right|; \qquad (6)$$

$$\Delta = \frac{8\pi^2 DR^{\frac{1}{2}}}{V\lambda^{\frac{3}{2}}}; \qquad (7)$$

$P_{пер}$ – импульсная мощность передатчика; $G_{пер}$, $G_{пр}$ – коэффициент направленного действия передающей и приемной антенн; α – линейная электронная плотность в следе; λ – длина волны; R – дальность до следа; m, e – масса и заряд электрона; c – скорость света; r_0 – начальный радиус следа; D – коэффициент амбиполярной диффузии; V – скорость метеора.

Множители $f(r_0) = e^{-(\frac{2\pi}{\lambda} r_0)^2}$ и $I_{\max} = \frac{1 - e^{-\sqrt{2}\Delta}}{\sqrt{2}\Delta}$ учитывают ослабление сигнала вследствие влияния начального радиуса следа и диффузного расширения за время формирования первой зоны Френеля.

Основной вклад в мощность сигнала, рассеянного ненасыщенным метеорным следом, при Δ меньше или ≈ 1, дает участок следа около точки зеркального отражения. Длина этого участка порядка $\sqrt{R\lambda}$. При $R = 200$ *км* и $\lambda = 8$ *м* $\sqrt{R\lambda} \approx 1{,}3$*км*. На таком малом участке следа в первом приближении можно пренебречь изменением α и r_0, что и было сделано при выводе выражения (5).

Если при измерении скорости метеора по АВХ и коэффициенту амбиполярной диффузии не учитывать расширение следа за время формирования на нем основных зон Френеля, то это приводит к ошибкам оцениваемой скорости метеора.

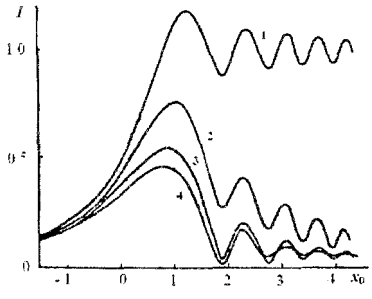

Рис. 6

На рис. 6 приведены АВХ сигналов, рассеянных на ненасыщенных метеорных следах, согласно выражению (6) при значениях параметра $\Delta = 8\pi^2 D\sqrt{R} / 9\lambda^{\frac{3}{2}}$ равных:

1) $\Delta = 0$;
2) $\Delta = 0{,}5$;
3) $\Delta = 1$;
4) $\Delta = 1{,}25$ ($x = 2s/\sqrt{R_0\lambda}$, $x_0 = 2s_0/\sqrt{R_0\lambda}$).

Из рис. 6 видно, что с ростом Δ заметно смещается первый максимум дифракционной картины. Положение остальных экстремумов изменяется значительно меньше.

Так, при $\Delta = 0{,}5$ ошибка в скорости, найденная по зоне АС, составляет 12% и по зоне АЕ – 9%. Эти ошибки приводят к занижению значения скорости метеора на несколько *км·с*$^{-1}$. Ошибки могут быть значительно уменьшены, если при определении скорости не пользоваться положением первого максимума.

Согласно выражению (6) приблизительно экспоненциальное убывание АВХ со временем имеет место только при $\Delta < 0{,}5$, когда отражение радиоволн от метеорных следов носит зеркальный характер. При значениях $0{,}5 < \Delta < 1{,}5$ отражение вначале носит зеркальный характер, а затем (тем быстрее, чем больше Δ) переходит в отражение от головной части следа. При $\Delta = 1$ величина коэффициента амбиполярной диффузии, найденная по уменьшению со временем амплитуды отраженного сигнала без учета расширения следа, за время формирования основных зон Френеля оказывается заниженной примерно на 30 %.

Согласно (6) отношения амплитуд в моменты последовательных максимумов дифракционной картины, а также отношения расстояний между различными экстремумами зависят только от Δ. Особенно сильно зависит от Δ отношение амплитуд в моменты первого и второго максимумов и отношений длин зон АВ/ВС. Таким образом, для каждого следа величину Δ можно найти тремя способами: Δ_1 – по выражению (7), измеряя спад амплитуды, скорость и дальность; Δ_2 – по отношению амплитуд в моменты первого и второго максимумов; Δ_3 – по отношению длин зон АВ/ВС. Условием применимости выражений (6) – (7) является равенство $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta_3$.

Основные этапы обработки АВХ

Опишем общие требования к функциональности создаваемого программного обеспечения, реализующего автоматизированную обработку АВХ:

- произвести оцифровку АВХ с минимальными потерями информации;
- оцифрованные характеристики сохранить в графическом файле с форматом, который обеспечивает максимальное качество изображения при данном разрешении;
- перед дальнейшей обработкой произвести фильтрацию изображения от шумов, т.к. кинопленка может содержать различные дефекты (царапины, трещины);
- произвести нормирование изображения, т.к. при оцифровке возможно появление незначительного наклона изображения, что в будущем может осложнить обработку;
- произвести сканирование изображения на наличие меток развертки индикаторного устройства, чтобы было возможным в дальнейшем определение точного временного положения каждого из отсчетов АВХ;
- провести подсчет найденных меток из расчета, что между каждыми двумя метками находится десять импульсов с частотой 500 *Гц*, что позволяет определить временные соотношения в оцифрованной АВХ;
- зная положения каждого импульса на временной оси, определить величину амплитуды принятого сигнала, которые описывают форму зарегистрированной АВХ;
- приступить к определению скорости метеора и диффузии метеорного следа.

Первичная обработка заключается в оценке параметров сигналов. Поскольку задачу оценки параметров сигнала можно представить как задачу распознавания образов, то целесообразно использовать методы распознавания образов, например сравнение, теоретически рассчитанных характеристик АВХ с экспериментальными и выбор наиболее близких характеристик по различным параметрам.

Очень важным вопросом является определение истинных положений экстремумов оцифрованных АВХ. Понятно, что из-за дискретности зондирующего сигнала возможны случаи, когда время получения отраженных импульсов не будет точно отражать действительное положение экстремумов характеристики, а будет показывать только приближенное положение экстремума. Также понятно, что шум воздействует на все отсчеты, и нет гарантии, что амплитуда отсчета, соответствующего локальному экстремуму, действительно такая, какой она должна быть. Для решения этой задачи необходимо произвести аппроксимацию координат точек, лежащих вблизи локальных экстремумов, а затем найти производную полученного полинома, чтобы определить местоположение действительного экстремума. Аппроксимацию можно произвести полиномом второй степени $Y = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 x^2$, так как известно, что подобные полиномы имеют всего лишь один экстремум.

Для аппроксимации можно брать координаты 5 – 7 отсчетов, лежащих вблизи экстремума. Количество аппроксимируемых отсчетов зависит от того, насколько часто в данной части временной оси расположены зоны Френеля. Сразу можно сказать, что данные, полученные для первых зон Френеля, будут более точными, чем данные, полученные для более высоких зон Френеля, в которых можно принять к обработке меньше отсчетов. Идея метода наименьших квадратов заключается в том, что функцию $Y = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 x^2$ необходимо подобрать таким образом, чтобы сумма квадратов отклонений экспериментальных значений y_i от расчетных $Y_i = f(x, a_0, a_1, a_2)$, была наименьшей:

$$S(a_0, a_1, a_2) = \sum_{i=1}^{n} (y_i - a_0 - a_1 x_i - a_2 x_i^2)^2 \to \min. \tag{7}$$

После дифференцирования S по a_0, a_1 и a_2 получим систему уравнений:

$$\left.\begin{aligned} & na_0 + a_1 \sum_{i=1}^{n} x_1 + a_2 \sum_{i=1}^{n} x_i^2 = \sum_{i=1}^{n} y_i, \\ & a_0 \sum_{i=1}^{n} x_i + a_1 \sum_{i=1}^{n} x_i^2 + a_2 \sum_{i=1}^{n} x_i^3 = \sum_{i=1}^{n} y_i x_i, \\ & a_0 \sum_{i=1}^{n} x_i^2 + a_1 \sum_{i=1}^{n} x_i^3 + a_2 \sum_{i=1}^{n} x_i^4 = \sum_{i=1}^{n} y_i x_i^2. \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

Решив систему (8) одним из методов, описанных в работе [8], найдем значение параметров a_0, a_1, a_2.

Выводы

Выполнение перечисленных выше требований к создаваемому программному обеспечению автоматизированной обработки АВХ позволит извлечь достоверную информацию об основных астрономических характеристиках индивидуальных метеоров – время, скорость, координаты радианта, элементы орбиты за период работы системы МАРС (с 1968 г. по 1972 г.), которая существует на кинопленках.

Список литературы: 1. *Метеорная* автоматизированная радиолокационная система / Кащеев Б.Л., Волощук Ю.И., Ткачук А.А. и др. // Метеорные исследования. – 1977. – № 4. – С. 11 – 61.– М. : Сов. радио. 2. *А.А. Дьяков* Об одном аспекте проблемы автоматизации обработки данных радиолокационных исследований метеорных явлений // Радиотехника. – 1971. – Вып. 16. – С. 55 – 57. 3. *Дьяков А.А.*- Исследование алгоритма вычисления скорости метеора по данным радионаблюдений // Радиотехника». – 1971. – Вып. 16. – С. 58 – 62. 4. *Кащеев Б.Л., Лебединец В.Н., Лагутин М.Ф.* Метеорные явления в атмосфере Земли. – М. : Наука, 1967. – 260 с. 5. *Lovell A.C.B., Clegg J.A.* Characteristics of radio echoes from meteor trails. I: The intensity of the radio reflections and electron density in the trails // Proc. Phys. Soc., 1948, 60, P. 491 – 494. 6. *Kaiser T.R., Closs R.L.* Theory of radio reflections from meteor trails, 1 // Phil. Mag., 1952, (7), 43, P. 1 – 32. 7. *Ловелл Б.* Метеорная астрономия. – М. : Физматгиз, 1958. – 487 с. 8. *Алексеев Е.Р., Чеснокова О.В.* Решение задач вычислительной математики в пакетах Mathcad 12, MATLAB 7, Maple 9. – М. : НТ Пресс, 2006. – 496 с.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 15.03.2011