

Моделирование кривой блеска и поиск периодов
переменных звезд

Н. Е. Курочкин

Предлагается кибернетическая программа для ЭВМ для определения периодов переменных звезд, основанная на методах моделирования кривой блеска и распознавания изображений.

Modelling of the Light Curves and Determinations of Variable Stars Periods
by N. E. Kurochkin

The computer program for the determinations of periods of variable stars is presented. The program is based on the modelling of the light curve and on the methods of the detection of images.

Во многих случаях астрономические задачи связаны с исследованием функций, заданных или наблюдаемых при разрозненных значениях аргумента (времени). Для периодических явлений возникает задача определения периода по разбросанным во времени наблюдениям. С этими проблемами часто встречаются исследователи переменных звезд. Применение ЭВМ существенно облегчает исследования (Холопов, 1970). Разработанные методы, однако, еще недостаточно универсальны и экономичны. Применение методов моделирования открывает здесь новые возможности.

Нами разработаны программы широкого профиля для БЭСМ-4 и БЭСМ-6 для построения кривых блеска по моделям, для поиска периодов периодических процессов, для разложения функций в спектр по периодическим функциям произвольного вида. Программы могут быть применены к разнообразным проблемам астрономии и физики, нами исследовались возможности их применения к изучению переменных звезд. В основу программ положены методы распознавания изображений (см., например, Розенфельд, 1972).

Алгоритм распознавания изображения, заданного машине в численном коде, основан на отыскании значений корреляционной функции вида

$$k(P) = \int_0^P F(P, t) \phi(t) dt \quad (1)$$

где $\phi(t)$ — экспериментальная функция (может быть разрывной или представленной в отдельных точках); $F(P, t)$ — модель или "образ" — производящая с периодом P функция, по которой производится разложение. Предполагается, что $\phi(t)$ является суммой составляющих вида $F(P_k, t)$ с периодами P_k (аналог представления функций рядами Фурье) плюс некоторый шум. В частности, мы можем задавать $F(P, t)$ в виде синусоиды и получать $\sin$ - или $\cos$ -спектр Фурье.

$F(P_k, t)$ — моделирующая функция ("образ"), задается машине в табличной форме с нормированием по периоду и амплитуде. В процессе счета нормируется по периоду (путем вычисления фаз в интервале $(0, 1)$ и по амплитуде, также и функция $\phi(t)$, что позволяет определять $K(P)$ на интервале одного пробного периода $(0, P_k)$. Интеграл при вычислениях заменяется суммой, и при фиксированных для данного ряда вычислений моделях можно не учитывать dt (тем более, что абсолютное значение $K(P)$ не имеет большого значения). Нормировка дает возможность производить сравнение экспериментальной функции и ее модели при разных значениях пробных периодов P_k по ковариации $K(P)$.

Определение периодов переменных звезд является одним из применений этого общего метода. Если звезда имеет единственный истинный период в некотором интервале наблюдений и пробных периодов, то при подходящем выборе модели максимальное значение $K(P)$ будет соответствовать истинному периоду. Следует также учитывать возможность существования ложных, обычно, сопряженных периодов. Алгоритм поиска периодов поэтому состоит в выборе 3—5 значений пробных периодов P_k с максимальными $K(P)$.

Успех дела существенно зависит от удачного выбора модели и нормировки. Обычно, по распределению звездных величин блеска звезды можно установить тип кривой блеска, является ли звезда физической переменной с асимметричной кривой или с симметричной кривой блеска, или относится к затменным, с кривой типа Алголя или типа W UMa. Модели для этих четырех типов переменности различаются, в частности, способом нормировки. Однако, в пределах одного типа переменности можно применять одну и ту же модель. Отклонения истинной кривой блеска от однотипной модели несущественно снижают величину $K(P)$, и не отражаются на результатах поиска периода.

Ожидаемый "образ" (модель) кривой блеска вводится в машину в равностоящих точках по фазам (например, в 20 точках с шагом 0.05). Постоянный шаг фаз модели задается среди констант, и может быть любым. Образ кривой блеска может быть грубым, например, нарисован от руки в нормированном прямоугольнике; значения ординат снимаются приближенно. Способы нормировки ординат (блеска) могут быть различными. Нами применялись следующие способы:

1. Нормировка по "нормализованной" амплитуде A_{nor} . За нуль-пункт берется средняя звездная величина по всем наблюдениям $\langle m \rangle$. $A_{nor} = \langle m \rangle - m_{max}$. Применяется для физических переменных и звезд типа EW.

2. Нормировка по максимальной амплитуде $A_{\max}$. За нуль-пункт принимается блеск в минимуме $m_{\min}$. $A_{\max} = m_{\min} - m_{\max}$. Для алголей за нуль-пункт принимается $m_{\max}$ и $A_{\max} = (m_{\max} - m_{\min}) < 0$. Способ используется для определения периодов по экстремумам (максимумов или минимумов). Экстремальные точки входят в $K(P)$ с наибольшим весом. Для алголей применяется "перевернутая" модель кривой блеска.

Выбор модели целиком определяется способом нормировки и типом звезды, точное совпадение модели и оригинала не обязательно, поэтому для однотипных переменных можно брать одну и ту же модель.

Выбор пробных периодов в общем случае зависит от интервала наблюдений. В память машины вводят соответствующие константы для вычисления периодов и фаз: моменты двух базовых моментов T_0 и T_n (лучше брать экстремумы); значения $P_{\max}$ и $P_{\min}$ в пределах которых ищется период; L — шаг в долях периода P_n . При $L=1$ пробные периоды укладываются целое число раз в интервале времени между базовыми экстремумами и пробегают весь спектр возможных значений между $P_{\max}$ и $P_{\min}$, т. е. при n -целых

$$P_n = \Delta T / (n + L) = (T_n - T_0) / (n + 1); \quad n_{\min} = \text{ENTIER}(\Delta T / P_{\max}) \quad (2)$$

Величина n , которая при $L=1$, пробегает все целые значения от некоторого $n_{\min}$ является индексом пробного периода. При $L < 1$ можно, однако, достигнуть большего разрешения спектра пробных периодов (число циклов в ΔT оказывается нецелым, уменьшается сдвиг фаз при переходе от одного пробного периода к другому (см. аналогичный подход в работе Холопова (1970), где сдвиг фаз фиксирован значением 0.05). При $L < 1$ лучше выбирать $L=1/k$, где k — целое.

Вычисление фаз ведется способом, описанным автором в 1964 г. (Курочкин, 1964), который более удобен для ЭВМ. В этой работе был также описан простой алгоритм для вычисления периодов, который был недавно реализован на ЭВМ в работе Пиано и Романо (1972).

Дадим несколько практических советов по применению описанного здесь способа. При $L < 1$ получается более подробная развертка в спектр, период более точным, но не следует этим злоупотреблять, так как увеличивается время счета. Первое приближение периода, которое при большой разности базовых эпох часто бывает удовлетворительным, лучше вычислять при $L=1$. При небольшом числе наблюдений точность определения периода мало зависит от L , но существенно связано с выбором модели и базовых экстремумов. Уточнение периода можно вести за счет уточнения модели. Здесь имеются разнообразные возможности, нами еще не реализованные, в частности, схемы с обратной связью. После построения с найденным периодом кривой блеска ее можно ввести в машину вновь в качестве модели и уточнить период с новой моделью, и, может быть, с более дробным шагом L . Программа с обратной связью могла бы служить более общим задачам для построения идеальных образов и классификации объектов.

В нашей программе для пяти максимальных $K(P)$ выдаются фазы (в параллельной записи со звездными величинами). Программа для БЭСМ-6 записана на АЛГОЛЕ-60, в ней возможен вариант с вычислением спектра (для каждого пробного периода происходит выдача величины $K(P)$), а также варианты, допускающие различный вид нормировки кривой блеска. Для распознавания вариантов в константы вводится индекс программы (2 — нормировка относительно средней $\langle m \rangle$, 1 — программа для затменных звезд типа алголя (с "обращением" кривой блеска) 0 — программа с нормировкой блеска по полной амплитуде (тип RR, экстремальный)).

Для звезд типа Алголя задаются преимущественно минимумы и ослабления, а также один-два максимума для определения амплитуды, иначе случайные отклонения в максимуме "забывают" немногочисленные отклонения в минимуме при вычислениях $K(P)$. "Лишние" или неточные наблюдения исключаются при расчетах путем введения признака (для БЭСМ-6 звездным величинам придаются знаки минус вместо признака). Вычисление фаз для периодов с максимальными $K(P)$ ведется, однако, для всех наблюдений в исходном порядке. Кривая блеска затменных звезд типа алголя и звезд типа W UMa с редкими минимумами нормируется, принимая за нуль-пункт максимальный блеск, так что кривая блеска при расчетах $K(P)$ оказывается "перевернутой". "Образ" кривой блеска также должен быть перевернут, тогда точки минимума будут иметь наибольшую значимость при вычислениях корреляций. Нами использовался вариант программы с "усилением" экстремальных точек, с этой целью нормирование производится так, что амплитуда искусственно увеличивается, кривая блеска как бы "растягивается" по ординате. Этот прием имеет смысл применять для звезд с небольшой амплитудой $A < 1$, тогда "усиление" достигается "вторичным" нормированием (делением ординат области $m > \langle m \rangle$ второй раз на амплитуду). Этот прием соответствует "гиперболизации" образа.

Программы позволяют искать периоды по минимальному числу разрозненных наблюдений. При четких изменениях блеска (больших амплитудах) достаточно 30—40 наблюдений. При большом числе наблюдений для сокращения времени счета лучше использовать программу по экстремумам, исключая неэкстремальные точки введением признаков. Исключение внеэкстремальных точек может производиться путем введения нулевых значений ординат в модель кривой блеска во всех нежелательных точках. Таким образом имеется возможность вести вычисления по выбранным отрезкам кривой блеска (область максимума или минимума), исключая остальную часть. Отметим, наконец, что некоторое число ошибочных наблюдений, хотя и снижает $K(P)$, но на вычисление периода существенного влияния не оказывают, если они "не забывают" хорошие наблюдения.

Желательно использовать максимальный интервал ΔT между базовыми экстремумами. Однако, если период подвержен изменениям, вычис-

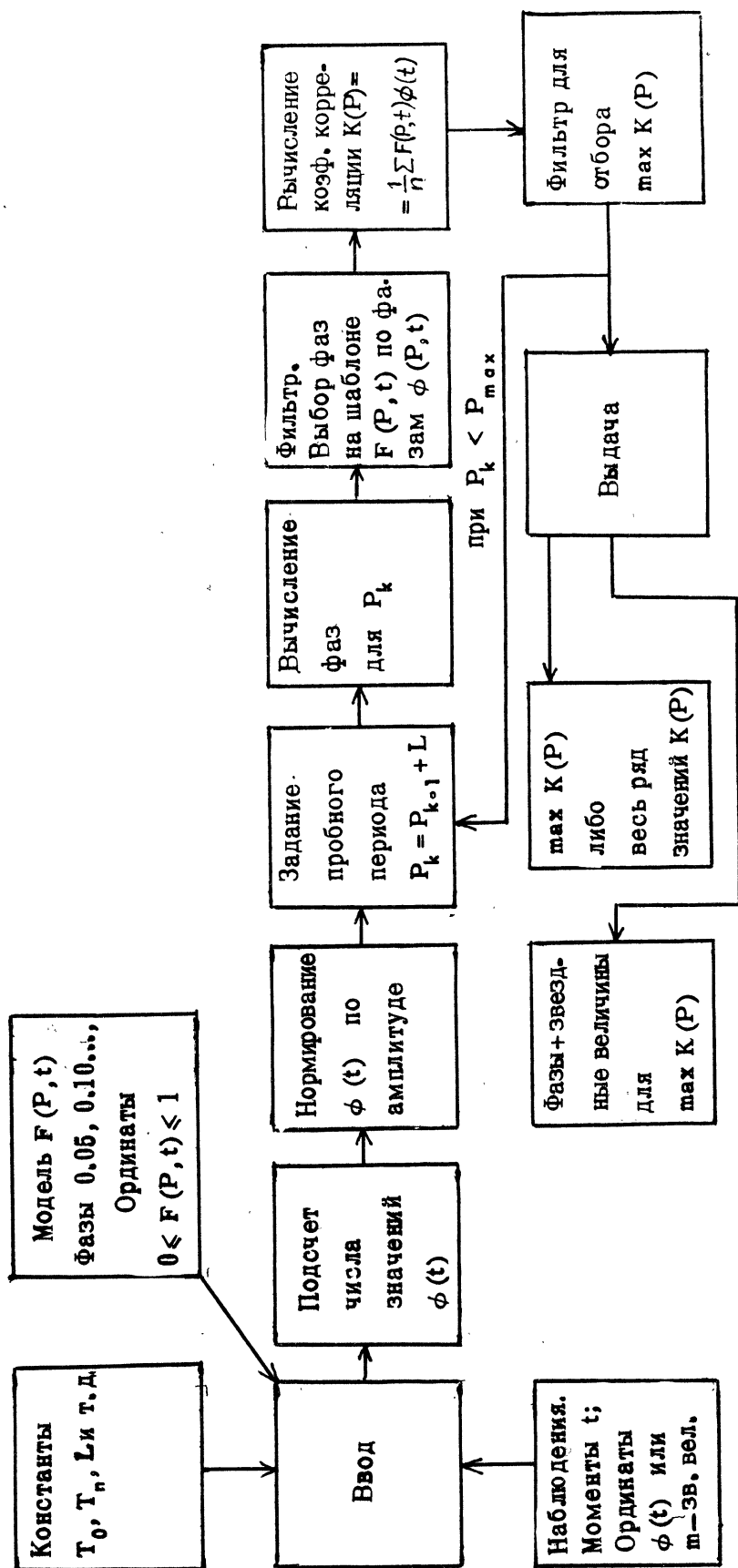


Рис. 1. Блок-схема программ для определения периода, вычисления спектра и фаз по моделям кривой блеска.

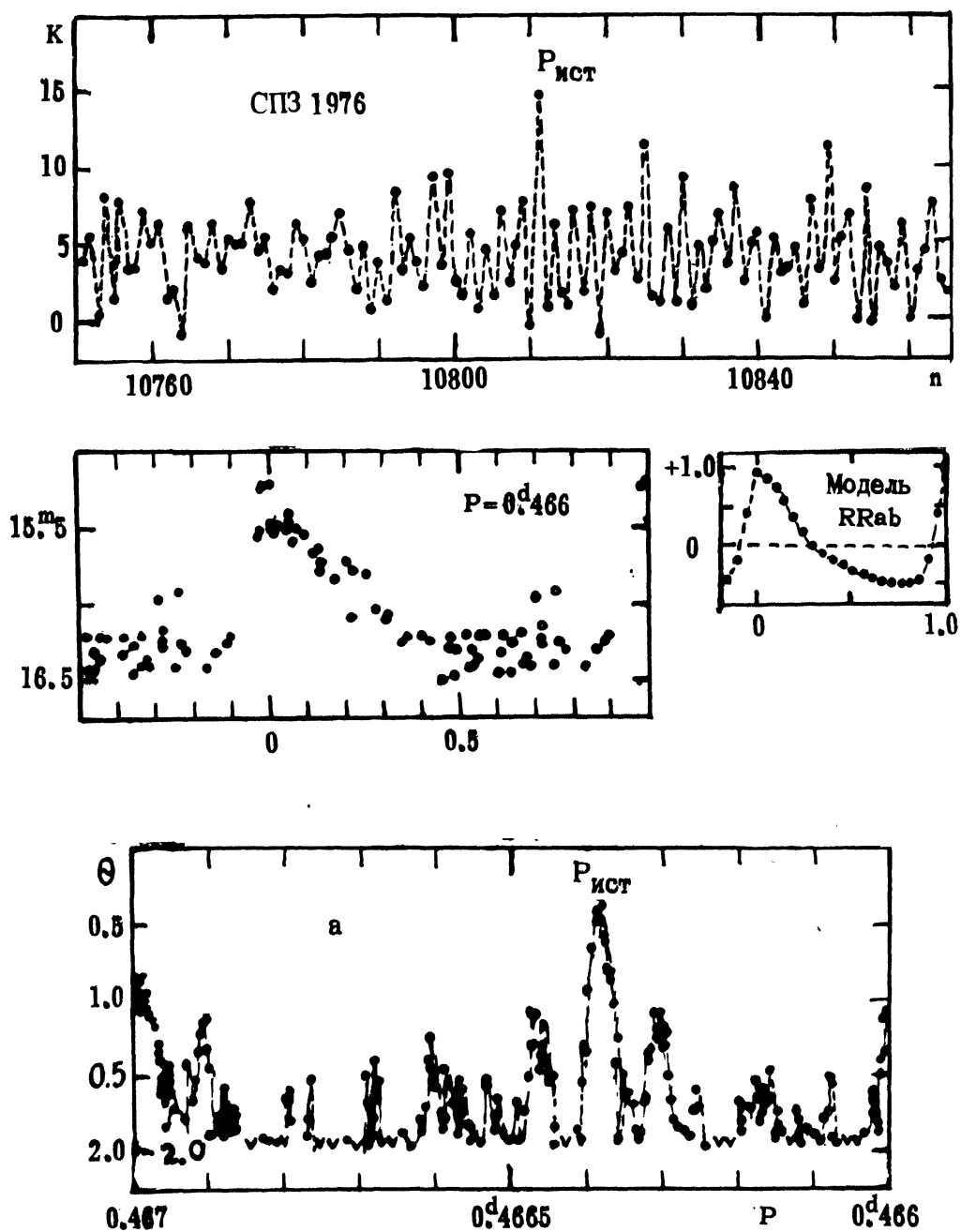


Рис. 2. Пример определения периода для СПЗ 1976 — звезды типа RR Lyr. Представлен участок спектра для пробных периодов. Поиски периода велись в области $0.35 - 0.85$. Истинный период 0.466 соответствует максимальному значению $K(P) \approx 15$ в этой области. Число наблюдений $n = 65$, интервал наблюдений J.D. 2436557–2441619. Время счета на БЭСМ-4 $\sim 20^m$. Вариант КП-8.

ления ведутся по сезонам. Правильное соотношение между ΔT , числом наблюдений и необходимой точностью, а также подход к выбору подходящей модели вырабатывается практикой.

Примеры вычислений периодов по моделям представлены на рис. 2, 3. На рис. 2 приведен спектр значений $K(P)$ вблизи истинного периода 0,466 для звезды типа RR Lyr a. На рис. 2а приведен спектр значений величины θ , вычисленной по программе Холопова (1970) для тех же

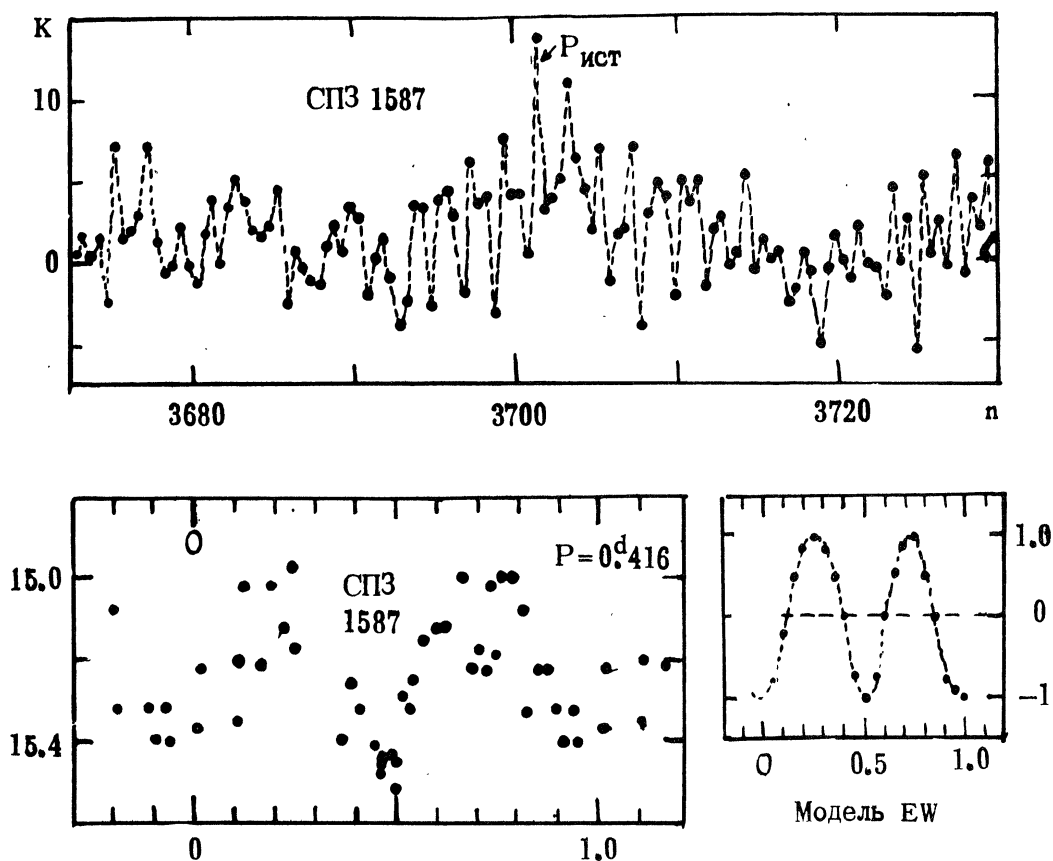


Рис. 8. Пример определения периода для звезды типа EW СПЗ 1587 (Ку-рочкин, 1970). Взяты только 48 наблюдений в интервале J.D. 2437138–38680. Представлен участок спектра для пробных периодов. Истинный период $P=0.416546$ соответствует максимальному значению $K(P) \approx 14$ в интервале поиска $0.46-0.30$. Время счета БЭСМ-4 $\sim 15^m$. Вариант КП-8.

наблюдений. Разрешение в программе Холопова соответствует $L=0.05$ (сдвиг фаз на 0.05). Спектр Холопова для этой звезды более подробный. Превышение величины θ для истинного периода над шумовыми значениями примерно такое же, как и в случае величины $K(P)$ по нашей программе

(в процентном отношении). Вообще, между разбросом θ точек на кривой (критерий выделения периода по Холопову) и величиной $K(P)$ (ковариационный критерий, который используется нами) имеется полная эквивалентность, если модель кривой блеска достаточно близка оригиналу. Преимущество нашего метода состоит в существенной экономии машинного времени.

На рис. 3 дан пример вычисления спектра, кривой блеска и периода для звезды СПЗ 1587 (Куручкин, 1970) по 48 наблюдениям.

Примеры вычисления периодов и кривых блеска для алголей можно найти в работе автора (Куручкин, 1972).

В заключение отметим эвристическое значение разработанного метода. Применение методов моделирования для решения физических и астрономических задач имеет большое будущее. Программы для ЭВМ, позволяющие распознавать изображения и образы, по шаблонам, задаваемым экспериментатором в виде рисунков, могут приблизить ЭВМ к мыслительной деятельности. Мышление человека существенно связано с изобразительной деятельностью по распознаванию и анализу изображений. Экспериментальные объекты обычно сильно искажены по форме или ошибками наблюдений, тем не менее выбор из ряда шаблонов может производиться достаточно быстро по коррелирующим признакам (распознавание). В идеальном и наблюдаемом образах выделяются наиболее существенные, экстремальные признаки, которые в дальнейшем используются с большим весом, что служит в дальнейшем для построения понятий. Программа, которую мы используем в известном смысле содержит уже элементы мыслительной деятельности человека. Чтобы научить машину не только распознавать, но и классифицировать объекты по признакам, требуется введение обратной связи и достаточно большая память. Язык символизации, который применяется для образования понятий, в настоящее время уже реализован в программах ЭВМ. Во многих случаях решение задач познания явлений сводится к построению моделей, сначала приближенных, затем по мере сравнения их с реальностью, все более точных. Знаковые системы не могут существовать независимо от изображений или "образов", которые дают реальную основу для символического познания действительности. Уровень познания определяется богатством образов, в основном изображений, которые содержатся в памяти и могут распознаваться, комбинироваться и использоваться. Научить машину мыслить — это значит прежде всего научить ее оперировать с изображениями или образами. Сравнение идеальных "образов" с реальными, или наблюдаемыми, может производиться, как мы видим, по экстремальным свойствам или признакам, для которых оценивается качественно или количественно коррелятивность, взаимная согласованность.

Из хаоса разрозненных наблюдений блеска переменной звезды мы можем научить машину извлекать закономерности, строить модель явления, сравнивать наблюдаемую модель с гипотетической, которую предлагает сама машина или оператор, можно научить машину строить кривую блеска по найденному ею периоду, или изучать спектр значений при множественной периодичности, — таким образом мы существенно продвигаемся вперед в деле автоматизации научной работы.

Система АЛГОЛ ВЭСМ-6

Определение констант: $A[0:20]$ и распределение памяти

- $A_0 = T_0$ — исходный момент (max, min) отсчета фаз и пробных периодов.
 $A_1 = T_n$ — конечный момент (max, min);
 $A_2 = P_{\max}$ — максимальный пробный период.
 $A_3 = P_{\min}$ — минимальный пробный период;
 A_4 — шаг для пробных периодов (1, 0.5, 0.10 и т.д.).
 A_5 — звездная величина для нормировки (max, min, < m >)
- A_6 — амплитуда нормировки
 A_7 — шаг для определения интервалов периодов.
 $A_8 (T_n - T_0)$ — вычисляется в программе
 A_9 min minimum P
 A_{10} — шаг для вычисления фаз модели.
 A_{11} — индекс варианта.
 $M[0: B]$ — моменты [J.D.]
 $N[0: B]$ — наблюдения [m]
 F — ординаты модели от фазы A_{10} до 1.00
- BEGIN INTEGER I, J, K, B, G, L; REAL T, U;
 - INPUT (B); BEGIN ARRAY M[0:B]; G:=0; INPUT (M); Ввод моментов наблюдений M_i
 - FOR I:=0 STEP 1 UNTIL B DO BEGIN IF $M[I] > 0.5$ THEN G:=G+1 ELSE IF $M[I] < 0.5$ THEN GOTO S19 END; S19: B:=ENTIER(G); Подсчет числа M_i (G)
 - BEGIN ARRAY A[0:20], C[0:100], F[0:100], N[0:B], R[0:100], D[0:B], E[0:B], Y[0:B];
 - INPUT (N, F, A); U:=1/A[10]; L:=ENTIER(U); Ввод зв. величин (N_i), модели (F), констант A_k
 - R[0]:=A[10]; FOR I:=1 STEP 1 UNTIL L DO R[I]:=R[I-1]+A[10]; T:=0; Определение фаз модели.
 - A[8]:=A[1]-A[0]; A[2]:=A[8]/A[2]; A[3]:=A[8]/A[3];
 - FOR I:=0 STEP 1 UNTIL B DO BEGIN M[I]:=M[I]-A[0]; M[I]:=M[I]/A[8] END;
 - I:=A[2]; T:=ENTIER(T); I:=0; J:=0; A[2]:=T; T:=0;
 - S1: IF N[I]<0 THEN GOTO S2;
 - D[J]:=M[I]; E[J]:=N[I]; Вывод в рабочие ячейки значимых наблюдений.
 - J:=J+1;
 - S2: I:=I+1;
 - IF I<B THEN GOTO S1;

15. G:=0; FOR I:=0 STEP 1 UNTIL B DO IF D[I]>0.5 THEN G:=G+1; G:=G-1;
16. IF A[11]>1.5 THEN GOTO S15 ELSE IF A[1]>0.5 THEN GOTO S16 ELSE GOTO S17;
17. S15: A[13]:=100; T:=0; FOR I:=0 STEP 1 UNTIL G DO T:=T+E[I]; U:=G+1; A[5]:=T/U;
18. FOR I:=0 STEP 1 UNTIL G DO IF E[I]<A[13] THEN A[13]:=E[I]; A[6]:=A[5]-A[13]; GOTO S18;
19. S16: A[5]:=100; A[13]:=0;
20. FOR I:=0 STEP 1 UNTIL G DO IF E[I]>A[13] THEN A[13]:=E[I];
21. FOR I:=0 STEP 1 UNTIL G DO IF E[I]<A[5] THEN A[5]:=E[I]; A[6]:=A[5]-A[13]; GOTO S18;
22. S17: A[5]:=0; A[13]:=100; FOR I:=0 STEP 1 UNTIL G DO IF E[I]<A[13] THEN A[13]:=E[I];
23. FOR I:=0 STEP 1 UNTIL G DO IF E[I]>A[5] THEN A[5]:=E[I]; A[6]:=A[5]-A[13];
24. S18: FOR I:=0 STEP 1 UNTIL G DO BEGIN E[I]:=A[5]-E[I]; E[I]:=E[I]/A[6] END;
25. S3: A[2]:=A[2]+A[4]; G[0]:=0;
26. FOR J:=0 STEP 1 UNTIL G DO BEGIN Y[J]:=D[J]×A[2]; T:=Y[J]; T:=ENTIER(T); Y[J]:=Y[J]-T END;
27. FOR J:=0 STEP 1 UNTIL G DO BEGIN IF Y[J]<0 THEN Y[J]:=Y[J]+1 END;
28. I:=0;
S4: K:=-1;
S5: K:=K+1;
29. IF Y[I]-R[K]>0 THEN GOTO S5;
30. C[2]:=E[I]×F[K]; C[0]:=C[0]+C[2];
31. S6: I:=I+1;
- S7: IF I≤G THEN GOTO S4;
IF C[9]>G[0] THEN GOTO S8;
- [32. OUTPUT ('Z+5D.3D', A[2], C[0], '/');]
33. C[5]:=C[6]; C[6]:=C[7]; C[7]:=C[8];
C[8]:=C[9]; C[9]:=C[10]; C[10]:=C[11];
C[11]:=C[12]; C[12]:=C[13]; C[13]:=C[14];
C[14]:=A[2];
34. GOTO S12; S8: IF C[8]>C[0] THEN GOTO S9;
35. C[5]:=C[6]; C[6]:=C[7]; C[7]:=C[8]; C[8]:=C[0];
C[10]:=C[11]; C[11]:=C[12]; C[12]:=C[13];
C[13]:=A[2];

Определение числа значимых наблюдений [G].

Выбор варианта: 2-[EW], 1-[EA], 0-[RR] (по индексу A₁₁)

Нормировка по амплитуде - 1-го варианта.

2-го варианта

3-го варианта

Ввод номера цикла n: =
=n+1 (соотв. P_n)

Вычисление фаз.

Вычисление K ковариации
[модель-кривая блеска]

Фильтр для выбора 5 максимальных значений K.

Для выдачи спектра C[0],
A[2].

36. GOTO S12; S9: IF $C[7] > C[0]$ THEN GOTO S10;
 37. $C[5] := C[6]$; $C[6] := C[7]$; $C[7] := C[0]$; $C[10] :=$
 $= C[11]$; $C[11] := C[12]$; $C[12] := A[2]$;
 38. GOTO S12; S10: IF $C[6] > C[0]$ THEN GOTO S11;
 39. $C[5] := C[6]$; $C[6] := C[0]$; $C[10] := C[11]$;
 $C[11] := A[2]$;
 GOTO S12;
 40. S11: IF $C[5] > C[0]$ THEN GOTO S12;
 41. $C[5] := C[0]$; $C[10] := A[2]$;
 42. S12: IF $A[3] > A[2]$ THEN GOTO S3;
 43. FOR I:=10 STEP 1 UNTIL 14 DO $C[I+5] :=$ Выдача значений K, n и P
 $= A[8]/C[I]$; для 5 max K.
 44. FOR I:=0 STEP 1 UNTIL 15 DO OUTPUT
 $('Y', C[I], '/')$;
 45. FOR I:=15 STEP 1 UNTIL 20 DO OUTPUT
 $('Y+DDD.9D', C[I], '/')$;
 46. K:=9;
 46a. S13: K:=K+1;
 47. FOR I:=0 STEP 1 UNTIL B DO BEGIN Вычисление фаз для 5 мак-
 $Y[I] := M[I] \times C[K]$; $T := Y[I]$; $T := \text{ENTIER}(T)$; симальных K,
 $Y[I] := Y[I] - T$ END;
 48. FOR I:=0 STEP 1 UNTIL B DO BEGIN
 IF $Y[I] < 0$ THEN $Y[I] := Y[I] + 1$ END;
 49. FOR I:=0 STEP 1 UNTIL B DO BEGIN
 $Y[I] := Y[I]/1000$; $Y[I] := Y[I] + N[I]$ END;
 50. FOR I:=0 STEP 1 UNTIL B DO OUTPUT Выдача фаз.
 $('Y+DO 6D', Y[I])$;
 51. IF $K < 14$ THEN GOTO S13;
 52. $A[2] := A[8]/A[2]$; $A[3] := A[8]/A[3]$;
 53. FOR I:=0 STEP 1 UNTIL 19 DO OUTPUT Выдача констант.
 $('Y+6D.3D', A[I], '/')$;
 54. FOR I:=0 STEP 1 UNTIL 100 DO
 $C[I] := 0$;
 55. $A[3] := A[3] - A[7]$;
 56. IF $A[2] < A[9]$ THEN GOTO S14; Цикл для следующего ин-
 тервала пробных периодов.
 57. $A[2] := A[8]/A[2]$; $T := A[2]$; $T := \text{ENTIER}(T)$;
 $A[2] := T$; $A[3] := A[8]/A[3]$;
 58. GOTO S3; END; END; S14:END

Литература:

- Курочкин Н.Е., 1964, АИ № 279.
 Курочкин Н.Е., 1970, ПЗ 17, № 2, 186.
 Курочкин Н.Е., 1972, ПЗ 18, № 5.
 Пиано, Романо, 1972 — Piano G., Romano G., Padova Publ № 162.
 Розенфельд А., 1972, Распознавание и обработка изображений,
 пер. с англ., "Мир", М.
 Холопов П.Н., 1970, Труды ГАИШ 40, 72.

Москва,

Гос. астрономический ин-т

Поступила в редакцию