

НАБЛЮДЕНИЯ БЫСТРОФЛУКТУИРУЮЩИХ ОБЪЕКТОВ. I

МЕТОДИКА И АППАРАТУРА

Г. Н. Алексеев, В. Г. Штоль

Описана методика и аппаратура, применяемые в САО АН СССР для наблюдений быстрофлуктуирующих объектов. Аппаратура совместно с ЭВМ «М-222» позволяет регистрировать переменность блеска астрономических объектов во временном диапазоне $0^{\circ}.002-1000^{\circ}$.

Techniques and apparatus applied at SAO USSR AS to observing rapid-fluctuating objects are described. The instrumentation used with an on-line «M-222» computer allows to register brightness variability of astronomical objects in a time interval from $0^{\circ}.002$ to 1000° .

Исследования последних лет показали наличие у многих звезд быстрых флуктуаций блеска [1—5]. Быстрыми флуктуациями мы будем называть правильные или неправильные колебания блеска, имеющие дискретный, непрерывный или смешанный временной спектр. При их исследовании в большинстве случаев использовались методы непосредственной регистрации блеска с временным разрешением до 1° (на телескопе $80''$). Этот метод неудобен тем, что он применим только в случае относительно ярких звезд и не дает достоверных результатов в области частот, превышающих 1 гц, где существенное влияние оказывает атмосфера.

Методика

Можно предложить косвенный метод исследования, который дает большую информацию о процессах, порождающих флуктуации. Рассмотрим сущность этого метода на примере телевизионной регистрации. Серия телевизионных снимков области неба, состоящая из N кадров, фотометрируется, и для каждого кадра находят: V_i — блеск переменной звезды, S_i — блеск звезды сравнения, Φ_i — яркость фона.

Изменения всех этих величин будем считать случайными процессами с какими-то определенными дисперсией и средним значением. Считая эти процессы стационарными, определим для каждого из них центрированную, нормированную автокорреляционную функцию:

$$R_V(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^{N-\tau} \left[\left(V_{i+\tau} - \sum_{j=1}^N V_j/N \right) \cdot \left(V_i - \sum_{j=1}^N V_j/N \right) \right]}{\sum_{k=1}^N \left(V_k - \sum_{l=1}^N V_l/N \right)^2 / N}, \quad (1)$$

$$R_S(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^{N-\tau} \left[\left(S_{i+\tau} - \sum_{j=1}^N S_j/N \right) \cdot \left(S_i - \sum_{j=1}^N S_j/N \right) \right]}{\sum_{k=1}^N \left(S_k - \sum_{l=1}^N S_l/N \right)^2 / N}, \quad (2)$$

$$R_\Phi(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^{N-\tau} \left[\left(\Phi_{i+\tau} - \sum_{j=1}^N \Phi_j/N \right) \cdot \left(\Phi_i - \sum_{j=1}^N \Phi_j/N \right) \right]}{\sum_{k=1}^N \left(\Phi_k - \sum_{l=1}^N \Phi_l/N \right)^2 / N}. \quad (3)$$

Здесь τ — шаг корреляции, изменяющийся от 0 до некоторой величины $L < N$. Для всех процессов

$$R(0) = 1. \quad (4)$$

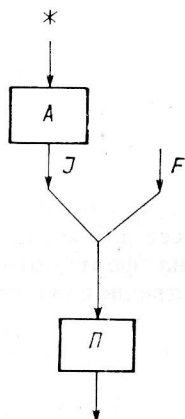


Рис. 1. Измерительный тракт.

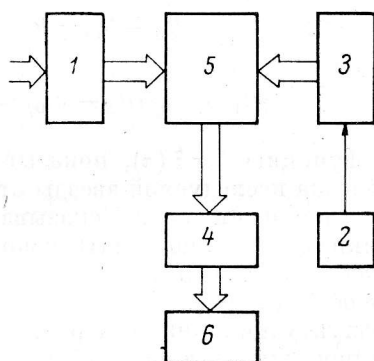


Рис. 2. Схема блока управления перфоратором.

Далее, пользуясь аппаратом статистической радиофизики [6], весь фотометрический тракт можно описать следующим образом (рис. 1).

Звезда излучает «сигнал» с автокорреляционной функцией R_* ; проходя через атмосферу A , он «засоряется» мультипликативной помехой типа «амплитудной модуляции» с автокорреляционной функцией R_A . Предположим, что изменения передаточной функции (пропускания) атмосферы не зависят от входного сигнала (блеска звезды), т. е., что случайные процессы независимы. В таком случае автокорреляционная функция сигнала J , прошедшего атмосферу, есть

$$R_J = R_* R_A. \quad (5)$$

Этот «сигнал» попадает на вход приемника Π , одновременно на вход попадает фоновый сигнал F (свечение неба и темновой ток аппаратуры), который аддитивно складывается с полезным сигналом. В результате получаем автокорреляционную функцию входящего в аппаратуру сигнала:

$$R_{вх} = R_J + R_F. \quad (6)$$

Приемная аппаратура вносит свои мультипликативные помехи с автокорреляционной функцией R_{Π} , так что на выходе системы имеем сигнал с автокорреляционной функцией:

$$R = R_{вх} R_{\Pi} = (R_* R_A + R_F) R_{\Pi}. \quad (7)$$

Для исследуемой звезды

$$R_V = (R_{*V}R_A + R_F)R_{II}. \quad (8)$$

Для звезды сравнения

$$R_S = (R_{*S}R_A + R_F)R_{II}. \quad (9)$$

Для фона

$$R_{\Phi} = R_F R_{II}. \quad (10)$$

В этих равенствах предполагается, что свойства атмосферы и приемной аппаратуры одинаково проявляются для обеих звезд, что не должно вызывать сомнений, так как все измерения проводятся одновременно в небольшой площадке неба ($\sim 2'$).

В левых частях этих равенств стоят известные функции R_V , R_S , R_{Φ} , функции в правых частях неизвестны. Вычтем (10) из (8) и (9):

$$R_V - R_{\Phi} = R_{*V}R_A R_{II}, \quad (11)$$

$$R_S - R_{\Phi} = R_{*S}R_A R_{II}. \quad (12)$$

Отношение

$$(R_V - R_{\Phi}) / (R_S - R_{\Phi}) = R_{*V} / R_{*S} = \xi \quad (13)$$

дает важную функцию $\xi = \xi(\tau)$, показывающую, как отличается процесс флуктуаций блеска исследуемой звезды от процесса для звезды сравнения. Атмосферные помехи никак не сказываются на форме этой функции. Зная вид функции ξ , можно делать некоторые предположения о физических процессах, ответственных за флуктуации.

В качестве объекта сравнения можно использовать звезды с известными процессами флуктуаций, например Солнце.

Все сказанное выше относится к телевизионной регистрации, т. е. к случаю, когда все три источника (2 звезды и фон) измеряются одновременно. Если принять обычный одноканальный электрофотометр, то приходится измерять сначала одну звезду (например, 10 мин.), потом фон (еще 10 мин.) и звезду сравнения (10 мин.).

Таким образом, измеренные значения V_i , S_i и Φ_i и вычисленные R_V , R_S и R_{Φ} будут относиться к различным моментам. Априорно допустим, что статистические свойства атмосферы и приемника за отрезок времени $\sim 1^h$ существенно не изменяются; это допущение может быть проверено экспериментально. В таком случае и при обработке обычных электрофотометрических наблюдений также можно воспользоваться формулой (13).

Аппаратура

Для осуществления описанных наблюдений достаточно иметь обыкновенный электрофотометр с быстродействующей регистрирующей частью. Такой фотометр был изготовлен в САО АН СССР для телескопа «Цейсс-600» (зеркало 600 мм). Оптическая головка электрофотометра имеет офсетный гид и автогид, что позволяет непрерывно измерять звезду в течение нескольких часов. В двух поворотных туннелях имеются светофильтры для реализации фотометрической системы U , B , V , а также фильтры КС-5, КС-8, ИКС-1, ОС-12, УФС-6.

В качестве приемников излучения применяются ФЭУ-79 для видимой области и ФЭУ-62 для инфракрасной. Катод ФЭУ может охлаждаться твердой углекислотой посредством жидкого теплоносителя. Температура катода от -20°C до -60°C поддерживается с точностью до 0.1.

Аттенюатор, усилитель и формирователь сигнала ФЭУ собраны в единый блок, установленный непосредственно на стакане ФЭУ. Установка порога дискриминации осуществляется дистанционно.

Усиленный и сформированный сигнал по коаксиальному кабелю длиной 10 м подается на вход частотомера ЧЗ-30, работающего в режиме счета импульсов с экспозициями $0^{\circ}001$, $0^{\circ}01$, $0^{\circ}1$, 1° , 10° . Результаты счета в виде двоично-десятичного параллельного кода подаются на вход блока управления перфоратором.

Блок управления перфоратора состоит из шести узлов (рис. 2). Цифрой 1 обозначены предварительные усилители для согласования большого выходного сопротивления частотомера с малым входным сопротивлением последующих узлов. В качестве таких усилителей применены каскады эмиттерных повторителей на составных транзисторах. Управление перфорацией осуществляется синхронизирующими импульсами с индукцион-

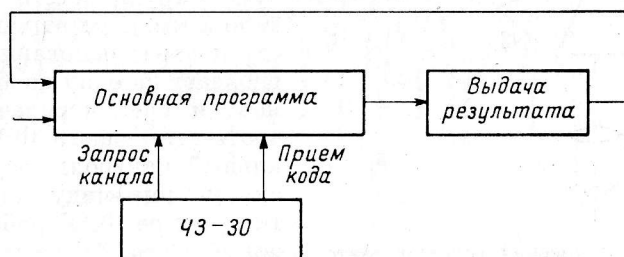


Рис. 3. Схема вычислительного процесса.

ных датчиков фазы перфоратора (2). Импульсы тока формируются в блоке триггеров (3) и усиливаются в блоке оконечных усилителей (4). Поочередный опрос разрядов частотомера осуществляется в блоке логических матриц (5). Усиленные импульсы тока поступают на электромагниты пуассонов перфоратора (6).

В системе регистрации применяется ленточный перфоратор ПЛ-150. Максимальная скорость перфорации по техническим условиям составляет 150 двоично-десятичных цифр в секунду, фактическая скорость равна 160 сек.^{-1} . Для большей наглядности результатов при регистрации может быть применена электропишущая машинка типа ЭУМ-21 с транскриптором Ф-595. Максимальная скорость регистрации в таком варианте — одно восьмиразрядное число в секунду.

Такой вариант регистрации применялся нами при наблюдениях в период с октября 1972 г. по май 1973 г. Существенным недостатком этой методики является значительное «мертвое время», составляющее $\sim 0^{\circ}1$ (время простоя частотомера).

В мае 1973 г. для перфоратора была изготовлена буферная память емкостью в одно двенадцатиразрядное слово, в итоге «мертвое время» снизилось до $0^{\circ}001$.

С июня 1973 г. регистрирующая аппаратура работает в системе «on line» с ЭВМ «М-222». Блок-схема всего процесса наблюдений показана на рис. 3.

ЭВМ производит обработку уже поступившей с телескопа информации по основной программе (например, вычисляет автокорреляционную функцию). По требованию канала (частотомера) машина прерывает решение основной задачи и производит прием цифрового кода с частотомера. При обмене информацией с частотомером ЭВМ выдает звуковой сигнал контроля на телескоп. По окончании обмена машина продолжает решение

основной задачи. После окончания счета машина выдает результаты и вновь уходит на начало программы. Прохождение всех служебных сигналов при обмене частотомера с ЭВМ проверяется автоматически. Неконтролируемые сбои полностью исключены. Управление аппаратурой и ЭВМ осуществляется с телескопа с помощью двух кнопок.

Одновременно ЭВМ осуществляет гидирование телескопа по соседней звезде с помощью приставки «Автогид». Принцип действия «Автогида» ясен из схемы, представленной на рис. 4.

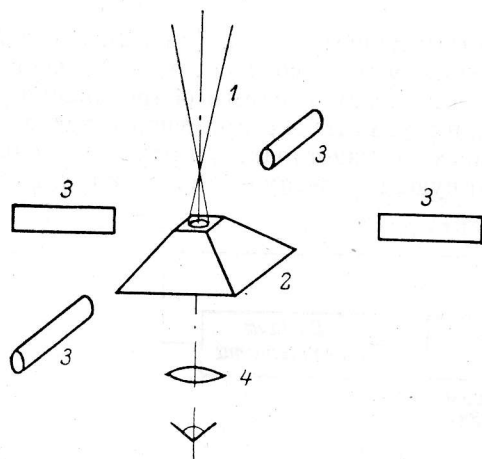


Рис. 4. Схема оптической головки «Автогида».

Конус света гидировочной звезды (1) падает на усеченную пирамиду (2) с алюминиевыми боковыми гранями. Верхнее основание пирамиды расположено за фокусом пучка, и на нем образуется кружок света диаметром от 1 до 2 мм. При отклонении пучка от центра основания край его сползает на одну из боковых граней, и свет попадает на катод соответствующего ФЭУ (3). Визуальный контроль осуществляется сквозь пирамиду окуляром (4). Все четыре ФЭУ работают в режиме счета фотонов. Показания счетчиков считываются по требованию ЭВМ, по сигналам дат-

чика времени или по команде наблюдателя. ЭВМ сравнивает показания счетчиков и вырабатывает сигнал включения тонкого движения телескопа по соответствующей координате. Этот сигнал усиливается магнитными усилителями, работающими в релейном режиме, и подается на электромагнитные муфты реверса δ или на двигатель планетарного редуктора α . Показания счетчиков в исходном состоянии «запоминаются» машиной заранее.

Описанная система «удерживает» телескоп по гидировочной звезде не слабее 10^m с точностью $5''$ в течение всей ночи. Вся аппаратура не требует инженерного обслуживания и показала высокую надежность в работе и большие удобства.

Моделирование

Для предварительной оценки чувствительности метода было проведено численное моделирование на ЭВМ «Мир-1». Сигнал от звезды представлялся функцией $\eta(t)$ с нормальным распределением, характеризующимся параметрами m_η и d_η . Если звезда не имеет собственных колебаний, то автокорреляционная функция ее блеска не обнаруживает никакой связности у процесса. Примем среднее значение потока импульсов от звезды $m_\eta = 80 \text{ сек.}^{-1}$, дисперсию $d_\eta = 60$. При этом случайный процесс с числом точек $N = 100$ будет выглядеть так, как показано на рис. 5.

Его автокорреляционная функция, как и ожидалось, не имеет никаких особенностей (рис. 6). Реальные процессы в земной атмосфере и на звездах обладают некоторой связностью с характерным временем Θ . Смоделируем это, введя в процесс усреднение с постоянной времени $\Theta = 8 \text{ сек.}$ Автокорреляционная функция (а. к. ф.) при этом изменяется (рис. 7). Ее плавное падение показывает, что быстрые флуктуации усредняются

(замываются). К такому же эффекту приводит и инерционность аппаратуры. Попробуем оценить чувствительность автокорреляционного анализа при обнаружении периодических явлений. Для этого промодулируем параметр m_η исходного случайного процесса функцией

$$1 + (a/m_\eta) \sin(2\pi t/P). \quad (14)$$

Примем $P=8$. График а. к. ф. такого процесса при $a=18$ показан на рис. 8.

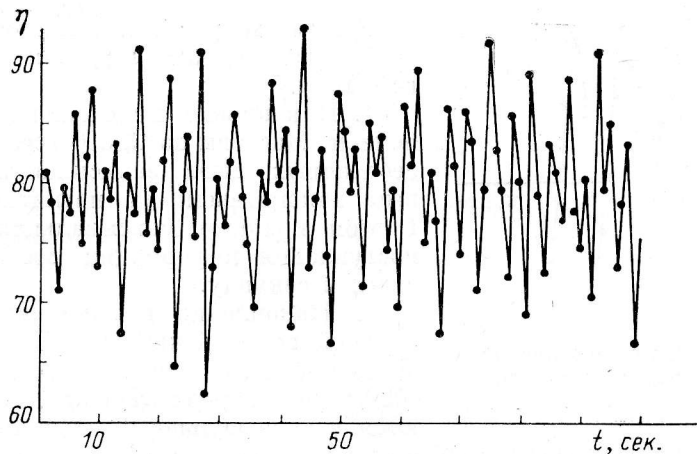


Рис. 5. Исходный случайный процесс.

Уменьшая параметр a , можно найти предел чувствительности а. к. ф. к периодическим колебаниям. В данном случае при $a=1.2$ на а. к. ф. еще видны пики, повторяющиеся через $\tau=8$ с; чувствительность метода определяется как

$$\rho = a/m_\eta = 1.2/80 = 1.5\%. \quad (15)$$

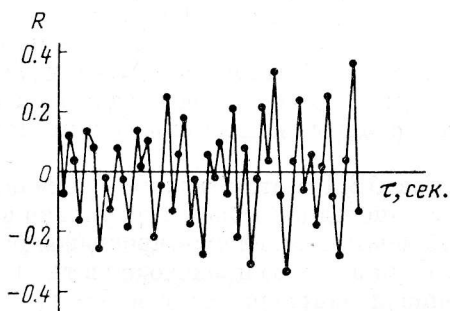


Рис. 6. Автокорреляционная функция процесса, изображенного на рис. 5.

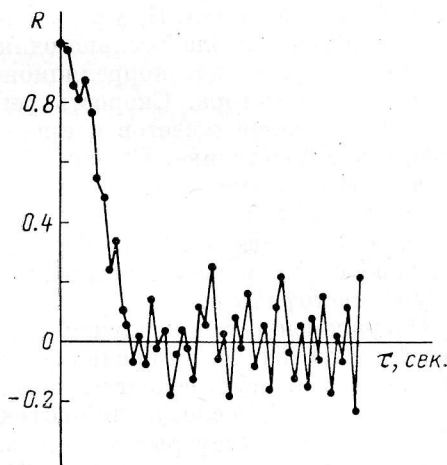


Рис. 7. Автокорреляционная функция при наличии усреднения.

Такая оценка чувствительности метода довольно груба, но для более детального анализа необходимо иметь несколько реализаций исследуемого процесса. Но даже из этих оценок видна высокая чувствительность метода при обнаружении периодических колебаний, а именно: при наблюдении

объекта со средним потоком импульсов $m=10000 \text{ сек.}^{-1}$ с временным разрешением 0.1 за 400 сек. можно получить а. к. ф. с ошибкой, равной 0.05% ; при разрешении 0.01 и 40 сек. ошибка составляет 0.16% .

В реальных условиях такую высокую точность портят мерцания атмосферы и медленный дрейф параметров аппаратуры.

Режим работы. Математические программы

В качестве рабочих режимов экспрессной обработки используются следующие варианты.

1. Накопление информации с уплотнением. Массивы по $12\ 000$ трехразрядных десятичных чисел записываются цифровым накопителем на магнитной ленте. В этом варианте максимальная скорость поступления информации составляет 500 чисел в секунду.

2. Накопление информации с параллельной выдачей кривой блеска «в реальном времени». Накапливаются массивы по 4000 чисел; параллельно отсчеты усредняются с произвольной постоянной времени

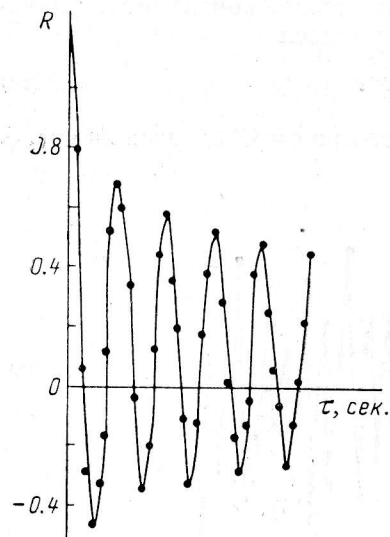


Рис. 8. Автокорреляционная функция при периодической модуляции.

($0.5-2 \text{ сек.}$). Результат усреднения в виде цифрового кода поступает на цифроаналоговый преобразователь (ЦАП). Выходной аналоговый сигнал регистрируется в виде графика электронно-лучевым индикатором (ЭЛИ), который установлен непосредственно на телескопе. Максимальная скорость поступления информации составляет 500 чисел в секунду.

3. Накопление информации с параллельной выдачей графика автокорреляционной функции. При этом используются последние 100 из поступивших отсчетов. Приблизительно один раз в секунду осуществляется вывод графика текущей автокорреляционной функции на экран электронно-лучевого индикатора. Скорость регистрации достигает 500 сек.^{-1}

4. Накопление отсчетов и проведение фотометрических измерений по классической методике. Список объектов и очередность измерений задаются перфокартами и могут изменяться с отладочного пульта машины. Команды наблюдателю с ЭВМ подаются посредством светового табло, состоящего из светодиодов. Типы команд: а) номер очередного объекта; б) вид объекта (основной, сравнения, контрольный или люминофор); в) требуемый светофильтр.

Одновременно с накоплением отсчетов ЭВМ в этом режиме оценивает достигнутую точность и сравнивает ее с наперед заданной. Как только относительная ошибка станет меньше требуемой, накопление прекращается, и машина «просит» следующий объект. Если этого не происходит в течение 100 сек. , машина прерывает накопление и запрашивает у наблюдателя разрешение снизить требования. Наблюдатель либо повторяет попытку, либо разрешает снизить точность в 2 раза. По окончании наблюдений вся информация записывается на магнитную ленту, она может быть выведена на печать или на перфокарты.

При любом варианте работы машина сперва сама выбирает режим накопления. Для этого она оценивает поток импульсов от объекта и переключает экспозиции частотомера в положение, при котором его показания находятся в интервале $70-700$. Это гарантирует регистрацию как затмений, так и незначительных вспышек звезд.

Впоследствии мы предполагаем передать ЭВМ также весь процесс наведения телескопа на требуемый объект.

Для осуществления всех этих разнообразных связей машины с наблюдательной аппаратурой и с наблюдателем применяется многоуровневная система прерываний по каналам 2—7 ЭВМ «М-222». Прерывания обрабатываются аппаратурной частью «диспетчера» и программной его частью, созданной специально для данного эксперимента. Кроме того, «диспетчер» обрабатывает «метки времени» (кварцевый генератор 1 гц) и аварийные ситуации (защита памяти, ошибки машины). В программах широко используются богатые возможности системных команд обмена с абонентами каналов.

Накопленные на магнитной ленте массивы информации могут обрабатываться по следующим более подробным программам.

1. Перекодировки и разуплотнения информации.

2. Вычисления нормированной, центрированной а. к. ф. (1) с исходными массивами по 4000 или 12 000 точек. Функция вычисляется до $\tau = 2000$, результат записывается на магнитную ленту, распечатывается, может быть выведен на графопостроитель или на перфокарты.

3. Вычисления нормированного спектра мощности. Используются а.к.ф. и \cos — Фурье-преобразование.

4. Поиска периодов у интересных объектов. Вычисления проводятся по методике Юркевича [7].

5. Коррекции массивов. Она применяется в случае, когда в массиве встречаются точки с искусственным резким скачком блеска (дрожания телескопа, превосходящие размер диафрагмы; вспышки молний; электрические помехи и др.). Реальные вспышки объекта не исключаются, так как они значительно продолжительней помех.

Все программы унифицированы и записаны на магнитной ленте в виде автономной системы математического обеспечения. Обращение к той или иной программе осуществляется одной перфокартой, каждая строка которой содержит номер требуемой программы и номер исходного числового массива.

Используемые сейчас математические программы ориентированы в основном на обнаружение быстрых стационарных флуктуаций и неэффективны при их подробном изучении. Но система математического обеспечения унифицирована и позволяет включать программы сколь угодно сложного анализа уже обнаруженных быстрых процессов. Такие программы сейчас разрабатываются.

Математическое обеспечение протестировано и показало высокую достоверность и удобства. Весь комплекс аппаратуры и математического обеспечения может применяться для решения многих фотометрических задач. Наблюдательная программа и некоторые результаты будут описаны отдельно.

Авторы приносят благодарность Б. И. Левитану за помощь при освоении ЭВМ «М-222», А. Н. Самойлову за изготовление некоторых узлов аппаратуры, а также всем сотрудникам САО АН СССР, принимавшим участие в обсуждении работы.

Литература

1. G. M. Lawrence, J. P. Ostriker, J. E. Hesser, *Astrophys. J.*, **148**, L161, 1967.
2. B. Warner, R. E. Nather, *Mon. Not. R. astron. Soc.*, **147**, 21, 1970.
3. W. N. Charman, *Appl. Opt.*, **7**, No. 12, 2431, 1968.
4. B. Warner, R. E. Nather, *Nature Phys. Sci.*, **239**, No. 88, 13, 1972.
5. B. Warner, R. E. Nather, *Mon. Not. R. astron. Soc.*, **159**, No. 4, 429, 1972.
6. И. С. Гоноровский. Радиотехнические цепи и сигналы. М., «Советское радио», 1967.
7. J. Jurkevich, *Astrophys. and Space Sci.*, **13**, No. 1, 154, 1971.