

УДК 522.61

АСТРОФИЗИКА

Б. О. Карапетян, В. С. Осканян

Информационные критерии оценки эффективности астрофизических наблюдений

(Представлено академиком В. А. Амбарцумяном 28/VII 1978)

В настоящее время астрофизические наблюдения выполняются при помощи сложного комплекса оптических приборов, приемной аппаратуры и вычислительных средств, образующих систему, по которой проходит информация об исследуемом объекте. Информативность астрофизических наблюдений, эффективность использования оборудования и времени наблюдателей зависят как от выбора и согласования параметров и режимов работы составляющих звеньев системы, так и от методики наблюдений и обработки данных. Под информативностью здесь подразумевается получение в результате наблюдений максимально возможного объема сведений об исследуемом объекте или явлении.

В данной работе не рассматриваются вопросы оценки содержания полученных при наблюдениях данных, ценность которых в большой степени определяется постановкой наблюдательной задачи, априорными сведениями, состоянием теории и другими факторами.

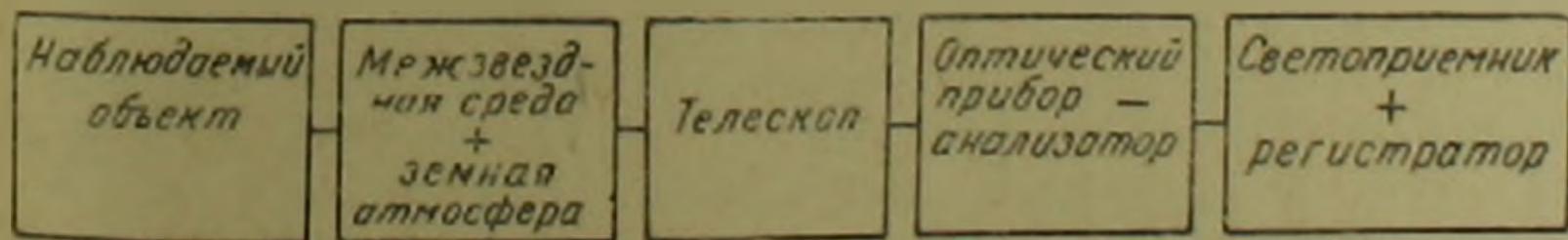
Для правильного выбора и согласования параметров надо рассматривать наблюдательную систему как единое целое, учитывая преобразования и искажения, вносимые всеми последовательными звеньями информационного тракта. Большое значение при этом приобретают критерии, по которым оцениваются, сравниваются и выбираются различные звенья системы. Обычно для оценки телескопов, оптического инструмента, приемной аппаратуры используются т. н. «паспортные» данные, относящиеся к непосредственно измеряемым величинам такие как светосила, разрешающая способность, чувствительность, коэффициент усиления и др., не дающие сами по себе представления о влиянии данного прибора на информативность системы в целом, и поэтому не всегда удобные для сравнения и выбора вариантов, особенно в тех случаях, когда наблюдательная задача может быть решена с помощью различных приборов, отличающихся по принципу действия, т. е. по размерности параметров, определяющих их качество. В таких случаях затруднительно судить об эффективном согласовании параметров последовательных звеньев системы, тем более, что нередко улучшение одного параметра достигается ценой ухудшения другого.

Это приводит к необходимости определения обобщенных критериев, применимых ко всем звеньям системы и отражающих взаимозависимость отдельных инструментальных и аппаратурных параметров. К числу обобщенных характеристик, предложенных для оценки астрономических приемников, относятся эквивалентный квантовый выход ⁽¹⁾, скорость получения информации ⁽²⁾ и др. Эти величины все же не могут служить достаточно полными характеристиками информационной способности, так как в них не отражены такие важные факторы, как динамический диапазон, спектральная чувствительность и т. д. Критерием, позволяющим учитывать параметры различных звеньев системы, является пронизывающая способность, или предельно обнаружимая звездная величина ^(3,4). Однако с помощью этого критерия можно оценивать только пороговые свойства системы, но не способность передавать полную информацию об объекте.

Единый подход ко всем звеньям системы и наиболее полный учет влияния различных параметров на работу всей системы становятся возможными при обращении к методам теории информации ⁽⁵⁾. Развитие аппарата теории информации применительно к оценке оптического изображения, оптических систем и приемников ⁽⁶⁻⁸⁾ позволило вплотную подойти к использованию этих методов для оценки эффективности астрономических наблюдений.

В настоящей работе в общем виде рассматривается передача оптической информации при астрономических наблюдениях, определяются обобщенные информационные характеристики системы и устанавливаются выражения, связывающие эти характеристики с рабочими параметрами звеньев и условиями наблюдений.

Передача оптической информации в астрономической наблюдательной системе. В общем виде структура информационного тракта при астрономических наблюдениях может быть представлена следующим образом:



Все интересующие нас сведения о наблюдаемом объекте, содержащиеся в приходящем от него световом потоке, сводятся, в сущности, к распределению излучения по сферическим координатам α, β (в фокальной плоскости телескопа преобразующимся в линейные координаты x, y), времени t , длине волны λ , позиционному углу электрического вектора θ , фазе φ : $W = \Phi(\alpha, \beta, t, \lambda, \theta, \varphi)$. Диапазоны изменения этих аргументов определяются условиями наблюдений, возможностями инструмен-

тов и аппаратуры, поставленной задачей, и т. д. Точность измерения $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$ и др. в идеальном случае должна ограничиваться принципом неопределенности. Шестимерное пространство сигналов, таким образом, может быть разбито на $n = n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 \cdot n_4 \cdot n_5 \cdot n_6$ элементарных ячеек, где $n_1 = \frac{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}}{\Delta\alpha}$, $n_2 = \frac{\beta_{\max} - \beta_{\min}}{\Delta\beta}$ и т. д.

Уровень энергии сигнала в отдельной элементарной ячейке может быть определен с конечной точностью, позволяющей с заданной вероятностью отнести ее к какому-либо интервалу ΔW , значения энергии. Это обусловлено стохастической природой излучения. Определив величины интервалов ΔW на всем измеряемом диапазоне $W_{\max} - W_{\min}$, мы найдем число m различных градаций энергии сигнала в каждой ячейке.

Таким образом, каждая из n элементарных ячеек может находиться в одном из $(m+1)$ состояний (с учетом нулевого уровня), и всего можно различить $(m+1)^n$ возможных состояний наблюдаемого объекта. При оценке информационных свойств системы будем исходить из максимальной неопределенности получаемого сообщения. Тогда все состояния равновероятны и количество информации об объекте, которую могла бы зарегистрировать идеальная наблюдательная система, равно

$$H = n \log_2(m+1), \text{ бит.} \quad (1)$$

В реальных системах при прохождении сигнала через последовательные звенья тракта происходят существенные потери информации. Во-первых, уменьшается число n элементарных объемов из-за ограниченного разрешения в пространстве, по спектру, во времени и т. д. Уменьшается также число m различных градаций энергии как из-за поглощения и рассеяния, так и из-за конечного динамического диапазона, ограничиваемого снизу шумами, а сверху насыщением в окончательных звеньях.

К принципиальному ограничению количества передаваемой информации в реальных системах приводит сокращение числа независимых аргументов. Оконечные звенья тракта, непосредственно от которых мы получаем информацию, воспринимают и представляют ее в виде распределения интенсивности W по пространственным координатам x , y или времени t . Поэтому за телескопом в структурной схеме следует оптический прибор-анализатор (спектрограф, поляриметр, интерферометр и пр.), преобразующий функции по λ , θ или φ в функции по x , y или t . На этой стадии происходит отбор информации по определенным аргументам исходя из задачи наблюдений. При этом, разумеется, теряется информация по всем остальным аргументам, в том числе по аргументам, служащим „посредниками“, т. е. по x , y или t . Шестимерное пространство сигналов сводится к одно-, двух- или трехмерному $\Phi(x, y, t)$.

Результирующее количество информации на выходе системы

$$H_p = n_p \log_2(m_p + 1), \text{ бит}, \quad (2)$$

где n_p и m_p зависят от условий наблюдения, структуры системы и параметров ее звеньев.

Максимальное количество информации, передаваемое системой, (информационная емкость), количество информации, приходящееся на единичную площадку, (удельная информационная емкость) и количество информации, передаваемое за единицу времени, (информационная пропускная способность) являются характеристиками, обобщающими влияние отдельных звеньев системы на ее информационные свойства. При сравнении различных систем важным критерием является величина информационной чувствительности (или информационного квантового выхода), определяющая количество информации на выходе, приходящееся на единицу энергии излучения на входе (или на один приходящий квант) ^(2,9).

Связь обобщенных информационных характеристик с параметрами звеньев системы. Носителями информации на входе системы являются кванты излучения, а на выходе — т. н. «сигнальные события» (электрические импульсы, почерневшие зерна фотоэмульсии, деления шкалы измерительного устройства, вспышки на экране ЭЛТ и т. д.), характер которых зависит от характера преобразований, выполняемых оконечными звеньями системы.

Пусть наблюдаемый объект излучает в каждой элементарной ячейке пространства сигналов в среднем \bar{N}_0 квантов. Число сигнальных событий на выходе линейной системы будет равно $\bar{N}_c = C\bar{N}_0$. В коэффициент C войдут такие факторы, как экстинкция и рассеяние в атмосфере и в оптике, световая эффективность оптики, квантовый выход, чувствительность и коэффициент усиления приемника и т. д. Кроме сигнальных, на выходе появляются также шумовые события $\bar{N}_ш$, вызванные фоном излучения ночного неба, собственными шумами приемной аппаратуры и др.

Если приход сигнальных и шумовых событий описывается распределением Пуассона, то для числа m различных градаций сигнала будем иметь ⁽¹⁰⁾

$$m = \frac{\sqrt{k^2 + 8(\bar{N}_c + \bar{N}_ш)} - \sqrt{k^2 + 8\bar{N}_ш}}{2k}, \quad (3)$$

где k — коэффициент достоверности, характеризующий точность измерений.

Число n элементарных ячеек можно найти с помощью теоремы о дискретном представлении через параметры, характеризующие разрешающую способность звеньев. Рассмотрим, например, определение числа n для телескопа. Согласно критерию Рэля ⁽⁴⁾ при диаметре

изображения звезды δ , мм получим величины наименьшего разрешаемого расстояния $\sigma = \delta/2$, мм и разрешающей способности $R = 1/\sigma = 2/\delta$, мм⁻¹. В соответствии с теоремой о дискретном представлении (3.11) сигнал полностью описывается значениями интенсивности в точках, отстоящих друг от друга на расстоянии $1/2R$, мм; число отсчетов на единицу длины (т. е. число элементарных ячеек) $n = 4/\delta$, мм⁻¹.

Полученные значения m и n можно подставить в выражение (2) для количества информации. При этом, однако, предполагается, что передаточная функция постоянна во всем диапазоне передаваемых пространственных частот вплоть до предельной частоты, определяемой разрешающей способностью.

В реальных системах каждое звено является фильтром пространственных (и временных) частот с неидеальной передаточной функцией. С возрастанием частоты сигнала уменьшаются контраст и отношение сигнала к шуму на выходе, и, соответственно, число градаций. Выходной сигнал получается как свертка входного сигнала с аппаратной функцией звена; произведение Фурье-преобразования входного сигнала на частотно-контрастную характеристику (ЧКХ) дает Фурье-преобразование (спектр) выходного сигнала (4.11).

Выражение для количества информации в двумерном изображении имеет вид (4.8):

$$H' = \int_0^{u_{\max}} \int_0^{v_{\max}} \log_2 \left| 1 + \frac{S(u, v) T^2(u, v)}{Q(u, v)} \right| dudv, \text{ бит} \cdot \text{мм}^{-2}, \quad (4)$$

где $u = x^{-1}$; $v = y^{-1}$ — пространственные частоты, мм⁻¹; $S(u, v)$; $Q(u, v)$ — спектральные плотности входного сигнала и шумов соответственно; $T(u, v)$ — ЧКХ. Если входное сообщение и шумы характеризуются максимальной неопределенностью, то $S(u, v) = \text{const}$ и $Q(u, v) = \text{const}$. Тогда для осесимметричных систем

$$H' = 2\pi \int_0^{v_{\max}} \log_2 [1 + m(0) T^2(v)] v dv, \text{ бит} \cdot \text{мм}^{-2}, \quad (5)$$

где $v = \sqrt{u^2 + v^2}$, мм⁻¹ и $m(0)$ — число градаций при нулевой пространственной частоте, определяемое по формуле (3).

На основе предложенной методики авторами выведены расчетные выражения для оценки информационных свойств астрономических наблюдательных систем.

Авторы выражают благодарность академику В. А. Амбарцумяну за обсуждение настоящей работы и ценные замечания.

Институт радиофизики и электроники
Академии наук Армянской ССР
Бюраканская астрофизическая обсерватория
Академии наук Армянской ССР

Աստղագիտական դիտումների տեղեկատվությունը գնահատելու
ինֆորմացիոն շափանիչները

Աստղագիտական դիտումների ժամանակ օպտիկական աղղանշանը անցնում է տարբեր սարքերի միջով, որոնց համատեղ կիրառմամբ է միայն հնարավոր ստանալ անհրաժեշտ տեղեկությունը դիտվող մարմնի մասին: Ուստի աստղագիտական դիտումների ժամանակ անհրաժեշտ է սարքերն իրար այնպես հարմարեցնել, որ հնարավոր լինի ստանալ լավագույն դիտողական արդյունքներ: Սակայն միշտ չէ, որ հնարավոր է այդ խնդիրը պատշաճ ձևով լուծել, քանի որ տարբեր սարքերի հատկությունները բնութագրող պարամետրերի շափողականությունները հաճախ տարբեր են լինում ու հնարավոր չէ նրանք անմիջականորեն իրար հետ համեմատել:

Տարբեր սարքերի իրար հարմարեցման խնդիրը լուծելու համար ներկա աշխատությունում առաջարկվում է մի մոտեցում, որը հնարավորություն է տալիս, կիրառելով ինֆորմացիայի տեսության աղարատը, երկնիչ թվանշաններով (քիտերով) գնահատել ասեն մի սարքի, ինչպես նաև բոլոր սարքերի կողմից համատեղ բաց թողնված տեղեկության քանակը: Այդպիսով հնարավորություն է ստեղծվում համատեղ կիրառվող տարբեր սարքերը իրար այնպես հարմարեցնել, որ ուսումնասիրվող երկնային մարմիններից ստացվի առավելագույն հնարավոր տեղեկությունը:

ЛИТЕРАТУРА — ЧРԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

- ¹ Фелджет, Сб Настоящее и будущее телескопов умеренного размера, ИИЛ, М. 1960. ² W. A. Baum et al., Carnegie Inst. Wash., Year Book 64 (1965). ³ Баум, Сб. Методы астрономии, „Мир“, М., 1967. ⁴ Н. Н. Михельсон, Оптические телескопы. Теория и конструкция, „Наука“, М., 1967. ⁵ Бриллиэн, Наука и теория информации, М., 1960. ⁶ P. V. Fellgett, E. H. Linfoot, Phil. Trans. Roy. Soc. (A) 247, 369 (1955). ⁷ С. Б. Гуревич, Эффективность и чувствительность телевизионных систем, „Энергия“, М.,—Л., 1963. ⁸ J. C. Dainty, R. Shaw, Image Science, A. P., London, 1974. ⁹ Б. О. Карапетян, Г. Е. Смоляки, Сб. Физическая электроника, М., 1976. ¹⁰ Б. О. Карапетян, В. С. Осканян, „Оптико-механическая промышленность“, № 11, 1976. ¹¹ О. Нейл, Введение в статистическую оптику, „Мир“, 1966.