

ВЛИЯНИЕ РАДИУСА КОРРЕЛЯЦИИ АТМОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ НА ОБНАРУЖИТЕЛЬНУЮ СПОСОБНОСТЬ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СТАНЦИЙ ТЕЛЕВИЗИОННОГО ТИПА ПРИ НАБЛЮДЕНИИ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

д.т.н., проф. А.И. Стрелков, А.П. Лытюга

Рассмотрена оценка влияния мультипликативных помех на обнаружительную способность оптико-электронных станций (ОЭС). Предложен метод последетекторной обработки сигнала, позволяющий получить выигрыш в отношении сигнал/шум на выходе ОЭС при наблюдении космических объектов (КО) в сумеречных и дневных условиях.

Введение. Использование наземных оптических средств, оснащенных в качестве регистраторов оптического излучения телевизионными приемниками, широко вошло в практику астрономических наблюдений и изучения небесных тел естественного и искусственного происхождения. Современные телевизионные приемники на основе ПЗС-матриц обладают рядом достоинств, к которым можно отнести высокую чувствительность, разрешающую способность, массо-габаритные характеристики. Выходной телевизионный сигнал легко преобразуется в цифровую форму, что позволяет с применением современной компьютерной техники реализовать высокоэффективные методы обработки сигналов в реальном времени, автоматизировать процесс сбора и обработки информации, увеличить информативность астрономических наблюдений и улучшить характеристики оптико-электронной системы в целом.

Повышение информативности астрономических измерений требует увеличения времени наблюдения космических объектов за счет использования сумеречного и дневного времени суток.

Однако при наблюдениях в дневных условиях основные характеристики астрономических ОЭС резко ухудшаются. Одной из причин этого является увеличение яркости неба, обусловленной рассеянием солнечного света в атмосфере. Высокий уровень аддитивной фоновой составляющей приводит к насыщению фотоприемника и, как следствие, к потере информации о наблюдаемом объекте. В качестве методов снижения влияния аддитивных помех на качество информации, получаемой с помощью ОЭС, широко применяются нейтральные фильтры и диафрагмы, компенсационные методы, позволяющие согласовывать динамические диапазоны приемника оптического излучения и входного воздействия за счет уменьшения воздействия постоянной составляющей фона. Однако,

наличие флуктуационной составляющей фонового излучения, проявляющейся в силу статистического характера оптических сигналов, приводит к необходимости использования специальных методов выделения слабых сигналов на фоне сильных случайных помех.

Другой группой факторов, ухудшающих характеристики ОЭС, являются мультипликативные искажения, возникающие при прохождении оптического сигнала через атмосферу Земли. Земная атмосфера представляет собой поглощающе-рассеивающую среду, чрезвычайно изменчивую во времени и пространстве, оптические свойства которой (коэффициенты поглощения и преломления) существенно зависят от давления, температуры, концентрации поглощающих газов и других составляющих.

Случайные флуктуации давления, температуры и плотности газа, проявляющиеся в случайных изменениях коэффициента преломления на пути распространения оптического излучения, приводят к случайным искажениям волнового фронта приходящей волны и, как результат, к мультипликативным искажениям сигнала.

Данная статья посвящена оценке влияния мультипликативных помех на обнаружительную способность ОЭС телевизионного типа. Обнаружительную способность будем характеризовать величиной отношения сигнал/шум.

Оценка энергетических характеристик сигналов в ОЭС. ОЭС представляет собой сложную систему, состоящую из оптических, механических и электронных компонент. Упрощенную структурную схему ОЭС можно представить в виде, представленном на рис. 1.

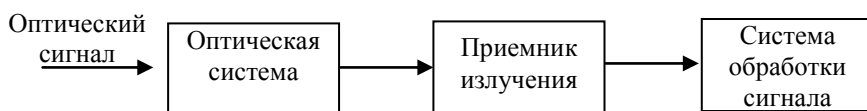


Рис. 1. Упрощенная структурная схема ОЭС

На вход оптической системы поступает оптический сигнал, являющийся аддитивной смесью сигнальной и фоновой компонент, прошедший через турбулентную атмосферу. Оптическая система выполняет Фурье-преобразование входного сигнала. Приемник излучения, представляющий собой TV-трубку или TV-камеру на основе ПЗС, расположен в плоскости изображения оптической системы и некогерентно регистрирует пространственный спектр входного воздействия. Система обработки проводит определение параметров входного сигнала и обработку информации с целью определения характеристик наблюдаемого объекта.

Состояние турбулентной атмосферы в направлении оптической оси

ОЭС удобно характеризовать параметром ρ_A , называемым радиусом корреляции атмосферных неоднородностей, представляющим собой характерный линейный размер объема, в рамках которого флуктуации давления и плотности газа не приводят за стандартное для телевизионных систем время накопления к существенным изменениям комплексного показателя преломления n и, следовательно, искажениями фронта оптической волны можно пренебречь.

Параметр ρ_A изменяется в течение суток в широких пределах. Поэтому представляет интерес рассмотрение случаев, характерных для благоприятных (ночных) и неблагоприятных (дневных) условий наблюдения. Первый случай соответствует условиям, когда радиус корреляции ρ_A превосходит или равен диаметру D объектива ОЭС ($\rho_A \geq D$). Во втором случае $\rho_A < D$. В дальнейшем изложении будем использовать индекс 1 для обозначения величин в ночных условиях, а индекс 2 – для обозначения величин в дневных условиях.

На вход оптической системы поступает сигнал от наблюдаемого объекта, который в силу удаленности последнего можно считать плоской волной. На фотокатоде телевизионной камеры формируется дифракционное пятно, форма и распределение интенсивности в котором описаны в [1]. В большинстве технических приложений можно использовать приближенное выражение для диаметра кружка рассеяния данное, например, в [2]:

$$d_{кр1} = 1,22 \frac{\lambda f}{D}, \quad (1)$$

где $d_{кр1}$ – диаметр кружка рассеяния в благоприятных условиях; λ – длина волны принимаемого излучения; f – фокусное расстояние оптической системы; D – диаметр объектива.

Оценим для первого случая освещенность фотокатода в люксах точечным источником излучения. Для упрощения расчетов будем считать, что вся энергия сигнала от точечного источника фокусируется в кружок рассеяния с равномерным распределением интенсивности. Тогда

$$E_{кр} S_{кр} = E_0 S_0 \tau, \quad (2)$$

где $E_{кр}$ – освещенность кружка рассеяния на фотокатоде; $S_{кр}$ – площадь кружка рассеяния; E_0, S_0 – освещенность объектива ОЭС и площадь объектива; τ – интегральный коэффициент пропускания оптического тракта.

Освещенность в кружке рассеяния для ночных (благоприятных) условий наблюдения с учетом (1) и (2) будет иметь вид

$$E_{\text{кр1}} = \tau E_0 \frac{S_0}{S_{\text{кр1}}} = \tau E_0 \frac{D^4}{\lambda^2 f^2}, \quad (3)$$

где $E_{\text{кр1}}$ – освещенность кружка рассеяния в ночных условиях; $S_{\text{кр1}}$ – площадь кружка рассеяния в ночных условиях.

В случае неблагоприятных условий малая величина ρ_A приведет к мультипликативным искажениям фронта оптической волны при проходе через турбулентную атмосферу. В этом случае вместо выражения (1) необходимо использовать выражение [1]:

$$d_{\text{кр2}} = 1,22 \frac{\lambda f}{\rho_A}, \quad (4)$$

где $d_{\text{кр2}}$ – диаметр кружка рассеяния в неблагоприятных условиях.

Следовательно,

$$E_{\text{кр2}} = \tau E_0 \frac{D^2 \rho_A^2}{\lambda^2 f^2}. \quad (5)$$

Используя выражения (3) и (5), можно записать

$$\frac{E_{\text{кр2}}}{E_{\text{кр1}}} = \frac{\rho_A^2}{D^2}. \quad (6)$$

Из физических соображений понятно, что энергия сигнала, принимаемого от космического объекта, определяется блеском КО и не зависит от времени суток, в которое производится сеанс наблюдения, т.е.:

$$W_1 = \int_{t=0}^{t=T_n} dt \iint_{S_{\text{кр1}}} I_1(x,y) dx dy; \quad (7)$$

$$W_2 = \int_{t=0}^{t=T_n} dt \iint_{S_{\text{кр2}}} I_2(x,y) dx dy, \quad (8)$$

при этом

$$W_1 = W_2, \quad (9)$$

где T_n – время накопления; I_1, I_2 – интенсивности сигналов для благоприятного и неблагоприятного случаев; x, y – телевизионные координаты.

В [3] приводятся экспериментальные данные, свидетельствующие о том, что $d_{\text{кр}}$ в зависимости от ρ_A в течение суток может изменяться в десятки раз. Следовательно, интенсивность оптического сигнала на фотокатоде будет уменьшаться с уменьшением радиуса корреляции атмо-

сферных неоднородностей, как квадрат отношения радиуса корреляции атмосферных неоднородностей к диаметру объектива. Для случая уменьшения ρ_A более чем в 30 раз интенсивность уменьшится более чем в 1000 раз и может стать значительно меньше порога чувствительности телевизионной камеры, определяемого уровнем внутренних шумов приемника.

На рис. 2, а схематически представлен ход зависимости нормированной величины $\tilde{\rho} = \frac{\rho_A}{\rho_{A1}}$ от времени суток. Рис. 2, б иллюстрирует соответствующие изменения нормированной освещенности фотокатода $\tilde{E}_{кр} = \frac{E_{кр}}{E_{кр1}}$.

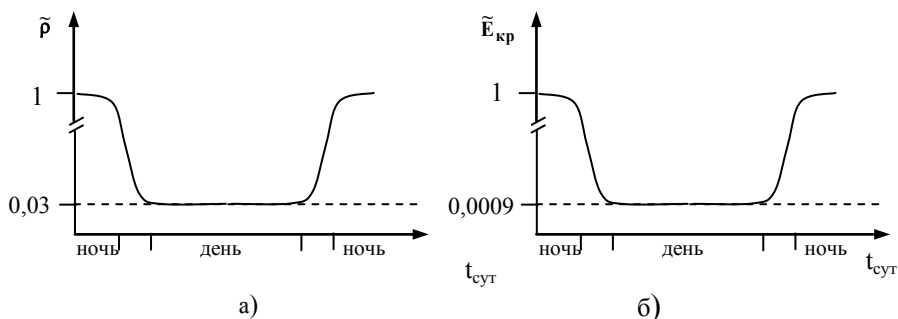


Рис. 2. Зависимость $\tilde{\rho}$ от времени суток и соответствующие изменения $\tilde{E}_{кр}$

В современных ОЭС обнаружение сигнала от КО проводится либо оператором, наблюдающим изображение на телевизионном мониторе, либо в автоматическом режиме. Обнаружение проводится по превышению сигналом, сформированным элементом разрешения фотокатода, определенного порога. В этом случае обнаружительная способность ОЭС определяется отношением сигнал/шум ϕ , выражение для которого для одного элемента разрешения может быть записано в виде [1]:

$$\phi = \frac{k_c \bar{U}_C}{\sqrt{\bar{U}_C k_c + 2\bar{U}_T k_T + 2\bar{U}_\phi k_\phi}}, \quad (10)$$

где \bar{U}_C – среднее значение напряжения, формируемого элементом разрешения под действием сигнальной компоненты; \bar{U}_T – среднее значение напряжения, формируемого элементом разрешения в отсутствии входно-

го воздействия; \bar{U}_Φ – среднее значение напряжения, формируемого элементом разрешения под действием фоновой компоненты; k_c , k_T , k_Φ – размерные коэффициенты, учитывающие параметры ОЭС при формировании отклика на воздействие сигнальной, темновой и фоновой компонент.

Так как освещенность, создаваемая на фотокатоде оптическим излучением от КО, прошедшим через турбулентную атмосферу в дневных условиях, согласно (6), будет меньше, чем в ночных условиях, то отношение сигнал/шум также уменьшится. Этот процесс качественно показан на рис. 3 для нормированной величины $\tilde{\varphi} = \frac{\Phi}{\Phi_1}$.

Уменьшение отношения сигнал/шум объясняется двумя причинами:

- уменьшением сигнальной компоненты \bar{U}_C , связанным с увеличением размеров кружка рассеяния в дневных условиях наблюдения;
- увеличением аддитивной составляющей входного воздействия \bar{U}_Φ в дневных условиях.

Для сохранения амплитуды выходного телевизионного сигнала от КО, при наблюдении в дневных условиях, необходимо проводить интегрирование отклика элементов разрешения, участвующих в формировании изображения КО, по площади кружка рассеяния в соответствии с (8). В силу равенства (9), амплитуда телевизионного сигнала не будет зависеть от времени суток. При такой обработке также произойдет интегрирование фоновой и темновой компонент по $S_{кр2}$. Следовательно, при наблюдении в дневных условиях

отношение сигнал/шум будет меньше по сравнению с ночными условиями наблюдения, но больше чем в случае, когда предлагаемая выше обработка не проводится. Это объясняется влиянием большой аддитивной фоновой составляющей. Качественная зависимость нормированной величины $\tilde{\varphi}$ от времени суток приведена на рис. 4 (сплошная кривая). Пунктирная кривая на рис.

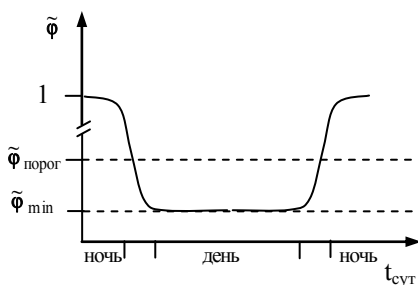


Рис. 3. Изменение $\tilde{\varphi}$

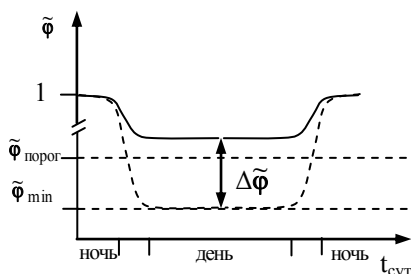


Рис. 4. Выигрыш в отношении сигнал/шум

4 соответствует случаю отсутствия предложенной обработки.

Предложенный метод обработки сигнала позволит получить выигрыш в отношении сигнал/шум ($\Delta\Phi_2$) и, следовательно, улучшить обнаружительную способность оптико-электронных станций при работе в дневных условиях.

Выводы. Рассмотрев влияние радиуса корреляции атмосферных неоднородностей на обнаружительную способность оптико-электронных станций телевизионного типа, можно сделать выводы:

1. При наблюдении в дневных условиях мультипликативные искажения сигнала, возникающие при прохождении оптического излучения через турбулентную атмосферу, приводят к резкому (в десятки раз) увеличению размеров дифракционного пятна, что в свою очередь, проявляется в значительном (в тысячи раз) уменьшении амплитуды сигнала, формируемого фотоприемником под действием излучения от космического объекта.

2. Амплитуда выходного сигнала может быть восстановлена путем интегрирования выходного сигнала по площади дифракционного пятна. В этом случае произойдет улучшение отношения сигнал/шум Φ в \sqrt{n} раз по сравнению с отношением сигнал/шум при наблюдении в дневных условиях без интегрирования. Реализация алгоритмов обработки позволит получить выигрыш в отношении сигнал/шум и, как следствие, улучшить обнаружительную способность в десятки раз при наблюдении КО с помощью ОЭС телевизионного типа в сумеречных и дневных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Москвитин С.В., Стрелков А.И. *Теоретические основы оптической локации*. – Х.: МО Украины, 1992. – 208 с.
2. *Прикладная оптика* / Под ред. Н.П. Закашова – М.: Машиностроение, 1988. – 312 с.
3. Мартынов Д.Я. *Курс практической астрофизики*. – М.: Наука, 1967. – 536с.

Поступила 16.08.2002

СТРЕЛКОВ Александр Иванович, доктор техн. наук, профессор, главный научный сотрудник научного центра при ХВУ. В 1965 году окончил ВИРТА ПВО. Области научных интересов – квантовая электроника, прикладная оптика, оптико-электронные средства в статистической обработке оптических сигналов.

ЛЫТЮГА Александр Петрович, научный сотрудник научного центра при ХВУ. В 1988 году окончил радиофизический факультет ХГУ. Области научных интересов – оптико-электронные системы, оптические информационные технологии.