

УДК 612.37:621.391

А.П. Лытюга

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков

АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ОТ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В ДНЕВНОЕ ВРЕМЯ

Статья посвящена разработке оптимального алгоритма обнаружения сигналов от низкоорбитальных космических объектов в телевизионных системах при наблюдениях в условиях сильных аддитивных помех и мультипликативных искажений. Показано, что проникающая способность астрономических телевизионных систем в дневных условиях может быть существенно увеличена путем реализации предложенного алгоритма.

Ключевые слова: низкоорбитальный космический объект; астрономическая телевизионная система; обнаружение оптических сигналов; сумеречные и дневные условия наблюдения космических объектов.

Введение

Дневные условия наблюдения низкоорбитальных космических объектов с использованием астрономических телевизионных систем (АТС) традиционно рассматриваются как неблагоприятные. Высокий уровень аддитивной помехи, обусловленный высокой яркостью дневного неба, существенно снижает проникающую способность АТС и приводит к тому, что только сигналы от очень ярких объектов, блеск которых составляет $3^m 0$ и более, могут быть обнаружены в АТС с приемлемым качеством.

Наряду с аддитивными помехами существенное влияние на проникающую способность АТС в дневных условиях оказывает изменение оптических свойств атмосферы Земли, а именно уменьшение радиуса корреляции атмосферных неоднородностей ρ_0 (параметр Фрида), приводящее к изменению пространственного распределения оптических сигналов в плоскости регистрации.

Эти факторы существенно снижают роль АТС в решении задач мониторинга околоземного пространства, наблюдения и каталогизации элементов космического мусора, прогноза столкновений действующих космических аппаратов с объектами техногенного происхождения.

Анализ энергетических соотношений сигнальной и фоновой составляющих позволяет сделать вывод о том, что возможности АТС по обнаружению сигналов от космических объектов в дневных условиях могут быть существенно улучшены. Так в работах [1, 2] показано, что за счет применения для описания оптических сигналов в АТС математических моделей на основе совместного корпускулярно-волнового описания и алгоритмов на их основе проникающая способность АТС в дневных условиях может быть существенно повышена. В работе [2] показано, что уменьшение отношения сигнал/шум

на выходе традиционного порогового обнаружителя, вызванное влиянием турбулентной атмосферы, пропорционально отношению ρ_0^2/a^2 , где a – размер входной апертуры телескопа АТС, а для оптимального обнаружителя, описанного в [1], это снижение пропорционально ρ_0/a .

Постановка задачи. При наблюдении низкоорбитальных объектов (НКО) необходимо учитывать изменения пространственной структуры сигнальной составляющей, вызванные собственным перемещением наблюдаемого объекта по орбите за время формирования телевизионного кадра, что приводит к тому, что изображение объекта имеет форму «следа», размеры которого обусловлены высотой орбиты объекта, а также влиянием турбулентной атмосферы дневного времени. В работе [3] на основе анализа величины отношения сигнал/шум показано, что применение порогового (энергетического) обнаружителя не эффективно для обнаружения сигналов от НКО в АТС в дневное время. Математическое описание сигналов от НКО в выходной плоскости АТС, совместно использующее корпускулярные и волновые свойства оптических сигналов, изложено в работе [4]. Использование этой модели приводит к необходимости учитывать изменения пространственной структуры сигнальной составляющей отклика фотоприемника на оптическое воздействие при построении оптимального алгоритма обнаружения.

Таким образом, **целью данной статьи** является разработка оптимального алгоритма обнаружения оптических сигналов от НКО в АТС при наблюдении в дневное время, то есть в условиях сильных аддитивных помех и мультипликативных искажений, а также оценка его качества. Статья является логическим продолжением работ [1 – 4]. В ней используются обозначения, допущения и ограничения, а также результаты, полученные в этих работах.

Изложение основного материала

Алгоритм обнаружения сигналов от низкоорбитальных космических объектов в астрономической телевизионной системе. Как и при обнаружении оптических сигналов, отраженных от НКО, регистрируемых в режиме сопровождения объекта, описанном в [1], при обнаружении сигналов в астрономических телевизионных системах в режиме первичного обнаружения, логарифм отношения правдоподобия, полученный в [4], имеет вид

$$\ln L_V = \frac{N_{VC0}}{N_{\Pi}} Y_V(\hat{n}) - W_{VC}, \quad (1)$$

и с точностью до постоянных коэффициентов определяется значением случайной функции $Y_V(\hat{n})$, зависящей от принятой реализации \hat{n} . В рассматриваемом случае вид этой функции, принятой в качестве достаточной статистики логарифма отношения правдоподобия, определяется выражением

$$Y_V(\hat{n}) = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m n_{ij} \int_{t_0}^{t_0+T_H} \left[\frac{\sin \left[c(u_i - u_0 + V_{из}t) \frac{a}{2} \right]}{c(u_i - u_0 + V_{из}t) \frac{a}{2}} \right]^2 \times \left[\frac{\sin \left[d(v_j - v_0) \frac{b}{2} \right]}{d(v_j - v_0) \frac{b}{2}} \right]^2 dt, \quad (2)$$

где $\hat{n} = n_{1j}, n_{2j}, \dots, n_{kj}, n_{i1}, n_{i2}, \dots, n_{km}$ – принятая

реализация; u, v – координаты в системе координат фотоприемника; a, b – размеры входной апертуры; c, d – коэффициенты, определяемые параметрами оптической системы.

Величина $Y_V(\hat{n})$ зависит от скорости смещения изображения объекта в плоскости фотоприемника $V_{из}$. Эта скорость определяет размер следа изображения объекта, формируемого в телевизионном кадре за время T_H .

Правило выбора решения по критерию Неймана-Пирсона примет с использованием (1) следующий вид:

$$Y_V(\hat{n}) > \frac{N_{\Pi}}{N_{VC0}} \ln L_{V0} + W_{VC} \rightarrow$$

→ «Сигнал обнаружен»;

$$Y_V(\hat{n}) < \frac{N_{\Pi}}{N_{VC0}} \ln L_{V0} + W_{VC} \rightarrow$$

→ «Сигнал не обнаружен»,

где $\ln L_{V0} = \frac{N_{VC0}}{N_{\Pi}} Y_{V0}(\hat{n}) - W_{VC}$ – логарифм порогового значения отношения правдоподобия, которое достигается при $Y_V(\hat{n}) = Y_{V0}(\hat{n})$.

Следовательно, структурную схему алгоритма обнаружения сигналов в выходной плоскости астрономической телевизионной системы можно представить в виде, представленном на рис. 1.

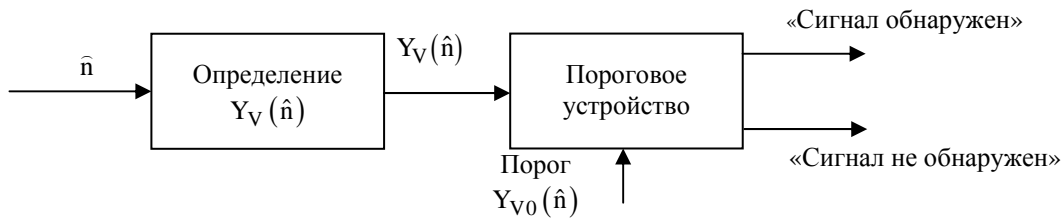


Рис. 1. Структурная схема алгоритма обнаружения

Порог $Y_{V0}(\hat{n})$ решения определяется значениями условной вероятности ложной тревоги и условной вероятности правильного обнаружения, которые должны обеспечиваться на выходе обнаружителя.

Оценка качества алгоритма обнаружения сигналов. Проведем оценку эффективности алгоритма, структурная схема которого приведена на рис. 1 по критерию величины отношения сигнал/шум.

Для этого в выражение для отношения сигнал/шум, приведенное в [1], выражение (16), подставим средние значения и дисперсии величины $Y_V(\hat{n})$, полученные в [4] для случая обнаружения сигналов в режиме первичного обнаружения:

$$\phi_V = \frac{\overline{Y_{V(C+\Pi)}(\hat{n})} - \overline{Y_{V\Pi}(\hat{n})}}{\sqrt{D(Y_{V(C+\Pi)}(\hat{n})) + D(Y_{V\Pi}(\hat{n}))}}. \quad (3)$$

Используя выражения (12), (17), (19) и (21) из [4] и проведя соответствующие преобразования, получим:

$$\phi_V = \frac{N_{VC0} T_H \left[\frac{16\pi^2}{9cadb} + V_{из} T_H \frac{4\pi}{3db} \right]}{\sqrt{N_{VC0} T_H \left[\frac{121\pi^2}{100cadb} + V_{из} T_H \frac{11\pi}{10db} \right] + 2N_{\Pi} T_H \left[\frac{16\pi^2}{9cadb} + V_{из} T_H \frac{4\pi}{3db} \right]}}. \quad (4)$$

Подставляя в (4) амплитуду распределения

N_{VC_0} , выраженную из (2) в работе [4], в допущении, что в пределах времени регистрации излучение объекта является стационарным, т.е. среднее значение количества фотонов от объекта, регистрируемых фотоприемником за промежуток времени T_H , постоянно, получим:

$$\Phi_V = \frac{N_0 T_H S_{об}}{\sqrt{N_0 T_H S_{об} + 2N_{П} T_H \left[\frac{16\pi^2}{9cadb} + V_{из} T_H \frac{4\pi}{3db} \right]}} \quad (5)$$

Отношение сигнал/шум (5) зависит от скорости смещения изображения объекта в плоскости фотоприемника $V_{из}$, которая определяется высотой орбиты космического объекта. Графически зависимость (5) от высоты орбиты H для $m_{об} = 3$ и $m_{об} = 6$ для трех значений ρ_0 , показана на рис. 2.

Интенсивность фонового излучения в дневных условиях наблюдения космических объектов настолько велика, что для широкого диапазона блеска объектов выполняется условие $N_0 \ll N_{П}$.

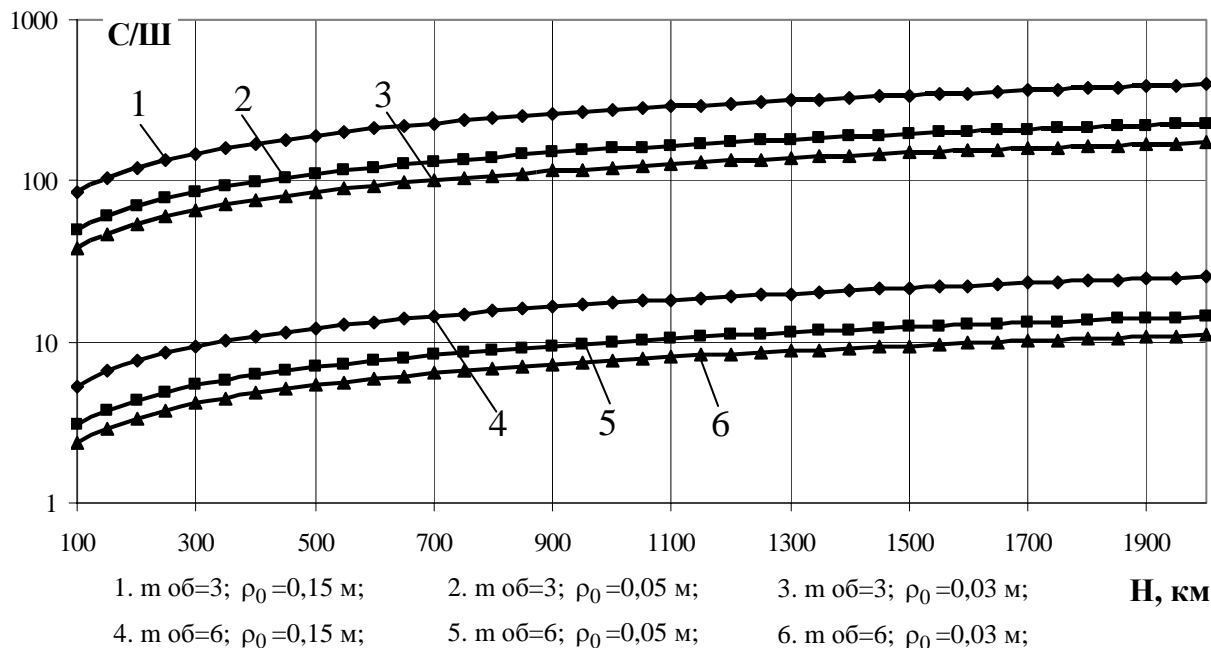


Рис. 2. Зависимость отношения сигнал/шум для $m_{об} = 3^{m_0}$ и $m_{об} = 6^{m_0}$ от высоты орбиты наблюдаемого объекта H для 3-х значений ρ_0

Пренебрегая первым слагаемым в подкоренном выражении в знаменателе, запишем (5) в виде:

$$\Phi_V = \frac{N_0 T_H S_{об}}{\sqrt{2N_{П} T_H \left[\frac{16\pi^2}{9cadb} + V_{из} T_H \frac{4\pi}{3db} \right]}} \quad (6)$$

Проанализируем выражение (6). При $V_{из} = 0$ выражение (6) совпадает с выражением, полученным в [1] (выражение (24)), для отношения сигнал/шум на выходе оптимального обнаружителя для случая, когда оптический сигнал от космического объекта регистрируется в режиме сопровождения при условии $N_0 \ll N_{П}$.

При $V_{из} \neq 0$ отношение сигнал/шум (6) уменьшается с увеличением $V_{из}$. То есть, при обнаружении низкоорбитального космического объекта в режиме первичного обнаружения, когда изображение космического объекта, сформированное за время T_H , имеет форму следа, отношение сиг-

нал/шум на выходе оптимального обнаружителя не превосходит отношения сигнал/шум при обнаружении сигнала в режиме сопровождения объекта. Разделив левую и правую части (6) на соответствующие части (24) из [1], получим выражение:

$$\frac{\Phi_V}{\Phi} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{3V_{из} T_H ca}{4\pi}}}, \quad (7)$$

характеризующее влияние скорости смещения изображения объекта в плоскости фотоприемника на отношение сигнал/шум на выходе оптимального обнаружителя для режима первичного обнаружения, по сравнению с режимом сопровождения объекта. Зависимость (7) приведена на рис. 3.

Влияние радиуса корреляции атмосферных неоднородностей на отношение сигнал/шум на выходе оптимального обнаружителя в режиме первичного обнаружения можно оценить, подставив в (7) значение $a = \rho_0$ и записав отношение исходного выражения к полученному:

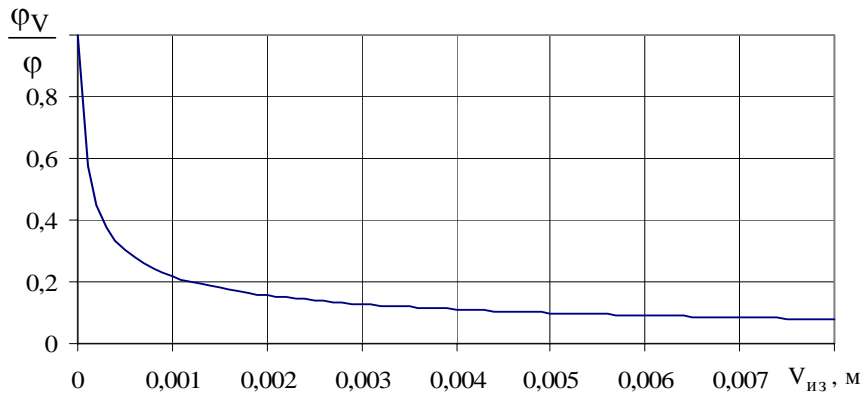


Рис. 3. Зависимость ухудшения отношения сигнал/шум режима первичного обнаружения, по сравнению с режимом сопровождения объекта от скорости смещения изображения

$$\frac{\Phi_{V_{\rho_0}}}{\Phi_{V_a}} = \frac{\rho_0}{a} \sqrt{\frac{1 + \frac{3ca}{4\pi} V_{из} T_H}{1 + \frac{3c\rho_0}{4\pi} V_{из} T_H}} \quad (8)$$

Проанализируем (8) для случая малых сигналов, когда дисперсией сигнальной составляющей можно пренебречь. Для малых \$V_{из}\$, когда \$V_{из} T_H \ll \frac{4\pi}{3ca}\$ изменение отношения сигнал/шум вследствие изменения радиуса корреляции атмосферных неоднородностей определяется, как

$$\frac{\Phi_{V_{\rho_0}}}{\Phi_{V_a}} = \frac{\rho_0}{a}, \quad (9)$$

что соответствует результатам, полученным ранее в [2].

В условиях, характеризующихся уровнем фонового излучения дневного неба, в силу закона больших чисел, закон распределения случайной величины \$Y_V(\hat{n})\$, являющейся достаточной статистикой логарифма отношения правдоподобия, стремится к нормальному закону [5, 6]. Используя проведенные расчеты, можно записать выражения для условной вероятности ложной тревоги и условной вероятности правильного обнаружения:

$$F_V(Y_V(\hat{n})) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} D(Y_{V\Pi}(\hat{n}))} \times \int_{Y_{V0}(\hat{n})}^{\infty} \exp\left[-\frac{(Y_{V\Pi}(\hat{n}) - \overline{Y_{V\Pi}(\hat{n})})^2}{2D(Y_{V\Pi}(\hat{n}))}\right] dY(\hat{n}); \quad (10)$$

$$D_V(Y_V(\hat{n})) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} D(Y_{V(C+\Pi)}(\hat{n}))} \times \int_{Y_{V0}(\hat{n})}^{\infty} \exp\left[-\frac{(Y_{V(C+\Pi)}(\hat{n}) - \overline{Y_{V(C+\Pi)}(\hat{n})})^2}{2D(Y_{V(C+\Pi)}(\hat{n}))}\right] dY(\hat{n}). \quad (11)$$

Используя выражения \$\overline{Y_{V\Pi}(\hat{n})}\$, \$D(Y_{V\Pi}(\hat{n}))\$, \$\overline{Y_{V(C+\Pi)}(\hat{n})}\$ и \$D(Y_{V(C+\Pi)}(\hat{n}))\$, приведенные в [4], построим зависимости вероятности правильного обнаружения \$D_V\$ при вероятности ложной тревоги \$F_V(Y(\hat{n})) = 10^{-6}\$ для сигналов, соответствующих блеску объекта, равному \$m_{об} = 8^{m_0}\$ и \$m_{об} = 12^{m_0}\$ в дневных условиях для \$\rho_0 = 0,05\$ м и трех значений высоты орбиты \$H\$ (рис. 4).

Выводы

На основе математической модели, предложенной в [4], составленной на основе совместного применения корпускулярных и волновых представлений о структуре оптического излучения, разработан оптимальный алгоритм обнаружения сигналов от низкоорбитальных космических объектов в астрономических телевизионных системах в дневное время для режима первичного обнаружения космического объекта.

Получены аналитические выражения для величины отношения сигнал/шум на выходе обнаружителя и условных вероятностей правильного обнаружения и ложной тревоги.

Результаты расчета величины отношения сигнал/шум и условных вероятностей правильного обнаружения и ложной тревоги позволяют сделать вывод о том, что предложенный алгоритм обнаружения дает возможность существенно улучшить качество обнаружения сигналов от космических объектов в астрономических телевизионных системах в дневных условиях по сравнению с пороговым алгоритмом обнаружения. Применение предложенного алгоритма позволит увеличить проникающую способность астрономических телевизионных систем в дневных условиях при наблюдении низкоорбитальных космических объектов в режиме первичного обнаружения до \$6^{m_0}\$.

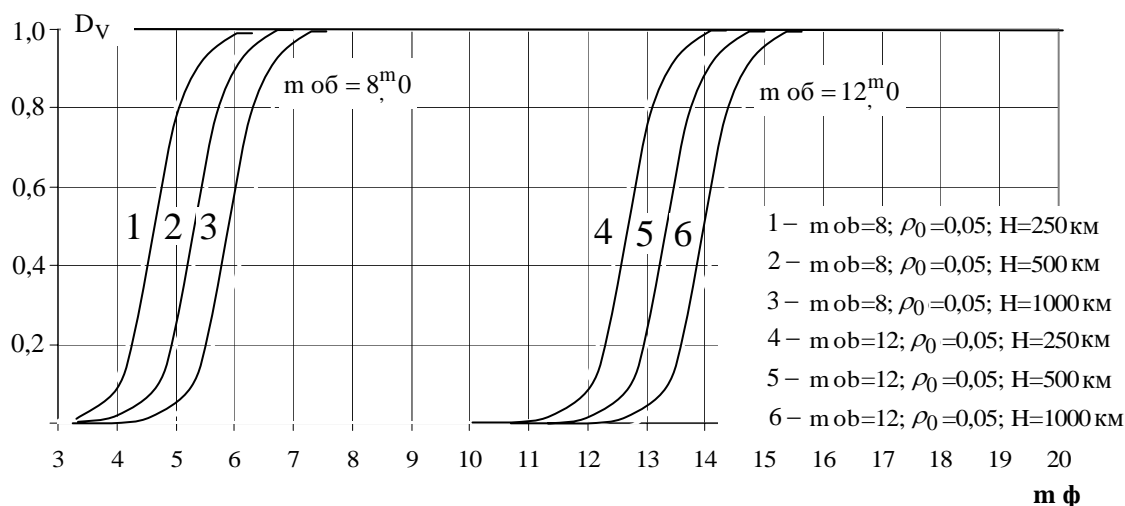


Рис. 4. Зависимость условной вероятности правильного обнаружения D_V от блеска l кв. угл. сек. фона при значении условной вероятности ложной тревоги $F_V(Y(\hat{n})) = 10^{-6}$ для значений блеска наблюдаемого объекта $m_{об} = 8^m0$ и $m_{об} = 12^m0$, $\rho_0 = 0,05$ м и различных значений H

Список литературы

1. Стрелков А.И. Алгоритмы обнаружения сигналов в оптико-электронных системах контроля космического пространства / А.И. Стрелков, Т.А. Стрелкова, А.П. Лытюга // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – Х.: ХНУРЕ, 2003. – Вып. 132. – С. 7-13.

2. Лытюга А.П. Эффективность обнаружения сигналов от космических объектов в астрономических телевизионных системах в дневное время / А.П. Лытюга // Системы управління, навігації та зв'язку. – К.: ЦНДІ НУ, 2007. – Вып. 3. – С. 42-46.

3. Лытюга О.П. Ефективність виявлення оптичних сигналів в телевізійних системах при спостереженні низькоорбітальних космічних об'єктів в денний час / О.П. Лытюга // Системи озброєння і військова техніка. – Х.: ХУ ПС, 2009. – № 4 (20). – С. 135-140.

4. Лытюга А.П. Математическая модель сигналов в телевизионных системах при наблюдении низкоорбитальных космических объектов в дневное время / А.П. Лытюга // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУ ПС, 2009. – № 4 (22). – С. 41-46.

5. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника / В.И. Тихонов. – М.: Радио и связь, 1982. – 624 с.

6. Венцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения / Е.С. Венцель, Л.А. Овчаров. – М.: Наука, 1988. – 480 с.

Поступила в редколлегию 14.12.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.И. Стрелков, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

АЛГОРИТМ ВИЯВЛЕННЯ ОПТИЧНИХ СИГНАЛІВ ВІД НИЗЬКООРБІТАЛЬНИХ КОСМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ В ДЕННИЙ ЧАС

О.П. Лытюга

Статтю присвячено розробці оптимального алгоритму виявлення сигналів від низькоорбітальних космічних об'єктів в телевізійних системах при спостереженнях в умовах сильних адитивних перешок та мультиплікативних перекручень. Показано, що проникна здатність астрономічних телевізійних систем в денних умовах може бути суттєво збільшеною шляхом реалізації запропонованого алгоритму.

Ключові слова: низькоорбітальний космічний об'єкт; астрономічна телевізійна система; виявлення оптичних сигналів; сутінкові та денні умови спостереження космічних об'єктів.

ALGORITHM OF DETECTION OF OPTICAL SIGNALS FROM LOW-ORBIT SPACE OBJECTS IN DAYTIME

O.P. Lytyuga

The article covers the optimal detection algorithm for signals from low-orbit space objects in television systems in conditions of strong additive and multiplicative interference. It is shown that astronomical television system limit magnitude in daytime can be improved significantly by using of the proposed algorithm.

Keywords: low-orbit object; astronomical television system; optical signals detection; twilight and daytime conditions of space objects observation.