

УДК 621.396.96

ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБНАРУЖЕНИЯ ТЕЛЕВИЗИОННОГО СИГНАЛА ЯРКОСТИ В РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ С ПОСТОРОННИМ ПОДСВЕТОМ

П.Г. СЕМАШКО, А.Е. ОХРИМЕНКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П.Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

*Научно-производственное республиканское унитарное предприятие "Алевкурп"
ком. 332, ул. П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 18 марта 2005

В радиолокационных системах с телевизионным подсветом производится корреляционное обнаружение сигнала яркости на фоне шума и помехи (прямого сигнала). В статье аналитически показано, что наличие прямого сигнала снижает вероятность правильного обнаружения. Приводятся зависимости характеристик обнаружения от корреляционных свойств сигнала яркости и от отношения сигнал-помеха.

Ключевые слова: полуактивная РЛС, характеристики обнаружения, телевизионный сигнал яркости.

Введение

Интерес, проявляемый в настоящее время к радиолокационным системам (РЛС) с посторонним подсветом, относящимся к классу бистатических, обусловлен такими их преимуществами, как скрытность, экономичность, экологичность. Для работы системы не требуется собственного радиочастотного ресурса. В качестве возможных источников сигнала подсвета рассматриваются различные вещательные и связные системы наземного и спутникового базирования [1]. Одним из сигналов, хорошо отвечающих радиолокационной задаче, является телевизионный (ТВ) сигнал яркости, который имеет сравнительно высокую энергетику и достаточную ширину спектра [2]. Для корреляционного обнаружения сигнала, отраженного от цели, используется опорный сигнал, принимаемый непосредственно от передающей станции на дополнительную антенну. Однако прямой сигнал проникает и по боковым лепесткам основной антенны. Несмотря на комплекс мер по его ослаблению [3], неподавленный остаток прямого сигнала проникает в обнаружитель и должен учитываться при расчете характеристик обнаружения. В данной работе получены аналитические выражения для расчета характеристик обнаружения ТВ сигнала яркости на фоне гауссовского шума и неподавленного остатка прямого сигнала в РЛС с посторонним подсветом.

Теоретический анализ

В современных РЛС с ТВ подсветом используется цифровая обработка сигналов в двух квадратурах [4], поскольку фазы принятых сигналов а priori не известны. Поэтому на вход кор-

реляционного обнаружителя поступают комплексные отсчеты сигналов целевого и опорного каналов (шумами в опорном канале можно пренебречь):

$$\dot{m}(n) = (\dot{E}_c + \dot{E}_m U_m(\Delta t n - t_d)) \exp(j\Omega_D \Delta t n) + \dot{h}(n),$$

$$\dot{m}_0(n) = \dot{E}_{c0} + \dot{E}_{m0} U_m(\Delta t n),$$

где n — номер отсчета дискретного сигнала; \dot{E}_c, \dot{E}_{c0} — комплексные амплитуды постоянной составляющей сигнала яркости в целевом и опорном каналах соответственно; \dot{E}_m, \dot{E}_{m0} — комплексные амплитуды модуляционной составляющей сигнала яркости в целевом и опорном каналах соответственно; $U_m(t)$ — нормированная по мощности огибающая модуляционной составляющей сигнала яркости; Δt — период дискретизации сигнала, который выбирается равным удвоенному времени корреляции $U_m(t)$; t_d — запаздывание отраженного от цели сигнала относительно прямого сигнала; Ω_D — доплеровский сдвиг частоты отраженного сигнала; $\dot{h}(n)$ — аддитивный шум, учитывающий гауссовские помехи в радиотракте и шум приемника.

Ограничимся случаем стационарной во времени модуляционной составляющей сигнала яркости. Тогда условия нормировки и центрирования:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} U_m^2(\Delta t n + \tau) = 1, \quad \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} U_m(\Delta t n + \tau) = 0, \quad \text{для } \forall \tau. \quad (1)$$

Дискретная автокорреляционная функция модуляционной составляющей сигнала яркости:

$$B_m(\Delta t i) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} U_m(\Delta t n) U_m(\Delta t n - \Delta t i). \quad (2)$$

Для выделения модуляционной составляющей сигнала яркости производится коррекция частоты Доплера на величину Ω_c и вычитание постоянной составляющей принятого сигнала. После выделения модуляционной составляющей в целевом и опорном каналах при $\Omega_D = \Omega_c$ получим:

$$\dot{m}_m(n) = \dot{E}_m U_m(\Delta t n - t_d) + \dot{h}(n) \exp(-j\Omega_c \Delta t n),$$

$$\dot{m}_{m0}(n) = \dot{E}_{m0} U_m(\Delta t n).$$

Учитывая априорную неизвестность параметров транслируемого ТВ сигнала, условий распространения радиоволн, дальности и ЭПР цели, амплитуду \dot{E}_m следует рассматривать как комплексную гауссовскую случайную величину с нулевым средним значением и дисперсией $\mu_2\{\dot{E}_m\} = P_m$, где P_m — мощность модуляционной составляющей ТВ сигнала яркости. Аддитивный шум можно рассматривать как некоррелированный комплексный нормальный случайный процесс с нулевым средним и дисперсией $\mu_2\{\dot{h}(n)\} = P_n$, где P_n — мощность шума. Тогда можно записать отношение сигнал-шум по мощности для обнаружителя модуляционной составляющей:

$$\rho_m = \frac{P_m}{P_n}. \quad (3)$$

Результат корреляционной обработки сигналов $\dot{W}_i = \sum_{n=0}^{N-1} \dot{m}_m(n) \dot{m}_{m0}(n-i)$. С учетом (2)

$$\dot{W}_i = \dot{E}_m \dot{E}_{m0} N B_m (\Delta t i - t_d) + \dot{E}_{m0} \sum_{n=0}^{N-1} \dot{h}(n) U_m (\Delta t n - \Delta t i) \exp(-j \Omega_c \Delta t n). \quad (4)$$

Вероятностные характеристики \dot{W}_i определяются случайными величинами \dot{E}_m и $\dot{h}(n)$. Очевидно, что \dot{W}_i — гауссовская случайная величина с нулевым средним значением. Из (4) нетрудно найти ее дисперсию $\sigma_{\dot{W}_i}^2$. Тогда, с учетом отношения (3) и условия нормировки (1), при достаточно большом N получим

$$\sigma_{\dot{W}_i}^2 = P_n |\dot{E}_{m0}|^2 N (\rho_m N B_m^2 (\Delta t i - t_d) + 1), \quad \sigma_{X_i}^2 = \sigma_{Y_i}^2 = \frac{1}{2} \sigma_{\dot{W}_i}^2,$$

где $\sigma_{X_i}^2, \sigma_{Y_i}^2$ — дисперсии квадратур \dot{W}_i .

Квадрат модуля $Z_i = X_i^2 + Y_i^2$ гауссовской случайной величины \dot{W}_i имеет экспоненциальное распределение с плотностью вероятности

$$P_{Z_i}(r) = \frac{1}{2\sigma_{X_i}^2} \exp\left(-\frac{r}{2\sigma_{X_i}^2}\right), \quad r \geq 0.$$

В случае высокой корреляции отраженного сигнала с опорным ($B_m (\Delta t i - t_d) \approx 1$), когда полезный сигнал содержится в анализируемом элементе разрешения по задержке ($|i - t_d / \Delta t| < 0,5$), плотность вероятности Z_i (на входе устройства сравнения с порогом)

$$P_Z(r) = \frac{1}{P_n |\dot{E}_{m0}|^2 N (\rho_m N + 1)} \exp\left(-\frac{r}{P_n |\dot{E}_{m0}|^2 N (\rho_m N + 1)}\right), \quad r \geq 0. \quad (5)$$

Выражение для плотности вероятности Z_i при наличии в целевом канале только шума можно получить из (5), полагая $\rho_m = 0$. Однако, поскольку всегда имеется неподавленный остаток прямого сигнала мощностью $P_{m,d}$, для которого $t_d = 0$, плотность вероятности Z_i при отсутствии отраженного от цели сигнала

$$P_{Z_{i0}}(r) = \frac{\exp\left(-\frac{r}{P_n |\dot{E}_{m0}|^2 N (\rho_{m,d} N B_m^2 (\Delta t i) + 1)}\right)}{P_n |\dot{E}_{m0}|^2 N (\rho_{m,d} N B_m^2 (\Delta t i) + 1)}, \quad r \geq 0, \quad i \neq 0,$$

где $\rho_{m,d} = P_{m,d} / P_n$.

Вероятность ложной тревоги в i -м элементе разрешения по задержке

$$F_i = 1 - \int_0^l P_{Z_{i0}}(r) dr = \exp\left(-\frac{l}{P_n |\dot{E}_{m0}|^2 N (\rho_{m,d} N B_m^2 (\Delta t i) + 1)}\right), \quad i \neq 0.$$

Отсюда порог, оптимальный по критерию Неймана–Пирсона для заданной вероятности F_r :

$$l_{opt,i} = -P_n |\dot{E}_{m0}|^2 N (\rho_{m,d} N B_m^2 (\Delta t i) + 1) \ln F_r, \quad i \neq 0.$$

Нетрудно показать, что алгоритм формирования порога $l_{opt,i} = -\overline{Z_{i0}} \ln F_r$, $i \neq 0$, где величина $\overline{Z_{i0}}$ вычисляется в устройстве обработки путем усреднения не превысивших порог значений Z_i из предыдущих наблюдений. Величина Z_0 не должна участвовать в вычислении $\overline{Z_{i0}}$, так как в элементе разрешения $i = 0$ всегда содержится неподавленный остаток прямого сигнала.

Вероятность правильного обнаружения при оптимальном пороге

$$D_i = 1 - \int_0^{l_{opt,i}} P_Z(r) dr = F_r^{(\rho_{m,d} N B_m^2 (\Delta t i) + 1) / (\rho_m N + 1)}, \quad i \neq 0.$$

Вводя отношение сигнал-помеха $\mu = P_m / P_{m,d}$ и заменяя боковые лепестки автокорреляционной функции модуляционной составляющей сигнала яркостью некоторым усредненным значением $B_{m,s}$, можно записать:

$$D = F_r^{(\rho_m N B_{m,s}^2 / \mu + 1) / (\rho_m N + 1)}. \quad (6)$$

Результаты расчета характеристик обнаружения по (6) показали (рис. 1), что существует максимально достижимая вероятность правильного обнаружения (меньшая единицы), величина которой зависит от требуемой вероятности ложной тревоги, уровня боковых лепестков автокорреляционной функции и от отношения сигнал-помеха:

$$D_{\max} = \lim_{\rho_m \rightarrow \infty} D = F_r^{B_{m,s}^2 / \mu}.$$

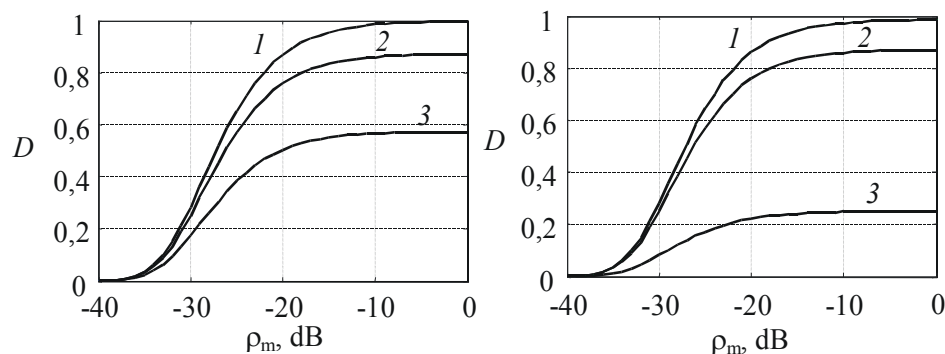


Рис. 1. Характеристики обнаружения модуляционной составляющей: а) $N = 10000$; $F_r = 10^{-6}$; $\mu = 1$; 1 — $B_{m,s} = 0,01$; 2 — $B_{m,s} = 0,1$; 3 — $B_{m,s} = 0,2$; б) $N = 10000$; $F_r = 10^{-6}$; $B_{m,s} = 0,1$; 1 — $\mu = 10$ dB; 2 — $\mu = 0$ dB; 3 — $\mu = -10$ dB

Взаимосвязь параметров, принимаемых по целевому каналу сигналов, с требуемыми характеристиками обнаружения иллюстрируется на рис. 2.

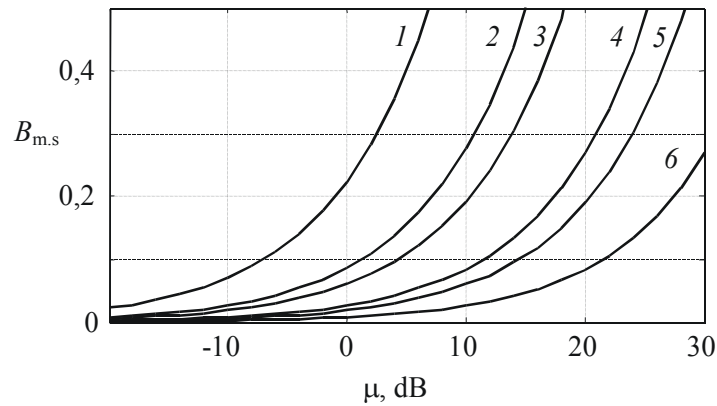


Рис. 2. Изолинии максимально достижимой вероятности ПО при $F_r = 10^{-6}$; 1 — $D_{\max}=0,5$; 2 — $D_{\max}=0,9$; 3 — $D_{\max}=0,95$; 4 — $D_{\max}=0,99$; 5 — $D_{\max}=0,995$; 6 — $D_{\max}=0,999$

Заклучение

Характеристики обнаружения в РЛС, использующей для подсвета модуляционную составляющую ТВ сигнала яркости, сильно зависят от уровня боковых лепестков автокорреляционной функции сигнала яркости и от мощности неподавленного остатка прямого сигнала, проникающего по боковым лепесткам диаграммы направленности основной антенны. Корреляционные свойства сигнала яркости зависят от передаваемого ТВ изображения и могут значительно меняться в течение трансляции. В рассмотренной ситуации единственным способом повышения достоверности обнаружения является увеличение отношения мощности полезного сигнала к остатку прямого сигнала. Например, для обеспечения вероятности правильного обнаружения не менее 0,9 это отношение должно быть не менее 15 дБ. Полученные результаты позволяют сформулировать технические требования к средствам подавления прямого сигнала.

CAPABILITY OF ACQUISITION OF TELEVISION BRIGHTNESS SIGNAL IN RADAR WITH OUTSIDE ILLUMINATION

P.G. SEMASHKO, A.E. OKHRIMENKO

Abstract

Television-based bistatic radar performs correlation detection of the brightness signal against noise and direct-path interference. It is analytically shown in the article that direct-path interference decreases the detection probability. Dependences between capability of acquisition, correlation characteristics of the brightness signal and signal-to-interference ratio are given.

Литература

1. *Griffiths H.D.* // Proc. of the International Radar Conference, 3–5 Sept. 2003. P. 1–7.
2. *Ивлев И.И., Романов А.В., Охрименко А.Е.* // Радиотехника и электроника: Сб. науч. тр. 1999. № 23. С. 31–36.
3. *Романов А.В., Ивлев И.И., Гейстер С.Р., Охрименко А.Е.* Энергетические характеристики сигналов и помех в РЛС с телевизионным подсветом. Мн., 1998. Деп. в "БелИСА".
4. *Семашко П.Г., Шалютин С.В., Романов А.В., Новак В.А.* // Радиотехника и электроника: Сб. науч. тр. 1999. № 24. С. 61–65.