

RADAR Detection of Concentrated Objects Using Broadband Radiation

Igor F. Lozovskiy², Aleksey A. Murasev¹, Alexander A. Spektor¹

⁽¹⁾ Novosibirsk State Technical University

⁽²⁾ JSC Scientific and Research Institute of Measurement Instrumentation – Novosibirsk Komintern Plant

The detection algorithm of concentrated objects using broadband radiation is presented in the article. The characteristics of the developed detector are obtained. A comparative analysis with a noncoherent detector is given.

Keywords: Broadband radiation, radar detection.

РАДИОЛОКАЦИОННОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ШИРОКОПОЛОСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Лозовский И.Ф.⁽²⁾, Мурачев А.А.⁽¹⁾, Спектор А.А.⁽¹⁾

⁽¹⁾ Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск

⁽²⁾ АО «НПО НИИИП-НЗиК», г. Новосибирск

В докладе изложен алгоритм обнаружителя сосредоточенных объектов при использовании широкополосного излучения. Получены характеристики разработанного обнаружителя. Приведен сравнительный анализ с некогерентным обнаружителем.

Ключевые слова: Широкополосное излучение, радиолокационное обнаружение.

Введение. Одним из интенсивно развиваемых направлений в импульсной радиолокации является применение широкополосных радиосигналов [1] с большой базой $B = \Delta f \cdot \tau_{\text{И}}$, где Δf – ширина спектра сигнала, $\tau_{\text{И}}$ – длительность импульса. Преимущество таких сигналов заключается в возможности раздельного управления разрешающей способностью по дальности $\delta R = c/(2\Delta f)$, зависящей от ширины полосы сигнала, и энергией $E = P\tau_{\text{И}}$, определяющей дальность действия, P – средняя мощность импульсного сигнала.

Классическая модель отраженного сигнала опирается на представление цели в виде совокупности одного вторичного излучателя (блестящей точки), дающего стабильный отраженный сигнал, и множества распределенных отражателей, формирующих случайную компоненту с гауссовским распределением. Такое представление цели оправдано в задачах, когда физический размер цели по дальности l_R меньше разрешаемого размера $l_R < \delta R$. Увеличение разрешающей способности приводит к нарушению этого условия, возникают противоположные ситуации $l_R > \delta R$, причем, превышение размера цели над разрешением может достигать нескольких десятков раз.

В этих условиях математическую модель сигнала цели предлагается описывать в виде некоторого числа блестящих точек, число и размещение которых на ее поверхности заранее неизвестно, может изменяться в процессе наблюдения. Высокое разрешение приводит к тому, что после радиоприема отраженного сигнала, включающего в себя согласованную фильтрацию, сигнал цели имеет вид последовательности неизвестного числа разрешаемых импульсов с неизвестными заранее интервалами между ними. Вполне очевидно, что обнаружение цели следует осуществлять с учетом этих особенностей сигнала.

В данной работе изложен разработанный метод обнаружения сигнала цели в условиях высокого временного разрешения, при котором обеспечиваются обычные радиолокационные требования стабилизации вероятности ложной тревоги и достижения наибольшей вероятности обнаружения.

Структура и рабочий алгоритм обнаружителя. Принятый сигнал цели на выходе согласованного фильтра представляет собой последовательность импульсных сигналов, число и взаимное временное положение которых для обнаружителя следует рассматривать как случайные параметры. Для получения максимального эффекта обнаружения цели интервал времени T_a , используемый для анализа принятого сигнала, целесообразно согласовывать с ожидаемым размером цели, т.е. выбирать по правилу:

$$T_a = l_R/c,$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ скорость распространения электромагнитных волн.

Пусть сигнал на входе обнаружителя описывается выражением

$$u(t) = \begin{cases} s(t) + n(t), & \text{при наличии цели} \\ n(t), & \text{при отсутствии цели} \end{cases}$$

где $s(t)$ и $n(t)$ – полезный сигнал и шум на выходе согласованного фильтра соответственно.

В качестве рабочего сигнала используется радиоимпульс с прямоугольной огибающей и линейной частотной модуляцией

$$s_1(t) = S_0 \cos[\omega_0 t + bt^2 + \varphi_0], \quad 0 \leq t \leq \tau_{\text{и}},$$

где $b = \frac{\pi \Delta f_{\text{д}}}{\tau_{\text{и}}}$ – скорость изменения частоты, $\Delta f_{\text{д}}$ – девиация частоты, φ_0 – начальная фаза. Тогда сигнал, отраженный от цели с $n_{\text{БТ}}$ блестящими точками и имеющей дальность $R_{\text{ц}}$, будет определяться выражением

$$s_{\text{ц}}(t) = \sum_{i=1}^{n_{\text{БТ}}} s_1(t - t_{\text{ц}} - t_i),$$

где $t_{\text{ц}} = 2R_{\text{ц}}/c$ – общее время задержки отраженного сигнала, t_i – время задержки между отраженными сигналами, определяемое расстояниями между блестящими точками наблюдаемой цели. Сигналы, образуемые при отражении различными блестящими точками, накладываются друг на друга, что схематически показано на рис.1-а. При большой базе сигнала $B \gg 1$ при согласованной фильтрации происходит сжатие отдельных входных импульсов в B раз, и картина выходного сигнала имеет вид рис.1-б.

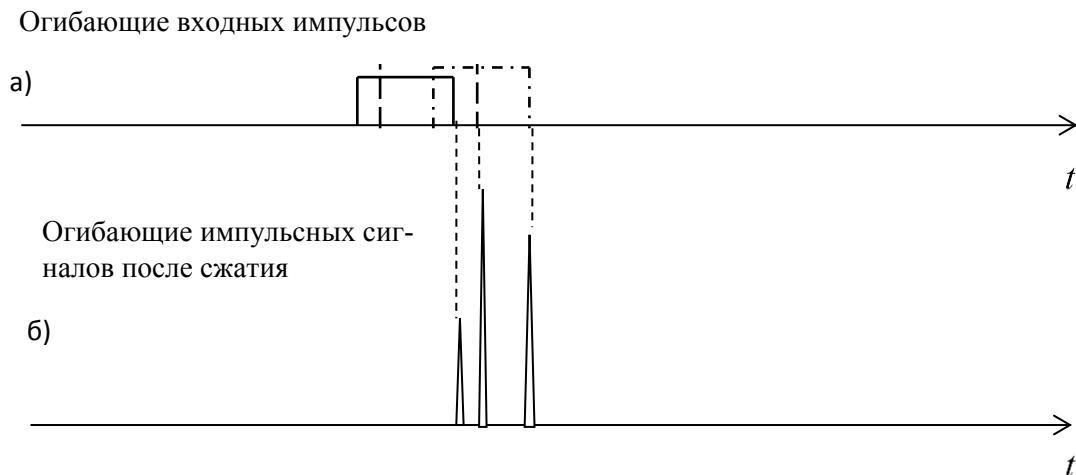


Рис.1. Вид огибающих сигнала цели на входе (а) и выходе (б) согласованного фильтра при наличии трех блестящих точек

При таком поведении сигнала значительная часть интервала анализа будет содержать только шумовую составляющую, и, следовательно, шум будет давать существенный вклад в решающую статистику, определяемую по правилу классического некогерентного накопления (алгоритм А1) [2]

$$\sum_i u_i^2 \underset{< \text{«}0\text{»} >}{\overset{> \text{«}1\text{»} >}{>}} z_0.$$

Таким образом, возникает идея двухпороговой обработки, где в решающую статистику входят только те отсчеты сигнала, которые превысили первый порог. Структура обнаружителя представлена на рис.2. Принимаемый сигнал оцифровывается, подвергается согласованной фильтрации, поступает на амплитудный детектор и далее на обнаружитель. Сигнал

на выходе ПУ₁ представляет собой последовательность редких выбросов, которые формируют решающую статистику по правилу

$$L = \sum_{i=1}^n (u_{1i} - z_1),$$

где u_{1i} – отсчеты u_i превысившие порог z_1 . Решение обнаружителя определяется по правилу (алгоритм А2)

$$L \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} \begin{matrix} \text{"1"} \\ \text{"0"} \end{matrix} z_2.$$

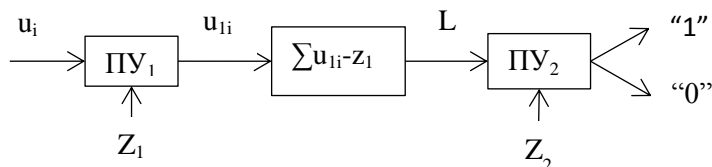


Рис.2. Структура обнаружителя.

Характеристики обнаружения. Определим основные характеристики обнаружителя – вероятности ложной тревоги и правильного обнаружения.

Число выбросов помехи, превысивших порог z_1 , подчиняется пуассоновскому закону распределения вероятностей [3]

$$p(n) = \frac{\lambda T_a}{n!} e^{-\lambda T_a}, \quad n = 0, 1, 2, \dots,$$

где λ – среднее число превышений порога z_1 в единицу времени

$$\lambda(z_1) = \frac{\omega_1}{2\pi} \exp\left(-\frac{z_1^2}{2\sigma_n^2}\right),$$

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{\int_0^\infty \omega^2 g(\omega) d\omega}{\int_0^\infty g(\omega) d\omega}},$$

$g(\omega)$ – спектральная плотность мощности шума на выходе согласованного фильтра.

Полагаем, что в пределах выброса имеется единственный отсчет помехи. Условная плотность распределения вероятностей (ПРВ) отсчета помехи, превысившего порог z_1

$$q_0(u_{1i}) = \frac{1}{\int_{z_1}^\infty p_0(u_i) du_i} p_0(u_i),$$

где $p_0(u_i)$ – безусловное распределение отсчета u_i

$$p_0(u_i) = \frac{u_i}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{u_i^2}{2\sigma^2}\right),$$

σ^2 – дисперсия шума на входе обнаружителя.

Условная вероятность ложной тревоги, при условии, что произошло n превышений порога z_1

$$F_n = \int_{z_2}^\infty q_n(L_n) dL_n,$$

где $q_n(L_n)$ – условное распределение решающей статистики.

Т.к. статистика L_n является суммой случайных величин u_i , то ее ПРВ можно определить с помощью характеристических функций [3] Q_n

$$q_n(L_n) = F^{-1}\{Q_n\},$$

$$Q_n = F\{q_0^n(u_{1i})\},$$

где $F\{\cdot\}$ и $F^{-1}\{\cdot\}$ – прямое и обратное преобразование Фурье.

Тогда полная вероятность ложной тревоги будет определяться выражением

$$F = \sum_{n=1}^{\infty} p_n F_n.$$

Число выбросов полезного сигнала определяется количеством $n_{\text{БТ}}$ блестящих точек. Положим, что выбросы помехи отсутствуют на интервале анализа T_a .

ПРВ числа превышений сигналом порога z_1

$$w_n = C_{n_{\text{БТ}}}^n p_1^n (1 - p_1)^{n_{\text{БТ}} - n}, \quad n = 0 \dots n_{\text{БТ}},$$

где p_1 – вероятность однократного превышения порога z_1

$$p_1 = \int_{z_1}^{\infty} p_1(u_i) du_i,$$

$p_1(u_i)$ – ПРВ отсчета u_i при наличии полезного сигнала

$$p_1(u_i) = \frac{u_i}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{u_i^2 - E_s^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{u_i E_s}{\sigma^2}\right),$$

E_s – энергия ЛЧМ-импульса $s_1(t)$.

Условная ПРВ отсчета сигнала, превысившего порог z_1

$$v_0(u_{1i}) = \frac{1}{\int_{z_1}^{\infty} p_1(u_i) du_i} p_1(u_i),$$

Условная вероятность правильного обнаружения, при условии, что произошло n превышений порога z_1

$$D_n = \int_{z_2}^{\infty} v_n(L_n) dL_n,$$

где $v_n(L_n)$ – условное распределение решающей статистики

$$v_n(L_n) = F^{-1}\{V_n\},$$

$$V_n = F\{v_0^n(u_{1i})\}.$$

Полная вероятность правильного обнаружения

$$D = \sum_{n=1}^{\infty} w_n D_n.$$

На рис.3. Представлена зависимость вероятности F ложной тревоги от порогов z_1 и z_2 . Как видно из графика, требуемая вероятность F может быть получена при разных комбинациях порогов. Таким образом, подбирая пороги, можно максимизировать вероятность D правильного обнаружения. Зависимость вероятности D от отношения сигнал/шум (ОСШ) $q = E_s/\sigma$ при разных комбинациях порогов и $F = 10^{-4}$ изображена на рис.4. Видно, что выбор порогов оказывает значительное влияние на качество работы обнаружителя. Выигрыш по ОСШ для оптимального случая рис.4 (кривая 1) относительно худшего рис.4 (кривая 3) составляет 3 дБ по уровню $D = 0.9$. Характеристики получены при параметрах сигнала: $\tau_{\text{и}} = 1$ мкс, $\Delta f_{\text{д}} = 150$ МГц, $f_0 = 100$ МГц.

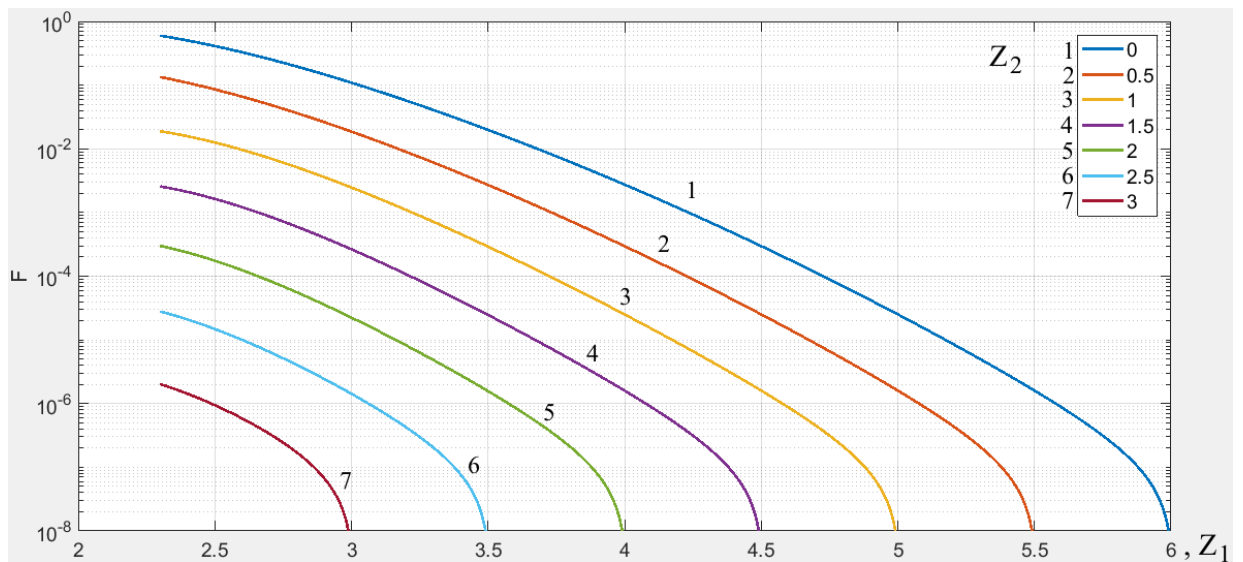


Рис.3. Зависимость вероятности F ложной тревоги от порогов z_1 и z_2 .

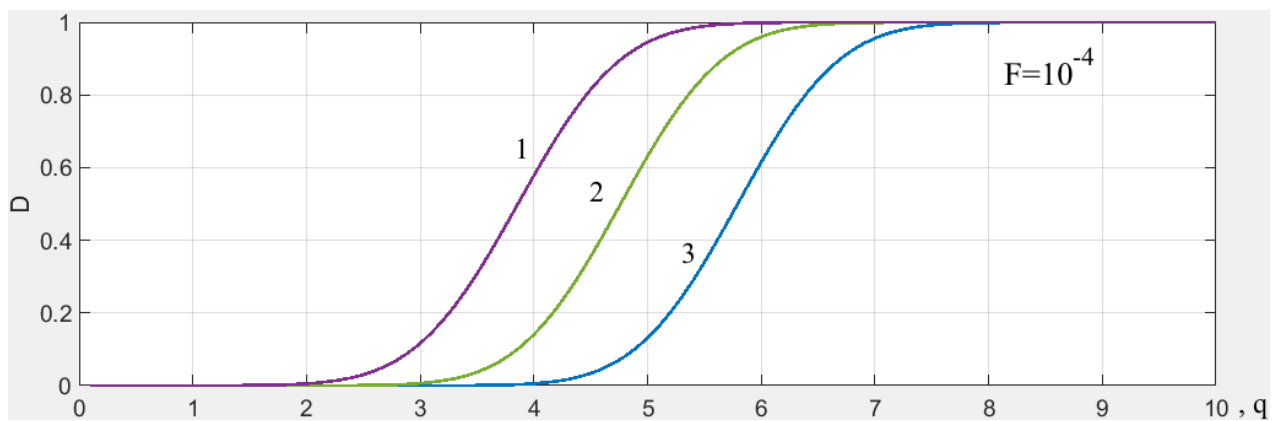


Рис.4. Зависимость вероятности D правильного обнаружения от ОСШ q .

Сравнение алгоритмов А1 и А2 , приведено на рис.5. Результаты получены для размера цели по дальности $l_R = 20$ м, числа блестящих точек $n_{БТ} = 3$ и $n_{БТ} = 20$, вероятности ложной тревоги $F = 10^{-6}$, $\tau_{и} = 1$ мкс, $\Delta f_{д} = 100$ МГц, $f_0 = 75$ МГц.. Как видно из графика, алгоритм А2 при $n_{БТ} = 3$ дает выигрыш по ОСШ в 1.3 дБ. При увеличении $n_{БТ}$ характеристики алгоритмов сближаются, т.к. область, занимаемая полезным сигналом на интервале анализа увеличивается.

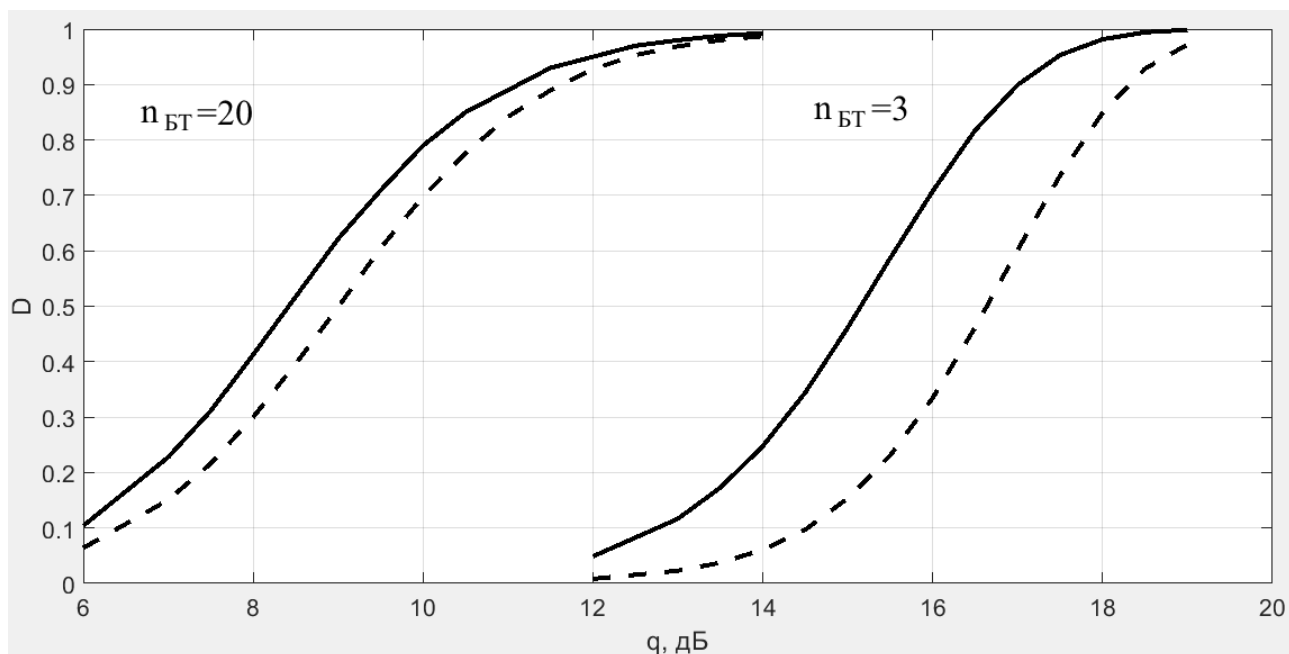


Рис.5. Зависимость вероятности D от ОСШ q (дБ) для двух алгоритмов обнаружения: А2 – сплошная, А1 – штриховая.

Заключение. В данной работе рассмотрен алгоритм обнаружения сосредоточенных объектов при использовании широкополосного излучения. Проведен сравнительный анализ разработанного алгоритма с классическим алгоритмом некогерентного накопления. Полученные результаты подтверждают эффективность разработанного алгоритма.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Лозовский И.Ф. Цифровая обработка сигналов в РЛС обзора. Новосибирск: НГУ, 2016. 270 с.
- [2] Казаринов Ю.М. Радиотехнические системы. Москва: Изд-во «Академия», 2008. 592 с.
- [3] Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Книга первая. Москва: Изд-во «Советское радио», 1969. 752 с.