УДК 621.396.96

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БОКОВЫХ ЛЕПЕСТКОВ СПЕКТРА ОТРАЖЁННОГО СИГНАЛА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПО ДАЛЬНОСТИ

к.т.н. К.В. Скульский, Р.П. Шолкин, Н.Н. Дегтярь, Д.А. Волчанский
(представил д.т.н., проф. В.К. Волосюк)

Изложен метод повышения разрешающей способности по дальности радиолокационной станции путем расширения полосы пропускания приемника и обработки принятого сигнала по предлагаемому алгоритму.

При радиолокации сложной цели возникает задача определения её структуры. Импульсы, отражённые от разных участков такой цели, приходят в точку приёма с разными амплитудами, фазами и временами запаздывания. Складываясь, импульсы образуют сигнал, форма которого не является прямоугольной. Обычно при радиолокационной обработке принятый сигнал рассматривается одиночным прямоугольным импульсом, а все изменения считаются случайными флуктуациями, которые не несут информацию. При такой обработке спектр принятого сигнала ограничивается шириной основного лепестка. В предлагаемом методе используются боковые лепестки принятого сигнала для восстановления мелких деталей цели, тем самым повышая разрешение по дальности.

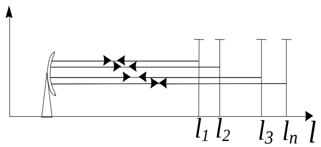

Рис. 1. Отражение сигнала от сложной цели

Рассмотрим сигнал, отражённый от сложной цели, состоящей из отдельных ярких точек (рис. 1). В этом случае отражённый сигнал можно представить в виде

$$\mathbf{S_{отр}(t) = \sum_{i=1}^{n} A_i \cdot S_1(t - t_i)}, \tag{1}$$

где $\mathbf{A_i}$, $\mathbf{t_i = 2\left(\frac{l_i}{c}\right)}$ - коэффициенты отражения и времена задержки **i** - х ярких точек соответственно; $\mathbf{S_1(t)}$ - излучаемый сигнал.

Если рассматривать цель как сплошной объект и задать функцию отражения $\mathbf{A(t)}$, то выражение (1) примет вид

$$S_{отр}(t) = \int_0^t A(\tau) \cdot S_1(t - \tau)\,d\tau. \quad (2)$$

Таким образом, задача восстановления структуры цели заключается в решении интегрального уравнения (2) относительно неизвестной функции отражения $A(t)$.

Один из методов решения такого интегрального уравнения является метод Фурье. Применив его к (2), получим

$$S_{отр}(j\omega) = A(j\omega) S_1(j\omega).$$

Отсюда

$$A(j\omega) = S_{отр}(j\omega) S_1^{-1}(j\omega).$$

Запишем алгоритм восстановления функции отражения.

1. Принятый сигнал подвергается преобразованию Фурье (т.е. находится спектр принятого сигнала).

2. Полученный спектр умножается на обратный спектр излучаемого сигнала $S_1^{-1}(j\omega)$. Таким образом, определяется спектр функции отражения $A(j\omega)$.

3. Обратным преобразованием Фурье от $A(j\omega)$ восстанавливается функция отражения $A(\tau)$.

Обычно радиолокационный импульс представляет собой прямоугольный импульс. Спектр такого сигнала определяется выражением

$$S_1(\omega) = A\tau_и \frac{\sin(\omega\,\tau_и/2)}{(\omega\,\tau_и/2)},$$

где $\omega = 2\pi(f - f_н)$. Следовательно, обратный спектр имеет вид

$$S_1^{-1}(\omega) = \frac{(\omega\,\tau_и/2)}{\sin(\omega\,\tau_и/2)}. \quad (3)$$

В некоторых точках эта функция имеет разрывы. При умножении на спектр отражённого сигнала получается функция, которая тоже будет иметь разрывы. Одним из условий существования преобразования Фурье является условие конечности значений функции, поэтому необходимо устранить разрывы в обратном спектре $S_1^{-1}(\omega)$. Для этого запишем (3) как

$$S_1^{-1}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{S_1^2(\omega) + a^2}}, \quad (4)$$

где $a \ll 1$.

Как видно из (4), функция $S_1^{-1}(\omega)$ определена при любых значениях $\omega$, т.е. спектр не ограничен по частоте. Для полного восстановления функции отражения необходимо перемножить спектр принятого сигнала

$\mathbf{S_{отр}(\omega)}$, что является физически не реализуемо. Поэтому придётся ограничить ширину спектра $\mathbf{S_1^{-1}(\omega)}$. На рис. 2 показан спектр $\mathbf{S_1^{-1}(\omega)}$, полученный по формуле (5) и ограниченный по ширине.

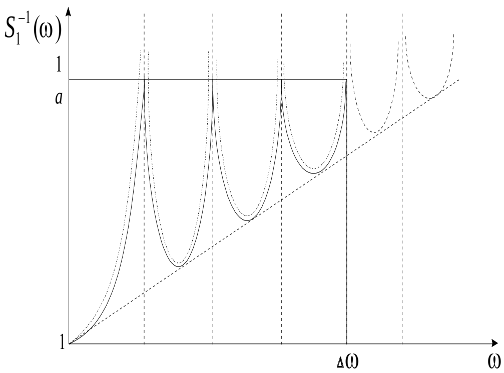


Рис.2. Спектр $\mathbf{S_1^{-1}(\omega)}$

Из рис. 2 видно, что информация о цели получается путём поднятия боковых лепестков спектра отражённого сигнала. Определим влияние ограничения спектра $\mathbf{S_1^{-1}(\omega)}$ на качество восстановления функции отражения. Будем рассматривать цель как одну яркую точку, что даст функцию отражения в виде $\delta$ - функции $\mathbf{A(t) = A_1\delta(t)}$. Принятый сигнал будет представлять собой одиночный прямоугольный импульс

$\mathbf{S_{отр}(t) = A_1(1(t) - 1(t - \tau_и))}$,

где $\mathbf{1(t) = 1}$, $\mathbf{t \geq 0}$, или $\mathbf{1(t) = 0}$, $\mathbf{t < 0}$; $\mathbf{1(t)}$ - единичная функция.

Спектр такого сигнала определяется выражением

$$\mathbf{S_{отр}(\omega) = A_1\tau_и \frac{\sin(\omega\tau_и/2)}{(\omega\tau_и/2)}}. \quad (5)$$

Тогда ограничение спектра можно записать в виде

$$\mathbf{S_1^{-1}(\omega)_{огр} = S_1^{-1}(\omega) \times}$$
$$\mathbf{\times (1(\omega + \Delta\omega) - 1(\omega - \Delta\omega))}.$$

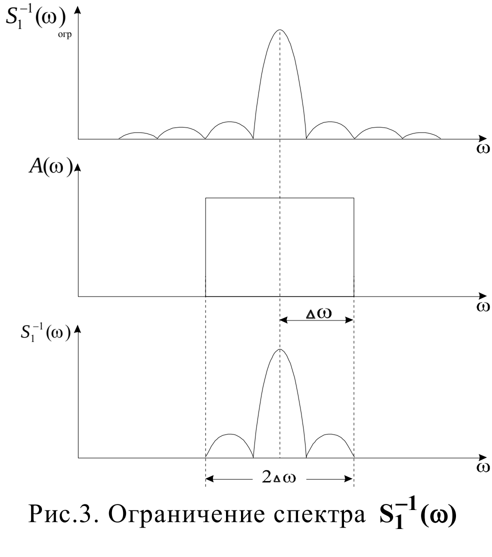


Рис.3. Ограничение спектра $\mathbf{S_1^{-1}(\omega)}$

На рис. 3 показано, что ограничение спектра можно представить как умножение исходного спектра зондирующего сигнала $\mathbf{S_1^{-1}(\omega)}$ на прямоугольный импульс $\mathbf{\Pi(\omega)}$ шириной $\mathbf{2\Delta\omega}$.

Спектр функции отражения будет определяться выражением

$$A(\omega)=A_1\tau_и\frac{\sin(\omega\,\tau_и/2)}{(\omega\,\tau_и/2)}S_1^{-1}(\omega)\cdot(1(\omega+\Delta\omega)-1(\omega-\Delta\omega)). \qquad (6)$$

Если рассматривается идеальный случай без учёта шумов, то, как видно из выражения (5), в спектре отражённого сигнала тоже будут нули и за обратный спектр можно принять выражение (3). Тогда выражение (6) принимает вид $\mathbf{A(\omega)=A_1(1(\omega+\Delta\omega)-1(\omega-\Delta\omega))}$. Обратное преобразование Фурье даёт следующее выражение для функции отражения во времени:

$$\mathbf{A(t) = 2A_1\Delta\omega(\sin(\Delta\omega t)/\Delta\omega t)}. \qquad (7)$$

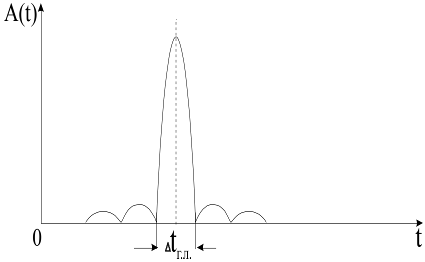

Рис.4. **A(t)** с ограниченным спектром

Функция отражения, заданная выражением (8), изображена на рис. 4.

Следовательно, ограничивая спектр, мы получаем вместо дельта-функции, функцию типа **sinc**. Тогда функция отражения **A(t)** сложной цели для изображённого на рис. 1 случая, показана на рис. 5.

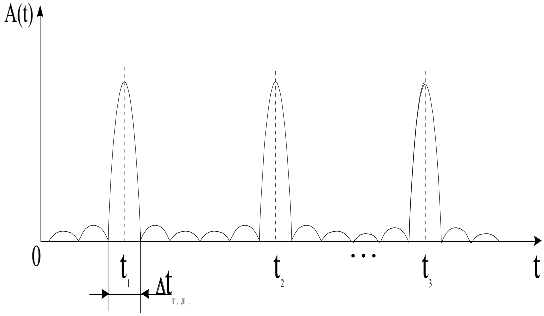

Рис. 5. Функция отражения **A(t)** для n ярких точек

Определим разрешение системы, которая восстанавливает функцию отражения по вышеуказанному алгоритму.

Разрешение определится шириной главного лепестка функции отражения, заданной выражением (8). Определим ширину главного лепестка функции отражения из условия $\mathbf{\sin(\Delta\omega t)/\Delta\omega t = 0}$. Отсюда $\mathbf{t\Delta\omega = \pi k}$, где $\mathbf{k = 1, 2, ...}$ и $\mathbf{\Delta t_1 = \pi\Delta\omega}$ - половина ширины лепестка и окончательно $\mathbf{\Delta t_{г.л.}=2\pi/\Delta\omega}$.

Таким образом, для увеличения разрешения по дальности в **К** раз необходимо увеличить полосу пропускания приемника в **К** раз с последующей обработкой сигнала предложенным методом.

## ЛИТЕРАТУРА


1. Островитянов Р.В., Басалов Ф.А. Статическая теория радиолокации протяжённых целей. – М.: Радио и связь, 1982. – 320 с.

2. Теоретические основы радиолокации / Под ред. Дулевича В.Е. – М.: Советское радио, 1964. – 242 с.

3. Боглаев Ю.П. Вычислительная математика и программирование. – М.: Высшая школа, 1990. – 290 с.