

Нижегородский научно-исследовательский
радиофизический институт
Министерства общего и профессионального образования
Российской Федерации

Препринт № 442

**УСЛОВИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ РАБОТЫ
АНТЕННЫ ТЕМНОГО ПОЛЯ**

Ю.В.Петухов

Нижний Новгород, 1998

Ю.В.Петухов

УСЛОВИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ РАБОТЫ АНТЕННЫ ТЕМНОГО ПОЛЯ// Препринт № 442 . Нижний Новгород: НИРФИ, 1998 - 8 стр.

Аналитически проанализированы алгоритмы обработки сигналов, принимаемых линейной акустической антенной, основанные на адаптивном и теневом методах. Получено условие, выполнение которого необходимо для того, чтобы основанная на теневом методе фильтрация сигналов обладала определенными преимуществами.

Yu.V.Petukhov

THE CONDITION FOR EFFECTIVE OPERATION OF DARK FIELD ANTENNA // Preprint N 442. Nizhny Novgorod, 1998. - 8 p.

Processing algorithms based on the adaptive and shadow methods for signals received by linear acoustical antenna were studied analytical. Necessary condition for preference of signal filtering based on the shadow method was obtained

Для выделения слабых рассеянных сигналов на фоне преобладающих по интенсивности прямых сигналов подсветки в [1] был предложен метод антенны темного поля, аналогичный используемому в оптике [2]. Этот метод применим, в отличие от [3], для антенны, размер апертуры которой мал по сравнению с соответствующей ей зоной Френеля. При этом в [1] с использованием численного моделирования было установлено, что алгоритм фильтрации сигналов, характерный для антенны темного поля, обладает определенными преимуществами перед характерным для адаптивной антенны алгоритмом, проявляющимися при выделении слабых сигналов на фоне помехи с достаточно расширенным пространственным спектром.

Настоящая же работа посвящена, в отличие от [1], аналитическому сравнению рассмотренных в [1] алгоритмов фильтрации сигналов, принимаемых линейной акустической антенной, с целью установления возможных ограничений на эффективную работу антенны темного поля.

Для решения поставленной задачи предположим, что на линейную антенну под отличающимися друг от друга углами θ_S и θ_n ($\theta_S \neq \theta_n$) падают две плоские волны давления с одинаковой частотой ω :

$$p' = \exp(-i \omega t) [p_S \exp(i u_S x) + p_n \exp(i u_n x)] , \quad (1)$$

при этом амплитуда полезного сигнала равна p_S , а помехи - p_n . Здесь t - время, x - координата и для сокращения записи формул введены следующие параметры: $u_S = k \sin \theta_S$, $u_n = k \sin \theta_n$; где $k = \omega / c$, c - скорость звука. Тогда величина

U , характеризующая отношение напряжения на выходе антенны к его максимальному значению при $p_n = 0$ и $p_s = 1$ Па, запишется в следующем виде:

$$U(u_0) = \frac{\exp(i\omega t)}{L} \int_{-L/2}^{L/2} p' \exp(-i u_0 x) dx =$$

$$= p_s \frac{\sin\left[\frac{L}{2}(u_s - u_0)\right]}{\frac{L}{2}(u_s - u_0)} + p_n \frac{\sin\left[\frac{L}{2}(u_n - u_0)\right]}{\frac{L}{2}(u_n - u_0)}, \quad (2)$$

где $u_0 = k \sin\theta_0$, θ_0 - угол компенсации, L - длина антенны.

При $p_n \gg p_s$ преобразование (2) позволит всего лишь определить направление на источник помехи; информация же об источнике полезного сигнала может, в лучшем случае, только угадываться на фоне боковых минимумов характеристики направленности антенны в поле помехи.

Алгоритм адаптивной фильтрации основан на формировании отличающегося от (1) акустического сигнала

$$P_a = p' - p_n \frac{\sin\left[\frac{L}{2}(u_n - u_0)\right]}{\frac{L}{2}(u_n - u_0)} \times \exp[i(u_0 x - \omega t)], \quad (3)$$

в поле которого характеристика направленности $D(\theta_s, \theta_0)$ линейной антенны будет определяться только лишь полезным сигналом

$$D(\theta_S, \theta_0) = \frac{\exp(i\omega t)}{P_S L} \int_{-L/2}^{L/2} P_a \exp(-i u_0 x) dx = \frac{\sin\left[\frac{L}{2}(u_S - u_0)\right]}{\frac{L}{2}(u_S - u_0)}. \quad (4)$$

В алгоритме фильтрации антенны темного поля сначала также выполняется аналогичное (2) преобразование

$$\begin{aligned} W(u) &= \frac{\exp(i\omega t)}{L} \int_{-L/2}^{L/2} p' \exp(-i u x) dx = \\ &= P_S \frac{\sin\left[\frac{L}{2}(u - u_S)\right]}{\frac{L}{2}(u - u_S)} + P_N \frac{\sin\left[\frac{L}{2}(u - u_N)\right]}{\frac{L}{2}(u - u_N)}. \end{aligned} \quad (5)$$

Однако затем полученный результат (5) умножается на линейную функцию $(u - u_0)$ и выполняется, в некотором смысле обратное (5), преобразование Фурье:

$$P_T(x) = \frac{L}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} (u - u_0) W(u) \exp(i u x) du. \quad (6)$$

Поскольку с помощью преобразования (5) можно определить направление на источник помехи ($P_N \gg P_S$), то, полагая в (6) $u_0 = u_N$, находим

$$P_T(x) = P_S(x) + P_N(x), \quad (7)$$

где:

$$P_S(x) = \frac{P_S}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{u - u_N}{u - u_S} \right] \times \sin\left[\frac{L}{2}(u - u_S)\right] \exp(i u x) du, \quad (8)$$

$$P_n(x) = \frac{P_n}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \sin \left[\frac{L}{2}(u - u_n) \right] \exp(i u x) du. \quad (9)$$

Преобразуем теперь выражение (9) следующим образом:

$$P_n(x) = \frac{P_n}{2i\pi} \left[\exp \left[-i \frac{L}{2} u_n \right] \int_{-\infty}^{\infty} \exp[i u (x + L/2)] du - \exp \left[i \frac{L}{2} u_n \right] \int_{-\infty}^{\infty} \exp[i u (x - L/2)] du \right] = \quad (10)$$

$$= i p_n \left[\exp \left[i \frac{L}{2} u_n \right] \delta(x - L/2) - \exp \left[-i \frac{L}{2} u_n \right] \delta(x + L/2) \right],$$

где $\delta(x \pm L/2)$ - дельта-функция соответствующего аргумента.

Из (10) следует, что для затенения помехи в исходном сигнале (1) необходимо домножить величину $P_T(x)$ (7) на функцию

$$M(x) = \frac{1}{2} [\theta_t(x - \varepsilon + L/2) - \theta_t(x + \varepsilon - L/2)], \quad (11)$$

выполняющую, по аналогии с оптикой, роль “затеняющего экрана”, а затем выполнить интегральное преобразование следующего вида:

$$V(u) = \frac{1}{L} \int_{-L/2+\varepsilon}^{L/2-\varepsilon} M(x) P_T(x) \exp(-i u x) dx. \quad (12)$$

Здесь $\theta_t \left(x \pm \frac{L}{2} \mp \varepsilon \right)$ - тэта-функция соответствующего аргумента, а значения параметра $\varepsilon > 0$ можно выбирать из диапазона $\lambda/2 < \varepsilon < \lambda$, где $\lambda = 2\pi/k$.

С использованием (7) - (11) из (12) находим

$$V(u) = \frac{p_S}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} (u' - u_n) \frac{\sin \left[\frac{L}{2} (u' - u_S) \right]}{\frac{L}{2} (u' - u_S)} \frac{\sin \left[\left(\frac{L}{2} - \varepsilon \right) (u - u') \right]}{(u - u')} d u' \quad (13)$$

Далее, полагая с целью упрощения аналитических расчетов в (13) $\varepsilon = 0$ и используя в нем очевидное тождество

$$\frac{u' - u_n}{u' - u_S} = 1 + \frac{u_S - u_n}{u' - u_S}, \quad (14)$$

приводим выражение (13) к следующему виду

$$V(u) = \frac{2 p_S}{L} \left[I(a) + \frac{b}{a} [I(a) - I(-a)] \right], \quad (15)$$

где

$$I(a) = \int_{-\infty}^{\infty} \sin(y+a) \frac{\sin y}{y} dy, \quad (16)$$

$$a = \frac{L}{2} (u - u_S), \quad b = \frac{L}{2} (u_S - u_n). \quad (17)$$

Выполняя интегрирование в (16)

$$I(a) = i \frac{\pi}{2} \exp(-i a) \quad (18)$$

и подставляя полученный результат (18) в (15), находим для $V(u)$ окончательное выражение:

$$V(u) = p_S (u_S - u_n) \left[D(\theta, \theta_S) + \frac{\exp \left[i \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{L}{\pi} (u - u_S) \right) \right]}{L (u_S - u_n)} \right], \quad (19)$$

где

$$D(\theta, \theta_s) = \sin \left[\frac{L}{2} (u - u_s) \right] / \left[\frac{L}{2} (u - u_s) \right] \quad (20)$$

характеристика направленности линейной антенны на полезный сигнал, $u = k \sin \theta$.

Как видно из (19), (20), при характерном для антенны темного поля алгоритме обработки принимаемых сигналов, в конечном результате получается зависимость $V(u)$, которая, в отличие от результата адаптивной фильтрации (4), лишь приближенно совпадает с характеристикой направленности линейной антенны на полезный сигнал при выполнении условия

$$k L (\sin \theta_s - \sin \theta_n) \gg 1, \quad (21)$$

соответствующего малости второго слагаемого в (19) по сравнению с первым, т.е. с $D(\theta, \theta_s)$.

Естественно, что установленное здесь дополнительное ограничение (21) на угловое расположение источников полезного сигнала и помехи может привести к потере преимущества антенны темного поля над обычной адаптивной антенной при работе в поле помехи с достаточно широким угловым спектром.

Список литературы

1. Зверев В.А. Антенна темного поля // Акуст. журн. 1994. Т.40. № 3. С. 401-404.
2. Васильев Л.А. Теневые методы. М.: Наука, 1968. 281 с.
3. Зверев В.А., Матвеев А.Л., Славинский М.М., Стромков А.А. Фокусируемая антенна темного поля // Акуст. журн. 1997. Т. 43. № 4. С. 501-507.