

УДК 681.513.6

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА АДАПТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В ЗАДАЧЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЛИНЕЙНЫХ ОБЪЕКТОВ

Джиган В.И., д.т.н., гл. науч. сотр., Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук, г. Москва, e-mail: djigan@ippm.ru

QUALITY ESTIMATION OF ADAPTIVE FILTERING IN PROBLEM OF LINEAR OBJECT IDENTIFICATION

Djigan V.I.

The problem of the identification of a linear object is a classical task of adaptive signal processing. It is widely used to identify the electrical and the acoustic impulse responses in the echo cancellers, in the active noise cancellation devices and in a number of other devices. Using an example of a linear impulse response identification, the paper shows that the such performance indicators of an adaptive filter in this problem as the misalignment (the Euclidean distance between the identified impulse response and the impulse response of the adaptive filter) and the Echo Return Loss Enhancement (ERLE) are inverse to each other if their values are expressed in linear scale or are sign-opposite to each other in logarithmic scale. The truth of this result has also been proven mathematically in the case of the usage a signal with uncorrelated samples as a training one (input one for identified object and adaptive filter) for the identification. This makes it possible to evaluate the quality of the identification under the consideration only the mismatch. For that it is sufficient to conduct only one experiment. This, in turn, allows not to conduct the statistical simulation, which requires a large number of experiments, when estimating the ERLE directly. In addition, it has been proven that, having the values of the expected impulse responses obtained by a preliminary study of the identified objects, for a given number of weights of the adaptive filter it is possible to estimate the achievable values of the misalignment and the ERLE, or to estimate the needed number of the weights, which ensure the required values of the misalignment and ERLE.

Key words: identification of linear system; adaptive filter; impulse response; misalignment; Echo Return Loss Enhancement (ERLE).

Ключевые слова: идентификация линейной системы; адаптивный фильтр; импульсный отклик; рассогласование; коэффициент ослабления эхо-сигнала.

Введение

Сегодня изделия радиоэлектронной промышленности характеризуются широким использованием в них методов цифровой обработки сигналов (ЦОС) [1]. Такие изделия являются неотъемлемыми элементами оборудования современных радиотехнических систем различного назначения (радиолокации, радионавигации, радиоуправления) и систем связи (проводных, беспроводных, оптических, акустических). ЦОС также широко используется в изделиях бытовой электроники. Адаптивная обработка сигналов – это одно из направлений в современной ЦОС [2 – 5]. На основе адаптивных фильтров сегодня строятся адаптивные антенные и акустические решетки, эквалайзеры модемов связи и акустических характеристик помещений, компенсаторы сигналов электрического и акустического эха, различные компенсаторы шумов и ряд других устройств [6].

При всем многообразии аддитивных фильтров, обусловленном разновидностями алгоритмов вычисления весовых коэффициентов этих фильтров, в основе большинства указных выше устройств находится решения задачи идентификации линейных объектов. Действительно, при адаптивном подавлении сигналов электрического эха решается задача идентификации линейного импульсного отклика так называемой гибридной схемы, осуществляющей маршрутизацию сигналов передаваемых с четырехпроводного канала связи в двух-

Идентификация линейных объектов является классической задачей адаптивной обработки сигналов. Она широко используется при идентификации электрических и акустических импульсных откликов в компенсаторах эхосигналов, устройствах активного шумоподавления и в ряде других устройств. На примере идентификации линейного импульсного отклика в работе показано, что в этой задаче такие показатели качества адаптивного фильтра как рассогласование (евклидово расстояние между идентифицируемым импульсным откликом и импульсным откликом адаптивного фильтра) и коэффициент ослабления эхосигнала являются обратными по отношению к друг-другу величинами при выражении их в линейном масштабе или противоположными по знаку величинами в логарифмическом масштабе. Истинность этого результата также доказана математически в случае использования сигнала с некоррелированными отсчетами в качестве обучающего (входного для идентифицируемого объекта и адаптивного фильтра) при решении задачи идентификации. Это позволяет оценивать качество идентификации лишь по рассогласованию, для оценки которого достаточно проводить всего лишь один эксперимент, что, в свою очередь позволяет, не проводить статистического моделирования, требующего большого числа экспериментов, для непосредственной оценки коэффициента ослабления эхосигнала. Кроме того доказано, что, располагая значениями ожидаемых импульсных откликов, полученных путем предварительного исследования идентифицируемых объектов, можно, не проводя моделирования, оценивать достижимые значения рассогласования и коэффициента ослабления эхосигнала при заданном числе весовых коэффициентов адаптивного фильтра, или же оценивать это число, при котором обеспечиваются требуемые значения рассогласования и коэффициента ослабления эхосигнала.

проводный и наоборот; при подавлении сигналов акустического эха решается задача идентификации линейного акустического импульсного отклика закрытого помещения; в активном шумоподавлении наряду с основной задачей решается задача идентификации так называемого вторичного пути распространения акустического сигнала. Это лишь некоторые примеры использования адаптивной идентификации линейных объектов.

При решении этой задачи естественным образом возникает вопрос о качестве ее решения, которое определяется не только алгоритмом вычисления весовых коэффициентов адаптивного фильтра, но и числом этих коэффициентов. Собственно качество в терминах скорости получения решения (длительности переходного процесса) определяется в первую очередь видом используемого адаптивного алгоритма, а качество идентификации определяется тем, насколько результирующий импульсный отклик адаптивного фильтра в установленном состоянии близок к импульсному отклику идентифицируемой линейной системы. Этот показатель как раз зависит от числа весовых коэффициентов адаптивного фильтра, которое должно быть согласовано с предполагаемым числом отсчетов идентифицируемого импульсного отклика. Данный показатель принято характеризовать евклидовым расстоянием между импульсными откликами идентифицируемой системы и адаптивного фильтра, а также нормированным уровнем среднеквадратичной ошибки на выходе адаптивного фильтра.

Цель настоящей статьи – демонстрация того факта, что оба показателя качества задачи идентификации линейных объектов являются обратными по отношению к друг-другу величинами при выражении их в линейном масштабе или противоположными по знаку величинами в логарифмическом масштабе.

Кроме того, в статье также показано как оценивать эти показатели не проводя моделирование.

1. Задача идентификации линейных объектов

Принцип идентификации линейных систем (рис. 1), далее по тексту просто «идентификации», базируется на оценке (определении) импульсного отклика этой системы с помощью адаптивного фильтра с конечной импульсной характеристикой (КИХ).



Рис. 1. Адаптивная идентификация линейной системы

При решении данной задачи сигнал $x(k)$ является входным и для идентифицируемой системы, и для адаптивного фильтра. Поэтому минимизация некоторой функции ошибок $\alpha(k)$ между выходными сигналами идентифицируемой системы $d(k)$ и адаптивного фильтра $y(k)$ означает, что адаптивный фильтр моделирует идентифицируемую систему, так как его выходной сигнал

$$y(k) = \mathbf{h}_N^H(k-1)\mathbf{x}_N(k) \quad (1)$$

«воспроизводит» выходной сигнал этой системы $d(k)$.

Здесь и далее, жирными прямыми строчными буквами обозначаются векторы (вектор-столбцы). Матрицы далее будут обозначаться жирными прямыми прописными буквами. Один нижний индекс в обозначении векторов, например N , обозначает число элементов в векторах, а аналогичный один нижний индекс в обозначении квадратной матрицы обозначит число ее элементов, равное $N \times N$. Верхние индексы T и H в векторах и матрицах обозначают, соответственно, операции транспонирования и эрмитово сопряжения. Операция комплексного сопряжения скалярных переменных обозначается символом $*$.

В настоящей статье рассматривается общий случай идентификации комплексных импульсных откликов при обработке комплексных сигналов. В обозначениях сигналов, k – это индекс дискретного времени или номер отсчета обрабатываемого сигнала. Эти отсчеты равномерно распределены на оси времени как $t(k) = kT_s = k/F_s$, где T_s – период дискретизации, а F_s – частота дискретизации обрабатываемых сигналов.

В уравнении (1),

$$\mathbf{h}_N(k) = [h_1(k), h_2(k), \dots, h_N(k)]^T \quad (2)$$

– это вектор весовых коэффициентов адаптивного фильтра, а

$$\mathbf{x}_N(k) = [x(k), x(k-1), \dots, x(k-N+1)]^T \quad (3)$$

– вектор сигналов в фильтре. Отсчеты импульсного отклика идентифицируемой линейной системы далее обозначаются вектором

$$\mathbf{w}_N = [w_1, w_2, \dots, w_N]^T. \quad (4)$$

Предполагается, что длительность этого отклика известна, а число его отсчетов равно числу весовых коэффициентов N адаптивного фильтра, что соответствует условию идеальной идентификации (рис. 1). Однако, условия идеальной идентификации на практике не существуют. На качество идентификации, независимо от вида используемого алгоритма адаптивной фильтрации, всегда влияет наличие аддитивного шума $z(k)$ (рис. 2).



Рис. 2. Адаптивная идентификация неизвестной системы при наличии аддитивного шума

Шум $z(k)$ может быть как тепловым шумом в каналах проводной связи или акустическим шумом в помещении, так и шумом, обусловленным не полной идентификацией неизвестной системы из-за того, что точное число отсчетов идентифицируемого импульсного отклика обычно не известно. Поэтому обычно число весовых коэффициентов используемого адаптивного КИХ-фильтра N_h , совпадающее с числом отсчетов его импульсного отклика, как правило, меньше предпола-

гаемого числа отсчётов N_w идентифицируемого импульсного отклика. Как следствие, некомпенсированная часть сигнала $d(k)$ образует шум, который оценивается как

$$z(k) = d(k) - \mathbf{h}_N^H(k-1)\mathbf{x}_N(k) = \sum_{n=1}^{N_w} w_n^* x(k-n+1) - \sum_{n=1}^{N_h} h_n^*(k-1)x(k-n+1) = \sum_{n=1}^{N_h} w_n^* x(k-n+1) + \sum_{n=N_h+1}^{N_w} w_n^* x(k-n+1) - \sum_{n=1}^{N_h} h_n^*(k-1)x(k-n+1) = \sum_{n=N_h+1}^{N_w} w_n^* x(k-n+1). \quad (5)$$

В (5) предполагается, что

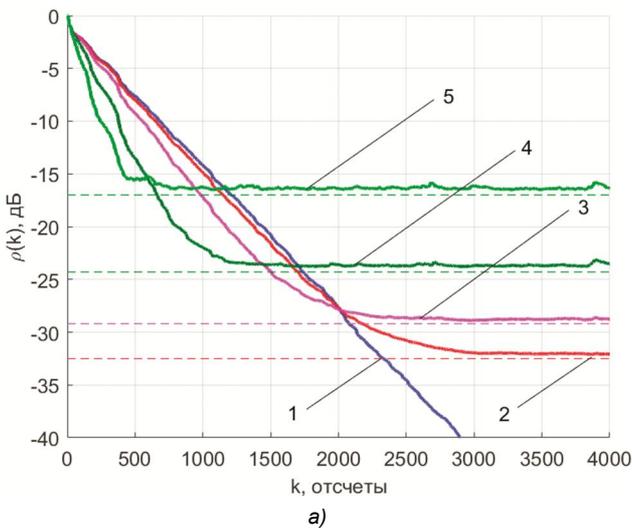
$$\sum_{n=1}^{N_h} w_n^* x(k-n+1) = \sum_{n=1}^{N_h} h_n^*(k-1)x(k-n+1). \quad (6)$$

Это означает, что некоторая (как правило, начальная) часть идентифицируемого импульсного \mathbf{w}_{N_w} в точности идентифицируется адаптивным фильтром, т.е. $\mathbf{h}_{N_h}(k) = \mathbf{w}_{N_h}$.

На практике же, условие (6) никогда не выполняется, так как шум $z(k)$ также влияет на качество адаптивной фильтрации, а потому из-за этого он всегда больше значения, определяемого уравнением (5).

Одним из показателей качества задачи идентификации является так называемое «рассогласование». Это евклидово расстояние между вектором весовых коэффициентов адаптивного фильтра $\mathbf{h}_{N_h}(k)$ и вектором отсчетов импульсного отклика $\mathbf{w}_{N_w} = [w_1, w_2, \dots, w_{N_w}]^T$, определяемое как

$$\rho(k) = 10 \lg \frac{\|\mathbf{w}_{N_w} - \mathbf{h}_{N_h}(k)\|_2^2}{\|\mathbf{w}_{N_w}\|_2^2} = 10 \lg \frac{\sum_{n=1}^N [w_n - h_n(k)]^2}{\sum_{n=1}^N w_n^2}, \quad (7)$$



где символ $\|\bullet\|_2$ обозначает евклидову норму вектора. В уравнении (7), при $N_h < N_w$ вектор $\mathbf{h}_{N_h}(k)$ дополняется нулями от $N_h + 1$ до $N = N_w$, а при $N_h > N_w$ вектор \mathbf{w}_{N_w} дополняется нулями от $N_w + 1$ до $N = N_h$.

Другим показателем качество решения задачи идентификации является коэффициент ослабления эхо-сигнала (Echo Return Loss Enhancement, ERLE), который определяется как отношение средней мощности сигнала $d(k)$ к средней мощности сигнала ошибок $\alpha(k)$, именуемого эхо-сигналом (в задачах подавления эхо-сигналов). Этот показатель определяется как

$$ERLE(k) = 10 \lg \frac{E\{d^2(k)\}}{E\{\alpha^2(k)\}}, \quad (8)$$

где $E\{\bullet\}$ – оператор усреднения.

На рис. 3 приведен пример результатов моделирования задачи идентификации одного из импульсных откликов, регламентируемых стандартом для оценки качества эхокомпенсаторов, используемых в проводных каналах связи [7]. Этот импульсный отклик содержит $N_w = 64$ отсчета. В качестве тестового сигнала $x(k)$ при идентификации использовался белый гауссовский шум, отсчеты которого не коррелированы.

Номера кривых на рис. 3 соответствуют использованию для решения задачи идентификации адаптивного фильтра с числом весовых коэффициентов $N_h \leq N_w$.

Из рис. 3, а следует, что, при $N_h < N_w$ длительность переходного процесса адаптивного фильтра в терминах показателя $\rho(k)$ уменьшается, так как уменьшается число весовых коэффициентов используемого адаптивного фильтра. Однако при решении задачи возникает шум (5), влияющий на качество идентификации, который уменьшает точность вычисления весовых коэффициентов, характеризуемую рассогласованием (7).

Переходные процессы, аналогичные рис. 3, а, в терминах ERLE представлены на рис. 3, б. Этот рисунок

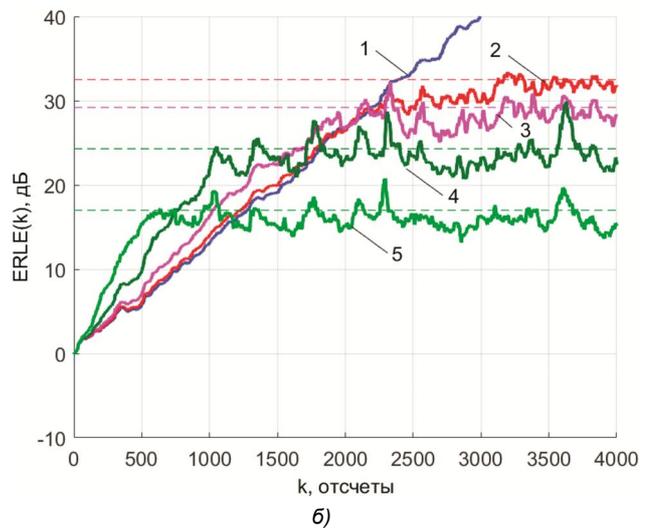
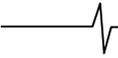


Рис. 3. Идентификация импульсного отклика: а) – рассогласование; б) – ERLE; 1 – $N_h = 64$; 2 – $N_h = 60$; 3 – $N_h = 50$; 4 – $N_h = 32$; 5 – $N_h = 16$



также подтверждает ухудшение качества решения задачи идентификации при $N_h \leq N_w$, т.е. возрастание средней мощности сигнала ошибок $\alpha(k)$, что обусловлено наличием шума $z(k)$, влияющего на качество работы адаптивного фильтра.

Поэтому при решении задачи идентификации число весовых коэффициентов N_h по отношению к числу N_w выбирается, исходя из компромисса между требуемым качеством идентификации и вычислительными ресурсами, необходимыми для реализации адаптивного фильтра.

Из сравнения рис. 3, а и рис. 3, б легко заметить, что в установившемся состоянии процесса идентификации для графиков в логарифмическом масштабе справедливо соотношение

$$ERLE(k) \approx -\rho(k), \quad (9)$$

что в линейном масштабе соответствует соотношению

$$ERLE(k) \approx \frac{1}{\rho(k)}. \quad (10)$$

Действительно, в представленном примере, горизонтальные линии на рис. 3, а и рис. 3, б соответствуют значениям показателей (7) и (8), представленных векторами

$$\boldsymbol{\rho} = [-32.5_{N=60}, -29.2_{N=50}, -24.3_{N=32}, -17.1_{N=16}]^T, \text{ дБ}, \quad (11)$$

$$\mathbf{ERLE} = [32.5_{N=60}, 29.2_{N=50}, 24.3_{N=32}, 17.1_{N=16}]^T, \text{ дБ}. \quad (12)$$

2. Доказательство результата, представленного в разделе 1

Можно доказать, что результаты (9) и (10) справедливы с точностью до равенства при использовании сигнала с некоррелированными отсчетами в качестве тестового сигнала $x(k)$ при решении задачи идентификации. Корреляционная матрица такого сигнала

$$\mathbf{R}_N = E\{\mathbf{x}_N(k)\mathbf{x}_N^H(k)\} \approx \sigma_x^2 \mathbf{I}_N \quad (13)$$

является диагональной. Здесь $\sigma_x^2 = E\{x(k)x^*(k)\}$ – дисперсия сигнала $x(k)$, а \mathbf{I}_N – диагональная единичная матрица.

В этом случае,

$$\alpha(k) = d(k) - y(k) = \mathbf{w}_N^H \mathbf{x}_N(k) - \mathbf{h}_N^H(k-1) \mathbf{x}_N(k) = [\mathbf{w}_N^H - \mathbf{h}_N^H(k-1)] \mathbf{x}_N(k), \quad (14)$$

и

$$E\{\alpha^2(k)\} = E\{\alpha(k)\alpha^*(k)\} = \quad (15)$$

$$\begin{aligned} &= E\left\{[\mathbf{w}_N^H - \mathbf{h}_N^H(k-1)] \mathbf{x}_N(k) [\mathbf{w}_N^H - \mathbf{h}_N^H(k-1)] \mathbf{x}_N(k)^H\right\} = \\ &= E\left\{[\mathbf{w}_N^H - \mathbf{h}_N^H(k-1)] \mathbf{x}_N(k) \mathbf{x}_N^H(k) [\mathbf{w}_N^H - \mathbf{h}_N^H(k-1)]^H\right\} = \\ &= [\mathbf{w}_N^H - \mathbf{h}_N^H(k-1)] E\{\mathbf{x}_N(k) \mathbf{x}_N^H(k)\} [\mathbf{w}_N - \mathbf{h}_N(k-1)] = \\ &= [\mathbf{w}_N^H - \mathbf{h}_N^H(k-1)] \mathbf{R}_N [\mathbf{w}_N - \mathbf{h}_N(k-1)] = \\ &= [\mathbf{w}_N^H - \mathbf{h}_N^H(k-1)] \sigma_x^2 \mathbf{I}_N [\mathbf{w}_N - \mathbf{h}_N(k-1)] = \\ &= \sigma_x^2 [\mathbf{w}_N^H - \mathbf{h}_N^H(k-1)] [\mathbf{w}_N - \mathbf{h}_N(k-1)] = \sigma_x^2 \|\mathbf{w}_N - \mathbf{h}_N(k-1)\|_2^2. \end{aligned}$$

Аналогично

$$\begin{aligned} E\{d^2(k)\} &= E\{|d(k)|^2\} = E\{d(k)d(k)^*\} = \\ &= E\{\mathbf{w}_N^H \mathbf{x}_N \mathbf{x}_N^H \mathbf{w}_N\} = \mathbf{w}_N^H E\{\mathbf{x}_N \mathbf{x}_N^H\} \mathbf{w}_N = \\ &= \mathbf{w}_N^H \mathbf{R}_N \mathbf{w}_N = \mathbf{w}_N^H \sigma_x^2 \mathbf{I}_N \mathbf{w}_N = \sigma_x^2 \mathbf{w}_N^H \mathbf{w}_N = \sigma_x^2 \|\mathbf{w}_N\|_2^2. \end{aligned} \quad (16)$$

Из (15) и (16) следует, что

$$\begin{aligned} ERLE(k) &= 10 \log_{10} \frac{E\{d^2(k)\}}{E\{\alpha^2(k)\}} = \\ &= 10 \log_{10} \frac{\sigma_x^2 \|\mathbf{w}_N\|_2^2}{\sigma_x^2 \|\mathbf{w}_N - \mathbf{h}_N(k-1)\|_2^2} = \\ &= 10 \log_{10} \frac{\|\mathbf{w}_N\|_2^2}{\|\mathbf{w}_N - \mathbf{h}_N(k-1)\|_2^2} = -\rho(k), \text{ дБ}, \end{aligned} \quad (17)$$

что подтверждает предположение (9).

Данный результат является обоснованием того, что при моделировании задачи идентификации для оценки качества ее решения на каждом отсчете можно вычислять лишь значение $\rho(k)$, и пересчитывать его в значение $ERLE(k)$. Это позволит получать данные оценки лишь с помощью одного эксперимента, в то время как для непосредственного получения оценки $ERLE(k)$ с помощью уравнения (8) необходимо проводить статистическое моделирование.

Постольку речь идет о моделировании, в котором \mathbf{w}_{N_h} является известным вектором, то, естественно, возникает вопрос о том, а можно ли, зная этот вектор, оценить достижимые значения показателей качества идентификации расчетным путем, т.е. не проводя моделирование вообще?

Ответ на этот вопрос положителен. Действительно, при условии (6)

$$\begin{aligned} \alpha(k) &= d(k) - y(k) = \mathbf{w}_{N_w}^H \mathbf{x}_{N_w}(k) - \mathbf{h}_{N_h}^H(k-1) \mathbf{x}_{N_h}(k) = \\ &= \mathbf{w}_{N_h}^H \mathbf{x}_{N_h}(k) - \mathbf{h}_{N_h}^H(k-1) \mathbf{x}_{N_h}(k) + \mathbf{w}_{N_w-N_h}^H \mathbf{x}_{N_w-N_h}(k) = \\ &= \mathbf{w}_{N_w-N_h}^H \mathbf{x}_{N_w-N_h}(k), \end{aligned} \quad (18)$$

а при условии (13)

$$\begin{aligned} E\{\alpha^2(k)\} &= E\{|\alpha(k)|^2\} = E\{\alpha(k)\alpha(k)^*\} = \\ &= E\{\mathbf{w}_{N_w-N_h}^H \mathbf{x}_{N_w-N_h}(k) \mathbf{x}_{N_w-N_h}^H(k) \mathbf{w}_{N_w-N_h}\} = \\ &= \mathbf{w}_{N_w-N_h}^H E\{\mathbf{x}_{N_w-N_h} \mathbf{x}_{N_w-N_h}^H\} \mathbf{w}_{N_w-N_h} = \\ &= \mathbf{w}_{N_w-N_h}^H \mathbf{R}_{N_w-N_h} \mathbf{w}_{N_w-N_h} = \mathbf{w}_{N_w-N_h}^H \sigma_x^2 \mathbf{I}_{N_w-N_h} \mathbf{w}_{N_w-N_h} = \\ &= \sigma_x^2 \mathbf{w}_{N_w-N_h}^H \mathbf{w}_{N_w-N_h} = \sigma_x^2 \|\mathbf{w}_{N_w-N_h}\|_2^2. \end{aligned} \quad (19)$$

Аналогично, согласно (13), (14) и (16),

$$\begin{aligned} E\{d^2(k)\} &= E\{|d(k)|^2\} = E\{d(k)d(k)^*\} = \\ &= E\{\mathbf{w}_{N_w}^H \mathbf{x}_{N_w} \mathbf{x}_{N_w}^H \mathbf{w}_{N_w}\} = \mathbf{w}_{N_w}^H E\{\mathbf{x}_{N_w} \mathbf{x}_{N_w}^H\} \mathbf{w}_{N_w} = \\ &= \mathbf{w}_{N_w}^H \mathbf{R}_{N_w} \mathbf{w}_{N_w} = \mathbf{w}_{N_w}^H \sigma_x^2 \mathbf{I}_{N_w} \mathbf{w}_{N_w} = \sigma_x^2 \mathbf{w}_{N_w}^H \mathbf{w}_{N_w} = \sigma_x^2 \|\mathbf{w}_{N_w}\|_2^2. \end{aligned} \quad (20)$$

Тогда,

$$\begin{aligned}
 ERLE(k) &= 10 \log_{10} \frac{E[d^2(k)]}{E[\alpha^2(k)]} = \\
 &= 10 \log_{10} \frac{\sigma_x^2 \|\mathbf{w}_{N_w}\|_2^2}{\sigma_x^2 \|\mathbf{w}_{N_w - N_h}\|_2^2} = \\
 &= 10 \log_{10} \frac{\|\mathbf{w}_{N_w}\|_2^2}{\|\mathbf{w}_{N_w - N_h}\|_2^2} = -\rho(k), \text{ дБ}
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

Таким образом, при заданных \mathbf{w}_{N_h} и N_h можно оценить достигаемые значения показателей качества задачи идентификации с помощью уравнения (21). Это позволяет оценить необходимое число весовых коэффициентов адаптивного фильтра для решения данной задачи, обеспечивающее требуемое ее качество.

Разумеется, значение импульсного отклика \mathbf{w}_{N_h} на практике не известно, иначе не нужно было бы его идентифицировать. Однако, задача идентификации не решается методом проб и ошибок, т.е. подбором значений N_h . При ее решении обычно имеются некоторые априорные сведения о типичных объектах идентификации в заданных условиях функционирования. Эти сведения получают путем предварительных измерений параметров объектов идентификации, или путем их моделирования [8-11].

Заключение

Таким образом, в данной статье с помощью моделирования показано и затем математически доказано, что качество решения задачи идентификации линейных объектов можно оценивать лишь по одному показателю, именуемому рассогласованием, для чего достаточно проводить лишь один эксперимент при использовании в качестве обучающего сигнала сигнал с некоррелированными выборками. Это дает возможность не проводить статистическое моделирование, требующее большого числа экспериментов, для непосредственной оценки показателя ERLE, так как этот показатель и рассогласование обратны друг-другу в линейном масштабе

или имеют противоположные знаки в логарифмическом масштабе. Кроме того доказано, что имея репрезентативные значения импульсных откликов идентифицируемых объектов, можно оценивать при заданном числе весовых коэффициентов используемого адаптивного фильтра достижимые значения рассогласования и ERLE, или же оценивать необходимое число этих коэффициентов, при котором обеспечиваются требуемые значения рассогласования и ERLE.

Литература

1. Oppenheim A. V., Schaffer R. W. Discrete-time signals processing, Prentice-Hall, 2009, 1144 p.
2. Farhang-Boroujeny B. Adaptive filters theory and applications, 2-nd ed. John Wiley & Sons, 2013, 778 p.
3. Джиган В. И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы. М: Техносфера, 2013, 528 с.
4. Haykin S. Adaptive filter theory, 5th ed., Pearson Education Inc., 2014, 889 p.
5. Diniz P. S. R. Adaptive filtering algorithms and practical implementation, 5-th ed. Springer, 2020, 495 p.
6. Benesty J., Huang Y., Eds. Adaptive signal processing: applications to real-world problems. Springer-Verlag, 2003, 356 p.
7. Digital network echo cancellers, ITU-T Recommendation G.168. Series G: Transmission systems and media, digital systems and networks. International telephone connections and circuits – Apparatus associated with long-distance telephone circuits, Geneva, 2001, 116 p.
8. Allen J. B., Berkley D. A. Image method for efficiently simulation small-room acoustics. Journal of Acoustical Society of America, 1979, vol. 64, no 4, pp. 943-950.
9. Lehmann E. A., Johansson A. M. Diffuse reverberation model for efficient image-source simulation of room impulse responses. IEEE Trans. Audio, Speech, and Language Processing, 2010, vol. 18, no 6, pp. 1429-1439.
10. Chen W. Y. Simulation techniques and standards development for digital subscriber line systems, Macmillan Technical Publishing, 1998, 644 p.
11. Starr T., Cioffi J. M., Silverman P. J. Understanding digital subscriber line technology, Prentice Hall, 1999, 474 p.

НОВЫЕ КНИГИ

Шарамет А.В.

Информационное обеспечение систем защиты летательных аппаратов от управляющих средств поражения: Научное издание, М.: Изд-во «Горячая линия-Телеком», 2023 г. 178 с.: ил.

Рассмотрены вопросы повышения информативности бортового комплекса обороны летательного аппарата для увеличения эффективности его защиты от управляемого ракетного оружия за счет согласованного помехового, маневренного и огневого противодействия. Изложены и систематизированы основные проблемы по защите летательного аппарата от управляемых средств поражения, а также рассмотрены основные пути повышения эффективности его защиты от них. Даны оценочные расчеты отражательных свойств головок самонаведения управляемых ракет класса «воздух-воздух» и «земля-воздух», как объектов радиолокационного наблюдения. Представлено описание и проведен анализ результатов полунатурного экспериментального исследования. На основе векторно-алгебраического подхода к формализации задач определения координат объектов в многопозиционной измерительной системе проведен синтез алгоритма оценки декартовых координат атакующей ракеты по суммарно-дальномерной информации.

Для специалистов, занимающихся вопросами защиты летательных аппаратов, научных работников и инженеров. Может быть полезна аспирантам и студентам вузов.

Для специалистов, занимающихся вопросами защиты летательных аппаратов, научных работников и инженеров. Может быть полезна аспирантам и студентам вузов.

