

УДК 621.391.24

Теоретическое и экспериментальное исследование алгоритма идентификации летательных аппаратов на основе метода *E*-импульса

Ю.В. Кузнецов, А.Б. Баев

Представлен алгоритм идентификации летательных аппаратов (ЛА) различных типов, основанный на методе *E*-импульса; показано, что метод является достаточно эффективным способом обработки сигналов сверхширокополосного радиолокатора, практически не зависит от изменения ракурса цели и позволяет успешно проводить идентификацию ЛА в сложной помеховой обстановке вплоть до отношения сигнал-шум порядка 5 дБ; проведено исследование характеристического показателя метода, позволяющего оценить качество идентификации радиолокационных объектов; даны результаты экспериментальных исследований сигналов, рассеянных различными объектами.

Aspect independent radar target discrimination method, using the natural frequencies of arbitrary shaped objects, is introduced. The approach is based on the extinction-pulse (*E*-pulse) technique and, as the numerical simulation shows, it is relatively insensitive to the random noise and to the estimations of modal contents. This method allows to discriminate superwide-band radar targets down to the signal-to-noise ratio approximately 5 dB. The results of experimental research of the signals scattered by aircraft are presented.

Введение

Из литературы известно [1,2], что импульсная характеристика объекта, подвергаемого воздействию электромагнитного излучения, содержит всю информацию о свойствах его рассеивания в полосе частот, которая определяется спектром возбуждающего импульса. Таким образом, реакция объектов на сверхширокополосное возбуждающее излучение может использоваться в качестве исходных данных для их идентификации.

Согласно принципу сингулярного разложения, разработанному Баумом, электромагнитное поле цели можно разложить по ее собственным комплексным резонансам [1]. Ввиду своей независимости от ракурса цели, резонансные частоты объектов могут быть использованы как характеристики для распознавания и идентификации радиолокационных объектов. Резонансная модель, основанная на методе сингулярных разложений, содержит в себе параметры двух типов: зависящие от возбуждающих сигналов (поляризации, формы, направления облучения) и не зависящие от них (собственные комплексные резонансные частоты рассеяния). Использование параметров первого типа позволяет решать задачи определения ракурса цели, селекции геометрически подобных целей. Параметрами второго типа являются комплексно-сопряженные полюса, расположение которых определяется в основном геометрическими размерами и формой объектов и практически не зависит от ракурса. Для распознавания целей в условиях недостаточной априорной информации об их геометрической форме и материале могут быть использованы данные о резонансных частотах рассеяния отдельных элементов конструкции и оборудования.

Методы цифровой обработки, применяемые при решении поставленной задачи, делятся на параметрические и непараметрические. К параметрическим относят методы, основанные на определении конечного числа параметров, характеризующих объект. Наиболее широкое распространение получили метод Прони, осуществляющий аппроксимацию данных с использованием детерминированной экспоненциальной модели, метод расщепления функции, основанный на анализе собственных значений матрицы данных, MUSIC метод и другие. Традиционные параметрические методы достаточно подробно изучены, основные результаты опубликованы в [2]. В то же время в литературе широко обсуждаются и представляют интерес непараметрические методы идентификации, к которым относятся метод *E*-импульса, метод преобразования Фурье и многие другие.

Ц е л ь р а б о т ы – рассмотреть различные аспекты применения непараметрического метода идентификации радиолокационных объектов – метода *E*-импульса («extinction-pulse» – гасящий импульс) [3]. Принцип действия этого метода заключается в формировании дискриминационного сигнала специального вида (*E*-импульса) конечной длительности, при котором минимизируется его свертка с от-

кликот от ожидаемой цели. Метод E -импульса представляет собой взвешенную сумму взаимно-ортогональных функций. Результат свертки E -импульса, подобранного особым образом к отклику цели, в поздневременной период стремится к нулю. Под поздневременным периодом понимается время, начиная с момента окончания E -импульса. Если провести операцию свертки этого же E -импульса с сигналом, приходящим от другой цели, то результат свертки будет отличаться от предыдущего ненулевым значением в поздневременной период.

1. Теоретические основы метода E -импульса

Появившийся в последнее время интерес к резонансным частотам для различения радиолокационных целей способствовал выработке ряда новых способов идентификация объектов. Поскольку резонансные частоты наблюдаемых проводящих радиолокационных целей практически не зависят от ракурса наблюдения, они могут использоваться как характеристики целей для их идентификации и различения [1].

Метод E -импульса [3–5] основан на так называемых “kill”-импульсах, описанных в [3], а также на некоторых особенностях метода Прони и метода расщепления функции.

Как известно, измеренная поздневременная реакция проводящей радиолокационной цели $x[n]$ может быть представлена в виде суммы резонансных колебаний [2]:

$$x[n] = \sum_{i=1}^P b_i z_i^n, \quad (1)$$

где $z_i = \exp(\sigma_i + i\omega_i)T_d$, $i = 1, 2, \dots, P$, – резонансные полюса цели на z -плоскости; P – число доминирующих резонансов; σ_i , ω_i – коэффициент затухания и резонансная частота i -й компоненты сигнала; b_i – комплексные вычеты, зависящие от ракурса цели; T_d – период дискретизации сигнала. Полюса z_i существуют комплексно-сопряженными парами, поскольку поле $x[n]$ – действительное.

Суть метода E -импульса [4] заключается в следующем. Определенным образом к отклику цели подбирается дискриминационный сигнал конечной длительности, который в общем случае можно записать как:

$$e[n] = \sum_{j=0}^N e_j \cdot g_j[n], \quad (2)$$

где $g_j[n]$, $j = 0, \dots, M$, – система ортогональных функций, для которой выполняется условие

$$\sum_{n=0}^{\infty} g_i[n] g_k[n] = \begin{cases} 0, & j \neq k \\ \|g_i^2[n]\|, & j = k \end{cases}$$

В качестве самой простой системы ортогональных функций можно выбрать совокупность δ -импульсов, следующих через Δ тактов интервалов дискретизации T_d :

$$g_j[n] = \delta[n - i\Delta], \quad (3)$$

где $\delta[n]$ – дельта-функция Кронекера; интервал Δ выбирается исходя из условия $\Delta = \{r\pi / \omega_{\max} T_d\}$; $\{\bullet\}$ – операция округления в сторону ближайшего целого числа; ω_{\max} – самая высокая резонансная частота в отклике цели $x[n]$, $r = 1, 2, 3, \dots$

Количество ортогональных функций (элементарных импульсов) M в составе E -импульса выбирается исходя из минимальной резонансной частоты ω_{\min} в спектре сигнала $x[n]$:

$$M = \left\{ \frac{r\pi}{\omega_{\min} T_d} \right\}. \quad (4)$$

Структура E -импульса представлена на рис. 1.

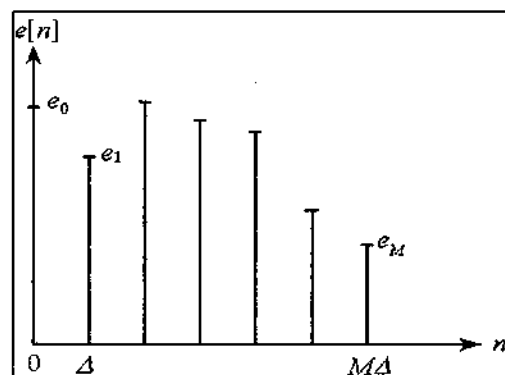


Рис. 1

Коэффициенты E -импульса подбираются так, чтобы свертка отклика цели с подобранным к нему E -импульсом в поздневременной период тождественно равнялась нулю, т.е. исходя из следующего условия:

$$c[n] = e[n] * x[n] = \sum_{i=1}^P b_i z_i^n \sum_{j=0}^M e_j \sum_{m=0}^{M\Delta} z_i^{-m} \delta[m - i\Delta] = 0, \quad n \geq M\Delta, \quad (5)$$

где звездочкой обозначена операция свертки. Если провести операцию свертки этого же E -импульса с откликом от другой цели, то результат свертки в поздневременной период будет достаточно сильно отличаться от нулевого значения.

Структура E -импульса (2) – линейная и однозначно определяемая параметрами e_j . Структура схемы обработки сигнала $x[n]$ по алгоритму E -импульса показана на рис. 2.

На основании этой схемы можно записать уравнение

$$\mathbf{X}\mathbf{e} = -e_M \mathbf{x}, \quad (6)$$

где

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x[0] & x[\Delta] & \dots & x[\Delta(M-1)] \\ x[1] & x[\Delta+1] & \dots & x[\Delta M] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x[M] & x[\Delta+M] & \dots & x[\Delta(2M-2)] \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{x} = (x[M\Delta] \quad x[M\Delta+1] \quad \dots \quad x[(2M-1)\Delta])^T;$$

$$\mathbf{e} = (e_0 \quad e_1 \quad \dots \quad e_{M-1})^T, \quad e_M = 1,$$

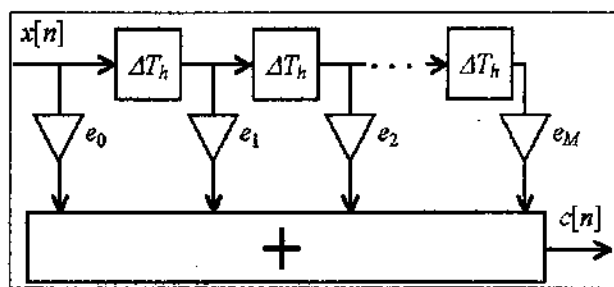


Рис. 2

позволяющее получить вектор коэффициентов амплитуд ортогональных функций E -импульса e_j .

Применяя z -преобразование к (5), получаем

$$\tilde{C}(z) = \tilde{E}(z) \cdot \tilde{X}(z). \quad (7)$$

Исходя из выбранной резонансной модели, z -преобразование сигнала $x[n]$ можно записать как $\tilde{X}(z) = \tilde{P}(z)/\tilde{Q}(z)$, причем корни полинома знаменателя $\tilde{Q}(z)$ являются полюсами модели сигнала. Полином $\tilde{E}(z)$ имеет M корней, совпадающих с полюсами сигнала $x[n]$, из общего количества $M\Delta$ полюсов, т.е. нули E -импульса совпадают с полюсами модели сигнала. При этом изменение ракурса летательным аппаратом будет влиять только на полином числителя $\tilde{P}(z)$ и никак не скажется на результате обнуления свертки при $n > M\Delta$.

2. Характеристический показатель метода E -импульса

С целью количественной оценки мощности поздневременной части свертки E -импульса с откликом от ЛА нами был введен характеристический показатель ψ метода E -импульса:

$$\psi = \sum_{n=M\Delta}^{\infty} c^2[n] / \sum_{n=0}^{M\Delta} e^2[n]. \quad (8)$$

Как видно, параметр ψ представляет собой отношение энергии поздневременной части свертки к энергии E -импульса. Очевидно, что для E -импульса, выбранного к отклику цели и по которому в итоге классифицируют цель, данный параметр должен быть минимальным.

При идентификации радиолокационных объектов представляется целесообразным нормировать значение параметра, полученное в реальной обстановке, к значению ψ_{\min} для случая свертки с откликом от летательного аппарата без шума:

$$\Theta = 10 \lg \left(\frac{\psi}{\psi_{\min}} \right) \text{ [дБ]} \quad (9)$$

Таким образом, полученные значения параметра ψ для свертки исследуемого сигнала с E -импульсами, хранящимися в базе данных, нормируются к минимальным значениям ψ_{\min} для каждого E -импульса, также хранящимся в базе данных. При этом получается, что чем меньше полученное значение параметра ψ , тем характеристический показатель метода ближе к нулю и тем выше вероятность правильной идентификации летательного объекта.

3. Синтез модели исследуемого сигнала

Для проведения исследования алгоритма идентификации ЛА на основе метода E -импульса необходимо представить полезный сигнал и шум в виде некоторой математической модели. Используя резонансную модель, наиболее адекватно описывающую собственное электромагнитное излучение [2], проведем синтез поздней части отклика проводящего радиолокационного объекта на возбуждающее широкополосное воздействие.

В качестве исследуемых объектов будем рассматривать масштабные макеты двух ЛА: Boeing 707 (B-707) и McDonnell Douglas F-18 размерами 33 и 38,5 см [5].

В соответствии с выбранной резонансной моделью исследуемый сигнал можно записать в следующем виде:

$$y[n] = x[n] + v[n] = \sum_{i=1}^5 A_i \exp(\alpha_i n T_d) \cos(2\pi f_i n T_d + \theta_i) + v[n], \quad (10)$$

где A_m – амплитуда; α_m – коэффициент затухания; f_m – частота и θ_m – начальная фаза m -й компоненты сигнала; $v[n]$ – аддитивный гауссовский шум.

Модель аддитивного шума должна соответствовать условиям реального эксперимента, поэтому положим, что «белый» гауссовский шум с бесконечной полосой подвергается ограничению по частоте. Модели откликов макетов исследуемых летательных аппаратов во временной области представлены на рис. 3 и 4.

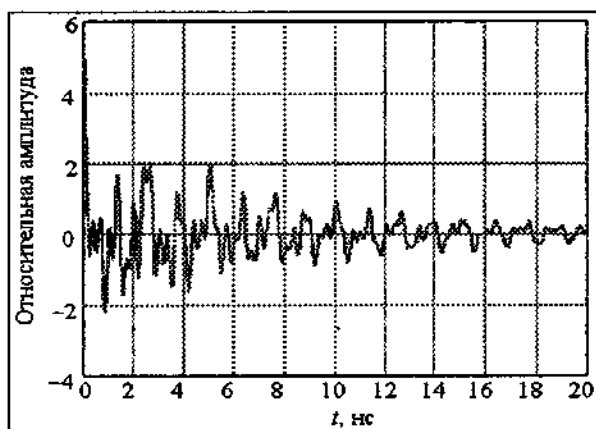


Рис. 3

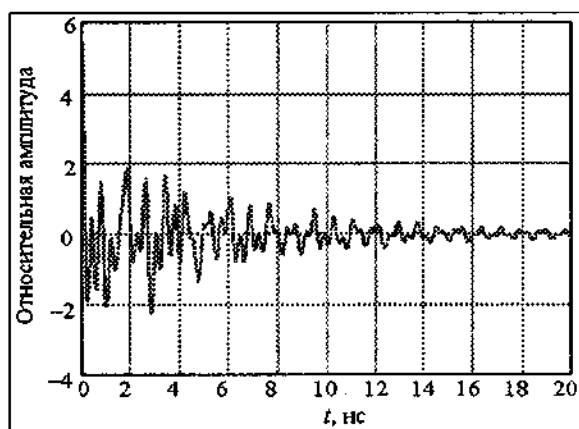


Рис. 4

Уровень шума зададим величиной дисперсии, при этом отношение сигнал-шум для нашей модели сигнала будем оценивать по формуле:

$$q^2 = \frac{1}{\sigma_v^2} \sum_{n=0}^{N-1} x^2[n], \quad (11)$$

где σ_v^2 – дисперсия шума; N – число отсчетов сигнала.

На рис. 5 и 6 представлены спектральные плотности мощности сигналов от макетов ЛА В-707 и F-18 соответственно.

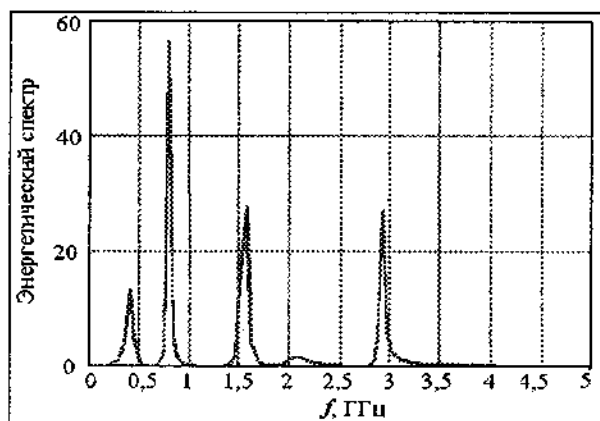


Рис. 5

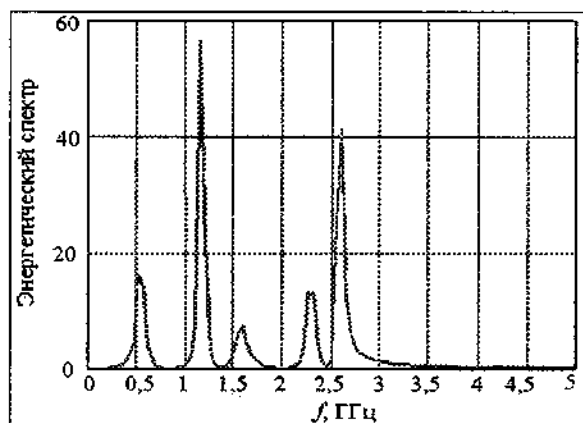


Рис. 6

Из рис. 5 и 6 видно, что сигналы от ЛА обладают ярко выраженными резонансными частотами, которые определяются геометрией объектов и могут служить основой для их идентификации.

4. Результаты численного моделирования

На основании алгоритма, описанного в разделе 1, был произведен синтез дискриминационных сигналов (E -импульсов). Необходимо заметить, что форма базисной ортогональной функции была выбрана в виде прямоугольного импульса. Основываясь на моделях откликов макетов ЛА, были получены E -импульсы для моделей В-707 и F-18, представленные на рис. 7 и 8 соответственно, которые отличаются от приводимых в литературе.

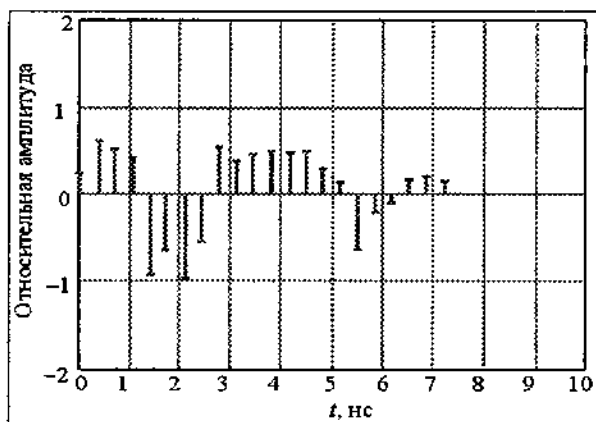


Рис. 7

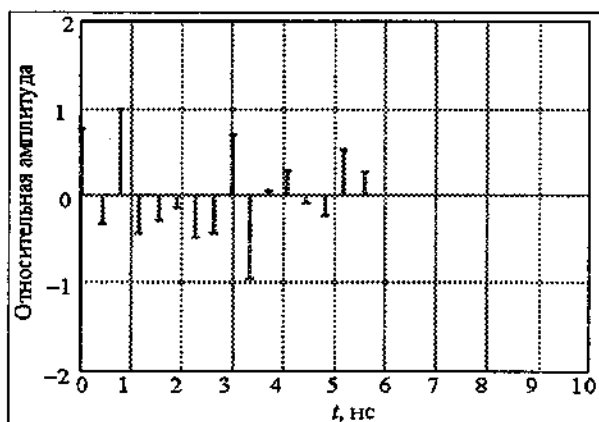


Рис. 8

В соответствии с алгоритмом метода E -импульса, процесс идентификации основан на оценке поздневременной части свертки отклика цели с E -импульсом. Если свертка отклика одного из ЛА с E -импульсом стремится к нулю для $n > \Delta M$, то можно сказать, что данный отклик соответствует тому объекту, для которого был подобран данный E -импульс. В случае, когда свертка с E -импульсом в поздневременной период значительно отличается от нулевого значения, это означает, что этот E -импульс не согласован с откликом от цели и необходимо продолжать дискриминационный процесс.

Для иллюстрации изложенных выше положений теории метода E -импульса найдем свертку отклика от макетов В-707 и F-18 (см. рис. 3, 4) с E -импульсом, подобранным для модели сигнала В-707 (рис. 7). Полученные результаты представлены на рис. 9 и 10 соответственно.

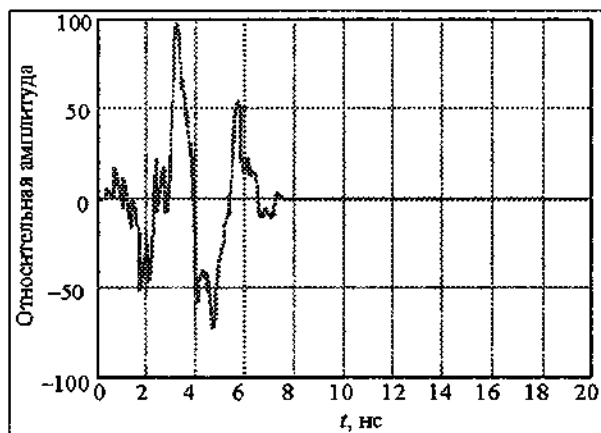


Рис. 9

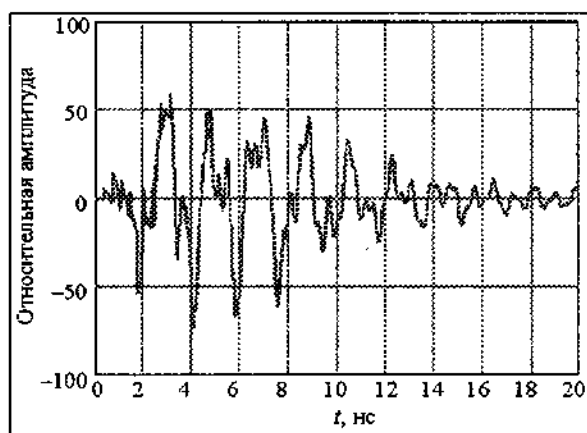


Рис. 10

Таким образом, можно сделать вывод о том, что с помощью оценки мощности поздневременной части свертки, являющейся основой представленного алгоритма, можно достаточно легко отличать отклики от различных объектов, что позволяет эффективно проводить их идентификацию.

Далее исследовалась эффективность работы метода E -импульса при изменении ракурса цели и при изменении отношения сигнал-шум. Моделирование изменения ракурса цели в рамках выбранной резонансной модели заключалось в изменении начальных фаз и амплитуд компонент сигнала. Свертка E -импульса, подобранного к отклику от В-707, с моделью сигнала от В-707 с измененными начальными фазами и амплитудами составляющих сигнала, представлена на рис. 11. Как видно из рисунка, изменение ракурса цели практически не сказалось на качестве свертки в поздневременной период, что подтверждает независимость алгоритма идентификации объектов на основе метода E -импульса от ракурса цели.

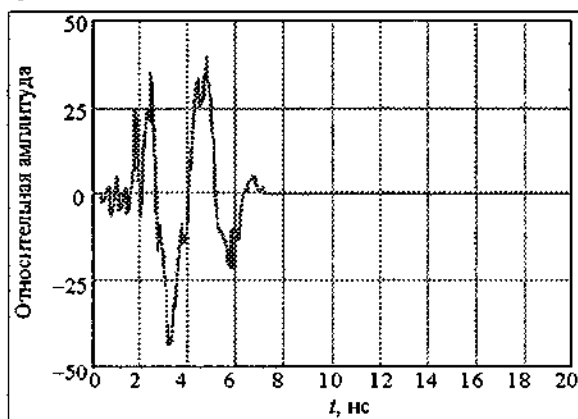


Рис. 11

При добавлении в модель исследуемого сигнала гауссовского шума, ограниченного по полосе, происходит ухудшение вида свертки (она становится отличной от нулевой). Свертка отклика от макета В-707 с E -импульсом, подобранном ранее к модели В-707, при отношении сигнал-шум $q^2 = 30$ дБ представлена на рис. 12.

Из приведенных рисунков видно, что при работе с откликом ЛА при $q^2 = 30$ дБ E -импульс, подобранный ранее к этому сигналу без шума, достаточно эффективно обнуляет поздневременные части свертки (рис. 12).

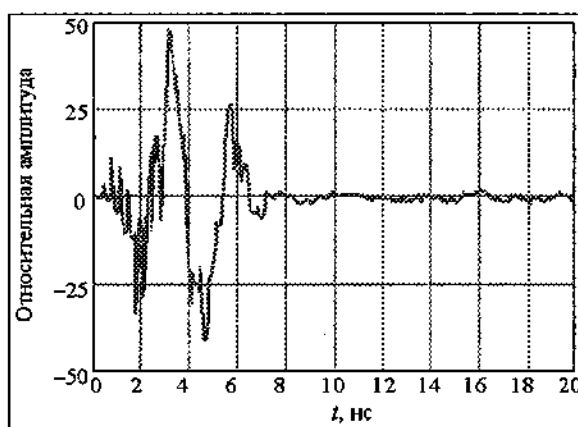


Рис. 12

Для получения наиболее полной картины влияния гауссовского шума на работоспособность метода E -импульса была снята зависимость характеристического показателя метода от отношения сигнал-шум для свертки E -импульса, подобранного для отклика от макета самолета В-707, с моделями откликов от макетов В-707 и F-18. Полученные зависимости параметра Θ от отношения сигнал-шум представлены на рис. 13, где 1 – свертка E -импульса с исходной моделью сигнала; 2 – свертка E -импульса с моделью при смене ракурса объектом; 3 – свертка E -импульса с моделью отклика от другого объекта

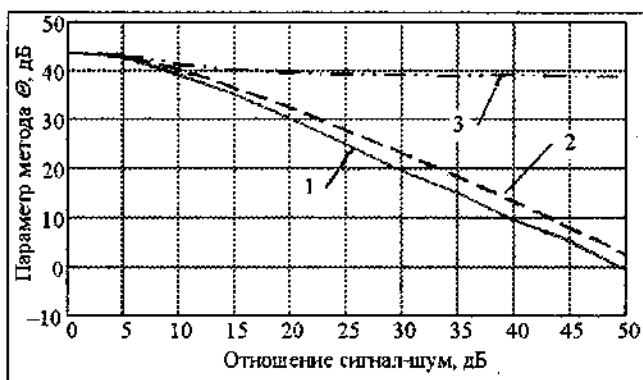


Рис. 13

Как видно из рис. 13, первые две зависимости практически неотличимы друг от друга, из чего можно сделать вывод, что метод E -импульса нечувствителен к изменению ракурса объектом. Нужно заметить, что значение дискриминационного параметра, соответствующее стопроцентной вероятности правильной идентификации объектов, равняется нулю. Это соответствует идеальному случаю, при котором влияние шума на исследуемые модели сигналов незначительно и отношение сигнал-шум составляет порядка 50 дБ. Уменьшение же отношения сигнал-шум приводит к увеличению Θ и соответственно к уменьшению вероятности правильной идентификации.

Для третьей зависимости характерно то, что Θ принимает максимальное значение и практически не изменяется в зависимости от отношения сигнал-шум.

Основываясь на перечисленных фактах, можно сказать, что используемый параметр Θ является достаточно информативным и позволяет эффективно проводить процесс идентификации ЛА.

Исходя из графиков, можно сделать вывод, что, задав разность между значением Θ , соответствующим невозможности идентификации (порядка 40...43 дБ), и некоторым значением Θ , соответствующим требуемой вероятности правильной идентификации, можно определить пороговое отношение сигнал-шум в приходящем сигнале для требуемой вероятности. Если принять подобную разность дискриминационных параметров равной 10 дБ, то пороговое отношение сигнал-шум составит примерно 20 дБ. Данный вопрос представляется достаточно интересным и может являться основой для проведения дальнейших исследований.

5. Идентификация летательного аппарата на фоне интенсивных отражений от местных предметов

Экспериментальное подтверждение работоспособности алгоритма идентификации ЛА на основе метода E -импульса проводилось на базе обработки сигналов активного сверхширокополосного радиолокатора при распознавании легкомоторного самолета на фоне интенсивных отражений от местных предметов. Зондирующий импульс такого радиолокатора имеет длительность порядка 8 нс (рис. 14), а ширина его спектра порядка 200 МГц.

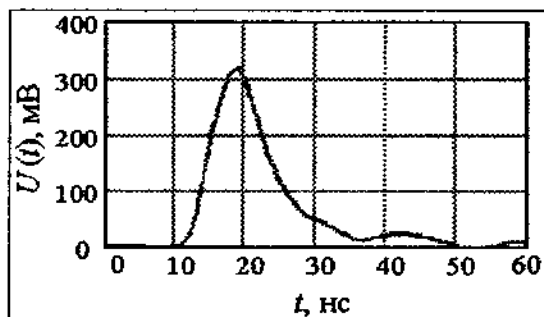


Рис. 14

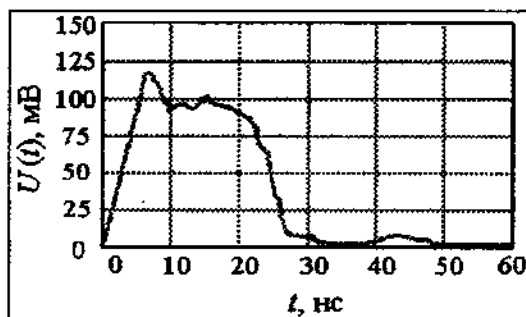


Рис. 15

Отклик самолета на зондирующий импульс показан на рис. 15. Диаграмма нулей и полюсов на z -плоскости для этого отклика, изображенная на рис. 16, говорит о том, что полюса, соответствующие распознаваемой цели, имеют достаточно малую добротность и число значимых резонансных частот мало. Крестиками на диаграмме отмечены полюса резонансной модели. На рис. 17 показан отклик от ложной цели, который похож на отклик от истинной цели.

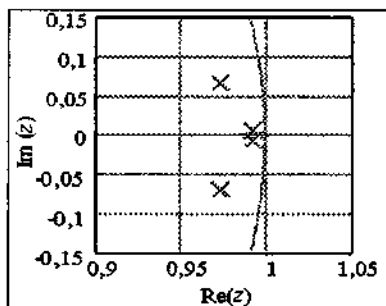


Рис. 16

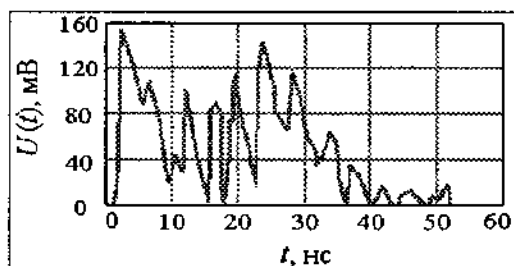


Рис. 17

Далее был сформирован дискриминационный сигнал (*E*-импульс) и произведена его свертка с откликами от самолета при различных ракурсах, а также с отражениями от местных предметов. Было выявлено, что независимо от ракурса свертка с откликами от самолета в поздневременной отрезок времени стремится к нулевому значению (рис. 18). При этом значения характеристического показателя метода не превышали $\Theta = 5$ дБ. В случае же свертки с откликами от местных предметов свертка не обнулялась, и параметр $\Theta = 30 \dots 40$ дБ (рис. 19).

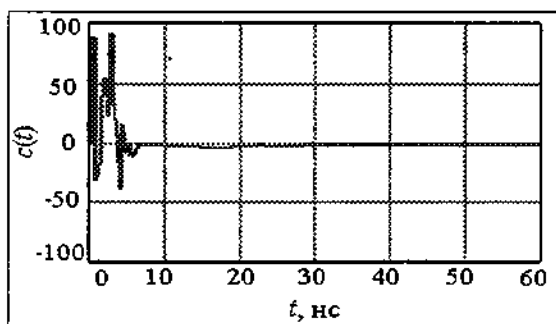


Рис. 18

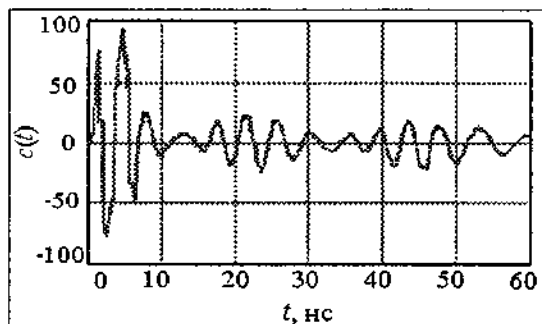


Рис. 19

Таким образом, экспериментально была подтверждена практическая независимость метода *E*-импульса от ракурса идентифицируемого объекта и его работоспособность при обработке сигналов сверхширокополосного радиолокатора.

6. Структурная схема устройства идентификации летательных аппаратов

В соответствии с предложенным алгоритмом на основе метода *E*-импульса разработана структурная схема устройства идентификации ЛА, представленная на рис. 20.

Принцип действия устройства идентификации следующий. В банке данных устройства управления хранятся *E*-импульсы для всех известных ЛА. Исследуемый сигнал подается на параллельный вычислитель, число каналов которого определяется числом хранимых *E*-импульсов *K*. В каждом канале производится свертка исследуемого сигнала с *E*-импульсом, вычисляется энергия поздневременного участка и нормируется к энергии самого E_i

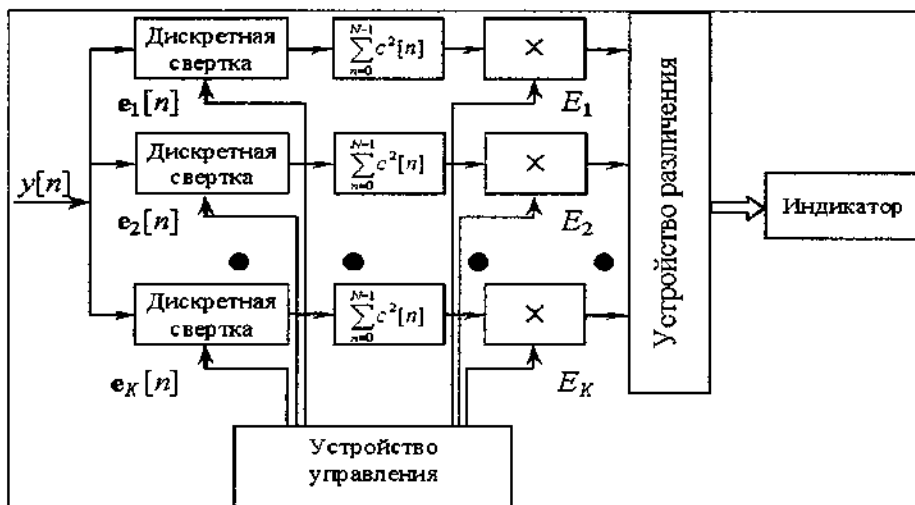


Рис. 20

E -импульса, $i = 0, 1, \dots, K$. Далее сигналы со всех каналов подаются на устройство различения, где принимается решение о наличии или отсутствии идентифицируемого объекта, а по номеру канала определяется тип летательного аппарата.

- Представленная работа посвящена вопросам идентификации летательных аппаратов с помощью алгоритма на основе метода E -импульса. Для решения поставленной задачи идентификации объектов по их собственным электромагнитным излучениям было рассмотрено представление излучаемых ими сигналов в виде некоторой математической модели. Используя резонансную модель, наиболее адекватно описывающую собственное электромагнитное излучение, был проведен синтез позднейшей части отклика проводящего радиолокационного объекта на возбуждающее воздействие. Основными параметрами резонансной модели являются комплексно сопряженные полюса, расположение которых зависит в основном от геометрии и формы объектов и практически не зависит от ракурса цели.

Компьютерное моделирование позднейшей частей откликов макетов летательных аппаратов Boeing 707 (B-707) и McDonnell Douglas F-18 основывалось на известных наборах полюсов на комплексной плоскости. К полученным компьютерным моделям откликов макетов ЛА были найдены дискриминационные сигналы – E -импульсы.

Были подобраны E -импульсы к дальностному портрету легкомоторного самолета, обнаруживаемого на фоне местных предметов, и экспериментально подтверждена практическая независимость метода E -импульса от ракурса идентифицируемого объекта, а также предложена структурная схема идентификации объектов на основе использования метода E -импульса.

Исследования алгоритма идентификации на основе метода E -импульса заключались в изучении эффективности его работы при изменении ракурса цели и изменении отношения сигнал-шум. Также исследовался характеристический параметр, определяющий качество идентификации.

По результатам проведенных экспериментов можно сказать, что исследуемый метод E -импульса является достаточно эффективным способом идентификации объектов по их собственным электромагнитным излучениям. Он практически не зависит от изменения ракурса цели, позволяет успешно проводить идентификацию в сложной помеховой обстановке вплоть до отношения сигнал-шум порядка 5 дБ. Рассматриваемый характеристический параметр – достаточно информативный, предоставляющий возможность эффективно проводить идентификацию объектов.

Литература

1. Баум К.Э. Новые методы нестационарного (широкополосного) анализа и синтеза антенн и рассеивателей. – ТИИЭР, 1976, т. 64, № 11.
2. Кузнецов Ю.В., Щекатуров В.Ю., Баев А.Б. Сравнительная характеристика алгоритмов оценки параметров резонансной модели объектов. – Вестник МАИ, 1997, т. 4, № 2.
3. Fok Fredric Y. S. K-pulse Estimation for Right-angled Bend Wire Using More Than One Impulse Response. – IEEE. Trans. Antennas Propagat, 1990, v. 38, № 7.
4. Rothwell E.J., Nyquist D. P., Chen K. M., and Drachman B. Radar Target Discrimination Using the Extinction-pulse Technique. – IEEE Trans. Antennas Propagat, 1985, v. 33, № 9.
5. Rothwell E. J., Chen K. M., Nyquist D. P., Sun W. New Progress on E/S Pulse Techniques for Noncooperative Target Recognition. – IEEE. Trans. Antennas Propagat, 1992, v. 40, № 7.

Поступила 20 декабря 2000 г.