

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА Е-ИМПУЛЬСА ДЛЯ РАЗЛИЧЕНИЯ СИГНАЛОВ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

Баев А.Б., Клюев С.Ю., Кузнецов Ю.В.

Московский государственный авиационный институт (технический университет)
125871, Москва, Волоколамское шоссе, 4
Тел.: (095) 158-68-39, Fax: (095) 158-16-97
E-mail: mai_k405@mtu-net.ru

Реферат. В работе представлен алгоритм идентификации радиолокационных объектов, основанный на методе Е-импульса. Выявлено, что метод является достаточно эффективным способом различения радиолокационных объектов, практически не зависит от изменения ракурса целью, позволяет успешно проводить идентификацию в сложной помеховой обстановке вплоть до отношения сигнал/шум порядка 5 дБ. Также в работе исследуется дискриминационный параметр, характеризующий качество идентификации радиолокационных целей.

1. 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 [2]. 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 независящие 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, используемые при решении поставленной задачи, делятся на параметрические и непараметрические. К параметрическим методам 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 и др. Традиционные параметрические методы достаточно подробно изучены и обладают общим недостатком – недостаточной точностью определения параметров, характеризующих объект, при малых отношениях сигнал/шум. В то же время в литературе широко обсуждаются и представляют интерес непараметрические методы идентификации, к которым относятся метод Е-импульса, метод преобразования Фурье и др.

В данной работе исследуются возможности и эффективность работы непараметрического метода идентификации объектов – метода Е-импульса (extinction-pulse – гасящий импульс). Принцип работы этого метода заключается в формировании дискриминационного сигнала специального вида (Е-импульса) конечной длительности, при использовании которого минимизируется его свертка с откликом от ожидаемой цели. Это означает, что результат свертки Е-импульса, подобранного особым образом к отклику от одной из целей, в поздневременной период стремиться к нулю. Если провести операцию свертки этого же Е-импульса с сигналом, приходящим от другой цели, то результат свертки будет отличаться от предыдущего ненулевым значением в поздневременной период.

2. Метод Е-импульса

Известно, что измеренная поздневременная реакция проводящей радиолокационной цели $y(t)$ может быть представлена в виде суммы затухающих гармонических колебаний, характеризующихся расположением полюсов на комплексной плоскости [3]:

$$y(t) = \sum_{i=1}^M b_i e^{p_i t}, \quad 0 \leq t \leq T_y, \quad (1)$$

где $p_i = \sigma_i + j\omega_i$, $i = 1, 2, \dots, M$ – резонансные полюса цели; σ_i – коэффициент затухания i -й компоненты; ω_i – резонансная частота; b_i – комплексные вычеты; T_y – длительность поздневременной реакции. Следует заметить, что полюса p_i существуют комплексно-сопряженными парами, поскольку поле $y(t)$ – действительное.

Концепция метода Е-импульса [4] заключается в том, что определенным образом к отклику радиолокационной цели $y(t)$ подбирается дискриминационный сигнал конечной длительности – Е-импульс, который в общем случае можно записать как

$$e(t) = \sum_{n=0}^N e_n h(t - nT_h) = \sum_{n=0}^N e_n \delta(t - nT_h) * h(t), \quad h(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq T_h \\ 0, & t < 0, t > T_h \end{cases} \quad (2)$$

где «*» обозначает операцию свертки; $\delta(t)$ – дельта-функция; e_n , $n = 0, \dots, N$ – амплитуды элементарных импульсов в составе Е-импульса; T_h – длительность элементарного импульса; N – количество элементарных импульсов.

Если провести операцию свертки отклика цели с подобранным к нему Е-импульсом, то результат свертки в поздневременной период должен стремиться к нулю, то есть должно выполняться следующее условие:

$$c(t) = e(t) * y(t) = 0, \quad T_e \leq t \leq T_y, \quad (3)$$

где T_e – длительность Е-импульса. Если провести операцию свертки этого же Е-импульса с откликом от другой цели, то результат свертки будет достаточно сильно отличаться от нулевого значения.

Подставив выражения (1) и (2) в (3) и решив полученное уравнение относительно коэффициентов e_n , можно получить требуемые значения амплитуд элементарных импульсов. Длительность элементарного импульса T_h рекомендуется выбирать кратной периоду самой высокой резонансной частоты в отклике цели: $T_h = r\pi / \omega_{max}$, $r = 1, 2, 3, \dots$, а длительность всего Е-импульса выбирается пропорциональной периоду низкочастотной составляющей спектра отклика.

В реальной обстановке при идентификации большого количества целей требуется проведение множества вычислений. Поэтому визуальный способ идентификации по внешнему виду свертки в поздневременной период является непригодным. Представляется необходимым введение некоторого численного параметра, адекватно описывающего качество представленной свертки.

Таким параметром является дискриминационное отношение Е-импульса Ψ , которое можно записать как

$$\Psi = \frac{\int_{T_e}^{T_y} c(t)^2 dt}{\int_0^{T_e} e(t)^2 dt}. \quad (4)$$

Параметр Ψ представляет собой отношение энергии нормированной поздневременной части свертки к энергии нормированного Е-импульса. Очевидно, что для Е-импульса, выбранного к отклику цели, и по которому в итоге классифицируют цель, данный параметр должен быть минимальным.

При использовании данного параметра для идентификации сигналов необходимо вычислить его минимальное значение, соответствующее наилучшему качеству свертки. Используя априорную информацию о полюсах поздневременной части отклика цели, можно смоделировать подобный отклик без шумовых составляющих и по вышеописанной методике подобрать к нему Е-импульс. В этом случае

значение свертки в поздневременной период будет стремиться к нулю, а, следовательно, значение параметра Ψ будет минимальным. Подобную процедуру необходимо провести для всех откликов целей, которые нужно классифицировать, а полученные Е-импульсы и значения параметра Ψ_{min} сохранить в базе данных.

В действительности шумы и неточности в определении собственных резонансных частот, используемых для построения Е-импульса, препятствуют получению нулевого значения свертки в поздневременной период при классификации целей, когда идет подбор Е-импульса из базы данных к исследуемому сигналу. В этом случае, для оценки различий в значении параметра Ψ целесообразнее использовать дискриминационное число Θ .

$$I = 10 \lg \left(\frac{\Psi}{\Psi_{min}} \right), \text{ dB.} \quad (5)$$

Из формулы видно, что чем меньше полученное значение параметра Ψ , тем меньше Θ и тем выше вероятность правильной идентификации объекта.

3. Результаты численного моделирования

В качестве моделей исследуемых сигналов будем использовать поздневременную часть откликов масштабных макетов двух летательных аппаратов: Boeing 707 (B-707) и McDonnell Douglas F-18 размерами 33 и 38,5 см соответственно, полученные Мичиганским Государственным Университетом [5]. Эти модели представляют собой аддитивную смесь пяти затухающих синусоид, частоты и коэффициенты затухания которых определяются геометрией макетов, и гауссовского шума, ограниченного по частоте. Уровень шума будем задавать величиной дисперсии. Отношение сигнал/шум при этом будем оценивать по формуле:

$$\text{SNR} = 10 \cdot \lg \frac{M\{y^2(t)\}}{M\{n^2(t)\}}, \quad (6)$$

где $M\{\bullet\}$ – математическое ожидание, $y(t)$ – реализация сигнала, $n(t)$ – реализация шума. Модели откликов макетов во временной области при отношении сигнал/шум $\text{SNR} = 20$ дБ показаны на рис. 1, 2.

С учетом рекомендаций, которые даны в разделе 2, был произведен синтез дискриминационных сигналов для моделей сигналов откликов масштабных макетов летательных аппаратов. Полученные Е-импульсы для моделей откликов макетов B-707 и F-18 представлены на рис. 3, 4. Следует отметить, что они отличаются от Е-импульсов, приведенных в [5].

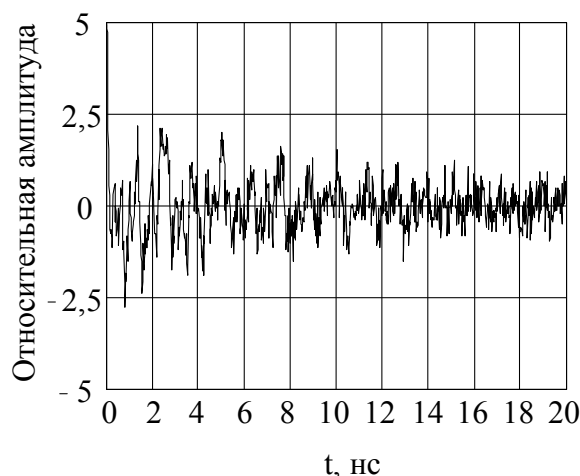


Рис. 1. Модель сигнала B-707 при отношении сигнал/шум $\text{SNR} = 20$ дБ

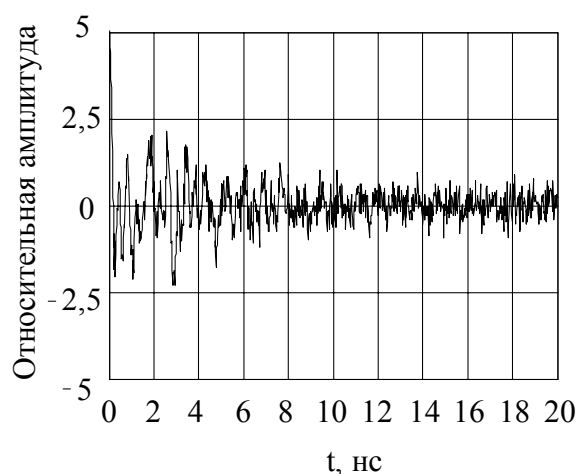


Рис. 2. Модель сигнала F-18 при отношении сигнал/шум $\text{SNR} = 20$ дБ

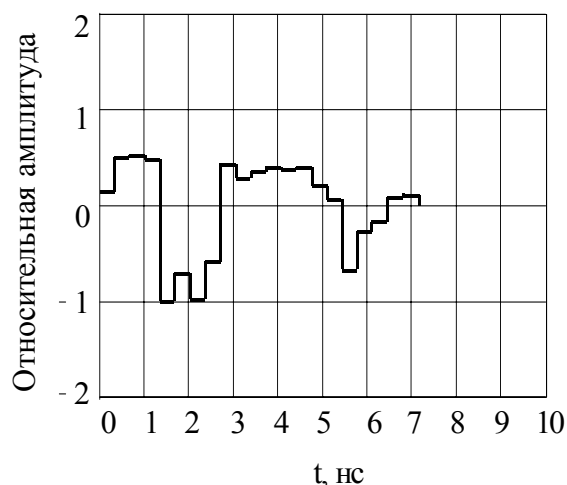


Рис. 3. Е-импульс, подобранный для модели сигнала В-707

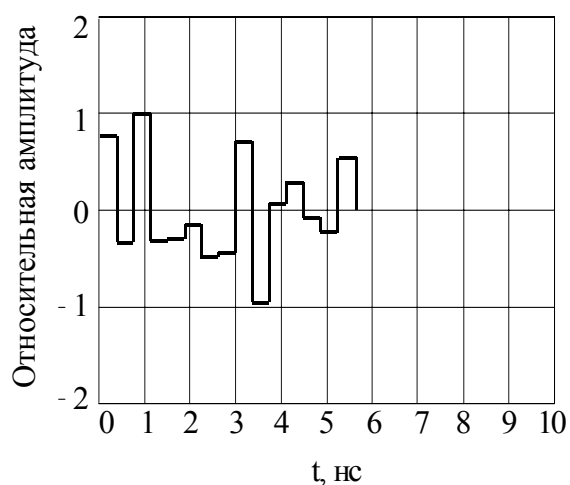


Рис. 4. Е-импульс, подобранный для модели сигнала F-18

В соответствии с алгоритмом метода Е-импульса, процесс идентификации радиолокационных объектов основан на оценке поздневременной части свертки отклика цели с Е-импульсом в интервале времени $T_e \leq t \leq T_y$. Если свертка отклика с одним из Е-импульсов на этом интервале стремится к нулевому значению, то можно сказать, что данный отклик соответствует тому объекту, для которого был подобран этот Е-импульс. В том случае, когда свертка отклика цели с Е-импульсом в поздневременной период значительно отличается от нулевого значения, необходимо продолжать дискриминационный процесс.

Для иллюстрации вышеизложенных положений теории метода Е-импульса найдем свертку поздневременной части отклика от макета В-707 с Е-импульсом, подобранным для модели сигнала В-707 (рис. 5). Свертка поздневременной части отклика макета В-707 с Е-импульсом, подобранным к отклику макета F-18 изображена на рис. 6.

Из рисунков видно, что Е-импульс, подобранный к отклику цели, эффективно обнуляет свертку этого отклика с Е-импульсом (рис. 5), а при выполнении операции свертки отклика макета с Е-импульсом, не подобранным к нему, результат свертки в поздневременной период значительно отличается от нулевого значения, что говорит о том, что необходимо продолжать дискриминационный процесс.

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

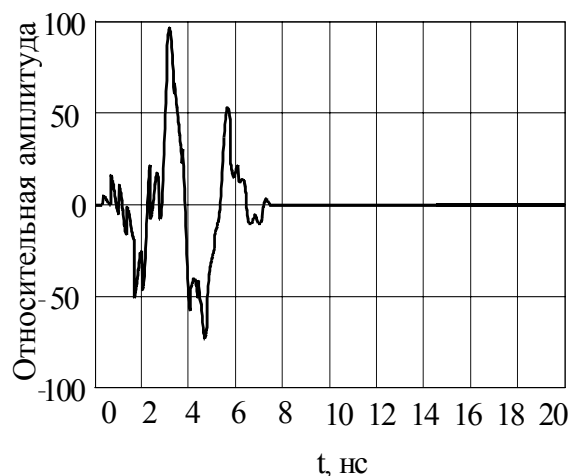


Рис. 5. Свертка отклика от макета В-707 с Е-импульсом, подобранным для модели В-707

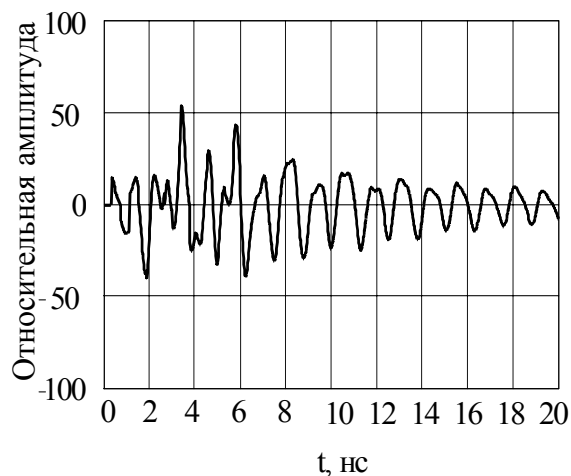


Рис. 6. Свертка отклика от макета В-707 с Е-импульсом, подобранным для модели F-18

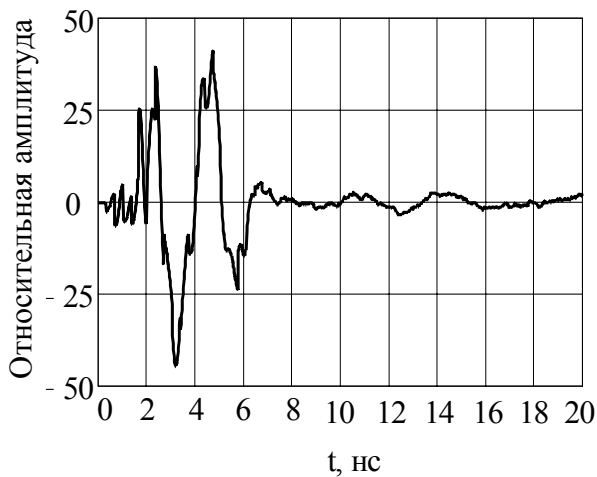


Рис. 7. Свертка Е-импульса с откликом от макета В-707 при различных начальных фазах и амплитудах компонент сигнала

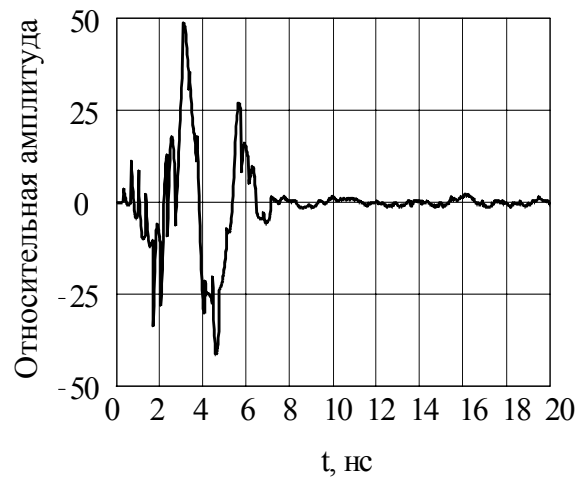


Рис. 8. Свертка отклика от макета В-707 с Е-импульсом, подобранным для модели В-707 при отношении сигнал/шум SNR = 30 дБ

Далее исследовалась эффективность работы метода Е-импульса при изменении ракурса цели и при изменении отношения сигнал/шум.

Моделирование изменения ракурса целью в рамках выбранной резонансной модели заключалось в изменении начальных фаз и амплитуд компонент сигнала. Свертка Е-импульса, выбранного к отклику от В-707 с моделью отклика от В-707 с измененными начальными фазами и амплитудами составляющих сигнала представлена на рис. 7. Как видно из рисунка, изменение ракурса целью практически не сказалось на качестве свертки в поздневременной период, что подтверждает независимость алгоритма идентификации объектов на основе метода Е-импульса от ракурса цели.

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 Е-импульсом, подобранным ранее к модели отклика В-707, при отношении сигнал/шум SNR = 30 дБ представлена на рис. 8.

С целью получения наиболее полной картины влияния гауссовского шума на работоспособность метода Е-импульса была снята зависимость дискриминационного числа от отношения сигнал/шум для свертки Е-импульса, выбранного для отклика от В-707, с моделями откликов от макетов В-707 и F-18. Полученные зависимости представлены на рис. 9.

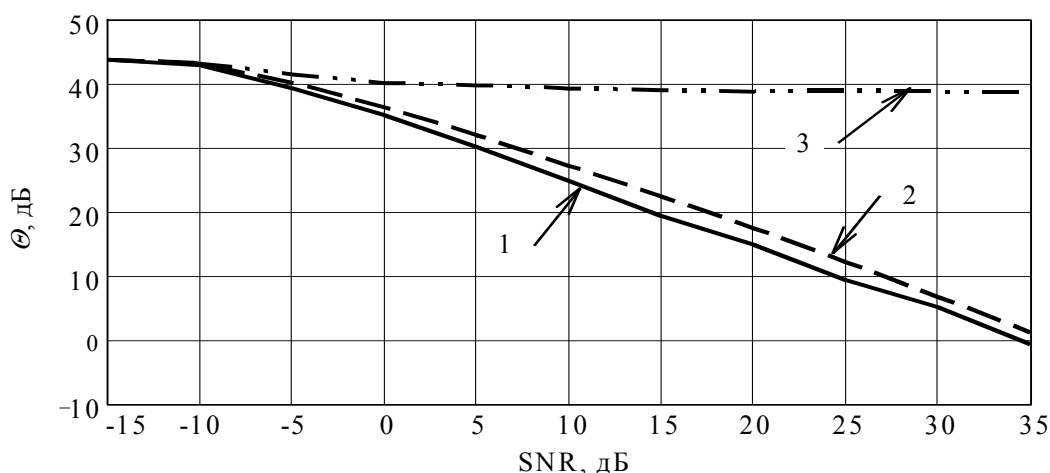


Рис. 9. Зависимость дискриминационного числа Θ от отношения сигнал/шум для модели сигнала В-707.

- «1» – свертка отклика от макета В-707 с Е-импульсом, подобранным для модели В-707;
- «2» – свертка Е-импульса с моделью при произвольных начальных фазах и амплитудах компонент сигнала;
- «3» – свертка отклика от макета В-707 с Е-импульсом, подобранным для модели F-18

Первые две графические зависимости соответствуют свертке исходной модели сигнала и модели с измененными фазами и амплитудами компонент с Е-импульсом, подобранным к модели отклика от макета В-707. Как видно, эти зависимости практически неотличимы друг от друга, из чего можно сделать вывод о том, что метод Е-импульса нечувствителен к подобным изменениям. Нужно заметить, что значение дискриминационного параметра, соответствующее 100-процентной вероятности правильной идентификации объектов, равняется нулю. Это соответствует идеальному случаю, при котором шум практически не влияет ни на исследуемые модели сигналов, и отношение сигнал/шум составляет порядка 35 дБ. Уменьшение отношения сигнал/шум приводит к увеличению параметра Θ , что соответствует уменьшению вероятности правильной идентификации. Третья зависимость соответствует свертке отклика с Е-импульсом, не подобранным к этой модели, при этом Θ принимает максимальное значение, практически не изменяя его в зависимости от отношения сигнал/шум.

Основываясь на вышеперечисленных фактах, можно сделать вывод, что используемый дискриминационный параметр Θ является достаточно информативным, позволяя эффективно проводить идентификацию объектов.

Исходя из графиков можно сделать вывод о том, что задав разность между значением Θ , соответствующим невозможности идентификации (порядка 38-40 дБ) и некоторым значением Θ , соответствующим требуемой вероятности правильной идентификации, можно определить пороговое отношение сигнал/шум в приходящем сигнале. Если принять подобную разность дискриминационных параметров равной 10 дБ, то пороговое отношение сигнал/шум составит примерно 5 дБ. Данный вопрос представляется достаточно интересным и может являться основой для проведения дальнейших исследований.

4. Заключение

Представленная работа посвящена разработке и исследованию алгоритма идентификации объектов на основе метода Е-импульса. Для решения поставленной задачи идентификации объектов сигналы от реальных объектов были представлены в виде некоторой математической модели. Используя резонансную модель, был проведен синтез позднереверберационной части отклика проводящих радиолокационных объектов на возбуждающее воздействие. Основными параметрами резонансной модели являются комплексно сопряженные полюса, расположение которых зависит в основном от геометрии и формы объектов и практически не изменяется от ракурса цели.

Воспользовавшись теоретическими соотношениями метода Е-импульса, к полученным компьютерным моделям откликов макетов летательных аппаратов были подобраны дискриминационные сигналы. Исследования алгоритма идентификации на основе метода Е-импульса заключались в изучении эффективности его работы при изменении ракурса цели и изменении отношения сигнал/шум. Также исследовался дискриминационный параметр, характеризующий качество идентификации.

По результатам проведенных численных экспериментов можно сказать, что исследуемый метод Е-импульса является достаточно эффективным способом идентификации объектов по их собственным электромагнитным излучениям. Представленный метод практически не зависит от изменения ракурса цели и направления на цель, позволяя успешно проводить идентификацию в сложной помеховой обстановке вплоть до отношения сигнал/шум $SNR = 5$ дБ. Рассматриваемый дискриминационный параметр является достаточно информативным, предоставляя возможность эффективно проводить идентификацию объектов.

Библиография

1. Кузнецов Ю.В., Щекатуров В.Ю., Баев А.Б., «Сравнительная характеристика алгоритмов оценки параметров резонансной модели объектов», «Вестник МАИ», – М.: Изд-во МАИ, том 4, № 2, 1997 г. – 96 с.: ил.
2. Баум К.Э., «Новые методы нестационарного (широкополосного) анализа и синтеза антенн и рассеивателей», ТИИЭР, т. 64, № 11, 1976.
3. Y. Hua, T. K. Sarkar “ A Discussion of E-Pulse Method and Prony’s Method for Radar Target Resonance Retrieval from Scattered Field”, IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 37, NO. 7, July 1989.
4. E. Rothwell, D. P. Nyquist, K. M. Chen, and B. Drachman “Radar Target Discrimination Using the Extinction-pulse Technique”, IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP-33, NO. 9, Sept. 1985.
5. E. J. Rothwell, K. M. Chen, D. P. Nyquist, W. Sun “New Progress on E/S Pulse Techniques for Noncooperative Target Recognition”, IEEE. Trans. Antennas Propagat., vol. 40, NO. 7, July 1992.