

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

УДК 621.391:621.396.96
DOI 10.21685/2072-3059-2018-2-8

Д. И. Попов

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОДАВЛЕНИЯ ПАССИВНЫХ ПОМЕХ РЕЖЕКТОРНЫМИ ФИЛЬТРАМИ

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования являются режекторные фильтры (РФ) рекурсивного и нерекурсивного типа, а также каскадное соединение рекурсивных и нерекурсивных звеньев. Целью работы является сравнительный анализ различных РФ в зависимости от формы и ширины спектра пассивных помех.

Материалы и методы. Введены критерии эффективности режектирования пассивных помех фильтрами рекурсивного и нерекурсивного типа в зависимости от формы спектральной плотности помехи. Рассмотрены критерии и методы оптимизации режекторных фильтров при априорной неопределенности параметров и формы спектральной плотности помехи.

Результаты. Приведены числовые результаты сравнительного анализа эффективности РФ различной структуры по введенным критериям при воздействии помех с различными аппроксимациями спектральной плотности, отличающимися друг от друга скоростью спада спектра.

Выводы. Гауссовской аппроксимации спектральной плотности пассивных помех соответствует наиболее эффективное их режектирование, что обусловлено особенностями формы спектра. Гауссовская аппроксимация характеризуется наибольшей чувствительностью к параметрам режекторных фильтров при анализе их эффективности, что обуславливает целесообразность ее использования при сравнительном анализе различных типов режекторных фильтров.

Ключевые слова: аппроксимация спектральной плотности, гауссовский спектр, баттервортовский спектр, критерий эффективности режектирования, корреляционная матрица, методы оптимизации, нерекурсивный фильтр, пассивные помехи, рекурсивный фильтр, сравнительный анализ эффективности РФ.

Д. И. Попов

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF THE PASSIVE HINDRANCES' SUPPRESSION WITH RECTOR FILTERS

© 2018 Попов Д. И. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

Abstract.

Background. The object of the research are rejection filters (RF) of recursive and non-recursive type, as well as a cascade connection of recursive and nonrecursive links. The aim of the work is a comparative analysis of different RFs depending on the shape and width of the clutter spectrum.

Materials and methods. Criteria for the efficiency of clutter rejection by filters of recursive and non-recursive type are introduced depending on the form of the spectral density of the clutter. The criteria and methods for the optimization of rejection filters are considered for a priori uncertainty of the parameters and the shape of the spectral density of the clutter.

Results. Numerical results of a comparative analysis of the RF efficiency of different structures on the imposed criteria under the influence of clutter with various spectral density approximations differing from each other in the rate of spectrum decay are presented.

Conclusions. The Gaussian approximation of the spectral density of clutter corresponds to the most effective rejection, which is due to the features of the shape of the spectrum. The Gaussian approximation is characterized by the greatest sensitivity to the parameters of the rejection filters when analyzing their efficiency, which makes it expedient to use it in a comparative analysis of different types of rejection filters.

Key words: spectral density approximation, Gaussian spectrum, Butterworth spectrum, rejection efficiency criterion, correlation matrix, optimization methods, non-recursive filter, clutter, recursive filter, comparative analysis of RF efficiency.

Введение

Обнаружение сигналов движущихся целей на фоне пассивных (коррелированных) помех является одной из актуальных и трудных задач, решаемых в когерентно-импульсных радиолокационных системах [1–3]. Пассивные помехи в виде мешающих отражений от неподвижных или медленно перемещающихся объектов – местных предметов, гидрометеоров (облаков, дождя, града, снега), металлизированных отражателей, сбрасываемых для маскировки цели и др. – существенно нарушают нормальную работу радиолокационных систем [4, 5]. Интенсивность пассивных помех может значительно превышать уровень собственных шумов приемника, что приводит к перегрузкам приемного тракта («ослеплению» радиолокатора) и, как следствие, к потере полезных сигналов. Однако даже при отсутствии перегрузок полезный сигнал может быть не обнаружен на фоне интенсивных мешающих отражений.

Основной операцией выделения сигналов движущихся целей является режектирование спектральных составляющих помехи, а режекторные фильтры (РФ) являются основным узлом широкого класса систем межпериодной обработки радиолокационных сигналов на фоне пассивных помех и в значительной мере определяют эффективность данных систем. На практике получили применение РФ рекурсивного и нерекурсивного типа, а также каскадное соединение рекурсивных и нерекурсивных звеньев. Несмотря на наличие ряда работ, посвященных описанию РФ и анализу их эффективности [6–8], исчерпывающие результаты по их сравнительному анализу отсутствуют. В связи с этим представляет интерес проведение анализа эффективности различных РФ в зависимости от формы и ширины спектра пассивных помех. Кроме того, для адекватного решения поставленной задачи сравнительного анализа необходимо ввести критерий эффективности, усредненный по спектральным характеристикам пассивных помех.

1. Описание РФ в z -плоскости

Системная (передаточная) функция рекурсивного РФ m -го порядка в z -плоскости имеет вид [6]

$$H(z) = \frac{\prod_{j=1}^m (z - z_{0j})}{\prod_{j=1}^m (z - z_{pj})} = \frac{\sum_{k=0}^m a_k z^{-k}}{1 - \sum_{k=1}^m b_k z^{-k}}, \quad (1)$$

где z_{0j} , z_{pj} – нули и полюсы системной функции; a_k , b_k – весовые коэффициенты соответственно прямых и обратных связей канонической структуры РФ.

В результате деления полинома в числителе выражения (1) на полином в знаменателе получим $H(z) = \sum_{k=0}^{\infty} g_k z^{-k}$, где g_k – коэффициенты импульсной характеристики РФ, определяемые из рекурсивных соотношений:

$$\left. \begin{aligned} g_0 &= a_0, \quad g_k = a_k + \sum_{j=1}^k b_j g_{k-j}, \\ \text{а при } k > m \quad g_k &= \sum_{j=1}^m b_j g_{k-j}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Для нерекурсивного РФ m -го порядка, нули которого расположены на единичной окружности z -плоскости, системная функция принимает вид

$$H(z) = \prod_{j=1}^m (1 - z^{-1} e^{i\theta_{0j}}) = \sum_{k=0}^m g_k z^{-k},$$

где θ_{0j} – аргумент j -го комплексного нуля $z_{0j} = e^{i\theta_{0j}}$; g_k – коэффициенты импульсной характеристики нерекурсивного РФ, которые, как следует из соотношений (2), при $b_k = 0$ являются весовыми коэффициентами a_k при канонической реализации РФ.

2. Критерии эффективности режектирования пассивных помех

Эффективность рассматриваемых РФ при гауссовской статистике входных данных будем характеризовать коэффициентом улучшения отношения сигнал/(помеха+шум):

$$\mu(\varphi) = \mathbf{G}^T \mathbf{R}_c \mathbf{G} / [\mathbf{G}^T (\mathbf{R}_n + \gamma \mathbf{I}) \mathbf{G}], \quad (3)$$

где $\mathbf{G} = \{g_k\}^T$ – n -мерный вектор-столбец коэффициентов импульсной характеристики РФ, причем для рекурсивных РФ величина n соответствует достижению установившегося режима на выходе РФ, а для нерекурсивных

РФ $n = m + 1$; \mathbf{R}_c – n -мерная эрмитова корреляционная матрица сигнала, элементы которой $R_{jk}^c = r_{jk} e^{i(j-k)\varphi}$; φ – доплеровский сдвиг фазы сигнала за период повторения T ; \mathbf{R}_n – корреляционная матрица помехи, элементы которой при скомпенсированном доплеровском сдвиге фазы помехи $R_{jk}^n = \rho_{jk}$; γ – отношение шум/помеха по мощности; \mathbf{I} – единичная матрица.

С учетом инвариантности параметров РФ к величине φ путем интегрирования выражения (3) найдем среднее в интервале $(-\pi, \pi)$ значение величины $\mu(\varphi)$:

$$\mu = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \mu(\varphi) d\varphi = \mathbf{G}^T \tilde{\mathbf{R}}_c \mathbf{G} / \mathbf{G}^T (\mathbf{R}_n + \gamma \mathbf{I}) \mathbf{G},$$

где $\tilde{\mathbf{R}}_c$ – преобразованная в результате интегрирования корреляционная матрица сигнала, элементы которой $\tilde{R}_{jk}^{(c)} = r_{jk} \text{sinc}[(j-k)\pi] = \delta_{jk}$, что с учетом свойства sinc-функции

$$\text{sinc}[(j-k)\pi] = \frac{\sin[(j-k)\pi]}{(j-k)\pi} = \begin{cases} 1, & j = k, \\ 0, & j \neq k, \end{cases}$$

соответствует единичной матрице, т.е. $\tilde{\mathbf{R}}_c = \mathbf{I}$.

В результате диагонализации корреляционной матрицы сигнала выражение (3) окончательно принимает вид, соответствующий нормированному относительно прохождения некоррелированного шума коэффициенту подавления помехи:

$$\mu = \mathbf{G}^T \mathbf{G} / \mathbf{G}^T (\mathbf{R}_n + \gamma \mathbf{I}) \mathbf{G} = [(\mathbf{G}^T \mathbf{R}_n \mathbf{G} / \mathbf{G}^T \mathbf{G}) + \gamma]^{-1}. \quad (4)$$

Оптимизация рекурсивных РФ по заданным коэффициенту μ и корреляционным свойствам помехи при заданной (или выбранной) аппроксимирующей функции для амплитудно-частотной характеристики сводится к выбору оптимальных параметров последней (частоты среза и неравномерности в полосе пропускания) и связанных с ними весовых коэффициентов РФ в результате применения итерационной процедуры поиска экстремума [9].

Оптимизация нерекурсивных РФ по критерию $\mu_{\max} \rightarrow \max_{\mathbf{G}} \mu$ осуществляется методами линейной алгебры на основе экстремальных свойств собственных значений матриц, что приводит к оптимальному вектору \mathbf{G} в виде собственного вектора матрицы \mathbf{R}_n , соответствующего ее минимальному собственному значению [10].

При известной форме спектральной плотности помехи оптимальный вектор \mathbf{G} определяется ее нормированной шириной $\beta = \Delta f T$, которая при параметрической априорной неопределенности является неизвестной. При заданном интервале изменения параметра β оптимальный вектор \mathbf{G} в отличие от рассмотренного критерия предлагается выбирать из условия максимизации усредненной величины

$$\bar{\mu} = \int_{\beta_{\min}}^{\beta_{\max}} \mu(\beta) p(\beta) d\beta, \quad (5)$$

где β_{\min} , β_{\max} – границы интервала изменения параметра β ; $p(\beta)$ – плотность вероятности распределения параметра β , которая в отсутствие априорных данных может быть выбрана равномерной в пределах интервала $\Delta\beta = \beta_{\max} - \beta_{\min}$, т.е. $p(\beta) = 1 / \Delta\beta$.

Ввиду разнообразия помеховых ситуаций форма спектральной плотности помехи также является неизвестной, что приводит к использованию различных ее аппроксимаций. В этом случае при оптимизации вектора \mathbf{G} следует использовать величину

$$\bar{\mu} = \sum_{l=1}^L p_l \int_{\beta_{\min}}^{\beta_{\max}} \mu(\beta_l) p(\beta_l) d\beta_l, \quad (6)$$

где L – число рассматриваемых аппроксимаций спектральной плотности помехи; p_l – вероятностная мера l -й аппроксимации, задаваемая по результатам экспериментальных исследований спектральных характеристик пассивных помех.

Оптимизация вектора \mathbf{G} по предложенному критерию $\bar{\mu}_{\max} \rightarrow \max_{\mathbf{G}} \bar{\mu}$ осуществляется методами нелинейного программирования, например, с использованием квазиньютоновской итерационной процедуры поиска унимодального экстремума [11].

3. Модели пассивных помех

В результате решения задачи оптимизации устанавливается связь оптимального вектора \mathbf{G} с различными аппроксимациями формы спектральной плотности помехи, отличающимися друг от друга скоростью спада спектра. Наиболее быстрым спадом спектра обладает кривая Гаусса. Далее в порядке уменьшения скорости спада следуют кривые Баттерворта второй степени и первой степени (резонансная кривая). Соответствующие аналитические выражения в том же порядке записываются следующим образом [7]:

$$\begin{cases} S_1(f) = \exp[-2,8(f / \Delta f)^2], \\ S_2(f) = [1 + (2f / \Delta f)^4]^{-1}, \\ S_3(f) = [1 + (2f / \Delta f)^2]^{-1}. \end{cases} \quad (7)$$

Конкретный вид элементов корреляционной матрицы \mathbf{R}_{Π} в выражении (4) зависит от спектральной плотности помехи и определяется соотношением

$$\rho_{jk} = \int_0^{\infty} S(f) \cos[2\pi f(j-k)T] df / \int_0^{\infty} S(f) df. \quad (8)$$

В результате вычисления интегралов в данном соотношении с использованием приведенных выше аппроксимаций спектральной плотности помехи соответственно получим

$$\begin{cases} \rho_{jk}^{(1)} = \exp[-\pi^2\beta^2(j-k)^2/2,8], \\ \rho_{jk}^{(2)} = \exp(-\pi\beta|j-k|/\sqrt{2})[\sin(\pi\beta|j-k|/\sqrt{2}) - \cos(\pi\beta|j-k|/\sqrt{2})], \\ \rho_{jk}^{(3)} = \exp(-\pi\beta|j-k|). \end{cases} \quad (9)$$

Так как гауссовская и резонансная аппроксимации спектральной плотности помехи соответствуют предельным случаям быстрого и медленного спада спектра, то для описания помех с быстрым спадом спектра в центре и медленным на краях целесообразно использовать взвешенную сумму данных аппроксимаций. Тогда

$$\rho_{jk} = \alpha\rho_{jk}^{(1)} + (1-\alpha)\rho_{jk}^{(3)}, \quad (10)$$

где весовой коэффициент α принимает значение от 0 до 1.

Варьирование параметров α и β открывает широкие возможности для описания помех с различной формой и шириной спектра.

4. Результаты расчетов

Ниже приведены числовые результаты сравнительного анализа эффективности РФ различной структуры по критерию (4) при воздействии рассмотренных типов помех. Приведенные на рис. 1, 2 номера кривых соответствуют номерам аппроксимаций спектральной плотности $S_1(f)$, $S_2(f)$ и $S_3(f)$ по формулам (7) и полученным из них с помощью соотношения (8) коэффициентам корреляции $\rho_{jk}^{(1)}$, $\rho_{jk}^{(2)}$ и $\rho_{jk}^{(3)}$ по формулам (9). Во всех случаях параметр $\gamma = 10^{-4}$.

На рис. 1 приведены зависимости эффективности режектирования для установившегося режима рекурсивного РФ чебышевского типа второго порядка ($m=2$) с весовыми коэффициентами прямых связей $a_0 = a_2 = 1$, $a_1 = -2$ и неравномерностью в полосе пропускания 3 дБ. Сплошные кривые соответствуют РФ с угловой частотой среза полосы пропускания $\theta_c = \omega_c T = 0,6\pi$ и весовыми коэффициентами обратных связей $b_1 = -0,75$, $b_2 = -0,5$, а штриховые кривые – $\theta_c = 0,5\pi$ и $b_1 = -0,25$, $b_2 = -0,5$. Как видим, эффективность РФ существенно зависит от скорости спада и ширины спектра помехи. Наиболее эффективное режектирование помехи имеет место в случае гауссовской аппроксимации, которая характеризуется быстрым спадом спектра. Кроме того, эффективность рекурсивного РФ зависит от угловой частоты среза θ_c полосы пропускания, причем в большей степени также в случае гауссовского спектра. Очевидно, что при аппроксимации коэффициентов корреляции помехи в виде взвешенной суммы (10) эффективность РФ в зависимости от величины весового коэффициента α соответствует промежу-

точному между кривыми 1 и 3 положению. При $\beta \rightarrow 0$ во всех случаях, как это следует из критерия (4), эффективность РФ $\mu \rightarrow \gamma^{-1}$.

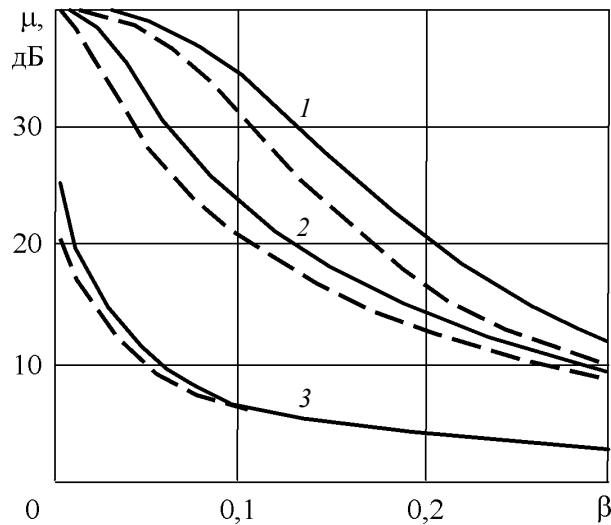


Рис. 1. Зависимости эффективности режектирования для РФ второго порядка от параметра помехи

На рис. 2 приведены зависимости эффективности РФ третьего порядка ($m = 3$). Сплошные кривые соответствуют каскадному соединению нерекурсивного звена первого порядка и рекурсивного звена второго порядка с частотой среза $\theta_{\bar{n}} = 0,6\pi$, штриховая кривая – нерекурсивному РФ третьего порядка с оптимизированными по критерию максимума величины (5) в практически интересующем интервале изменения $\beta = 0,05 \dots 0,2$ весовыми коэффициентами $a_0 = -a_3 = 1$, $a_1 = -a_2 = -2,93$.

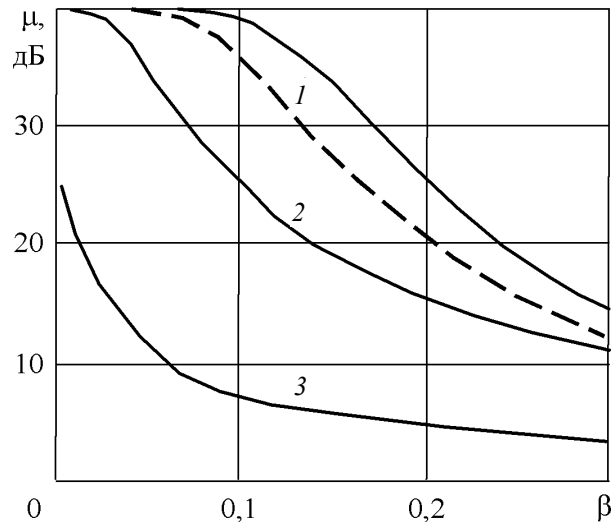


Рис. 2. Зависимости эффективности режектирования для РФ третьего порядка от параметра помехи

Как следует из расчетов, введение нерекурсивного звена первого порядка приводит к повышению эффективности только при гауссовском спектре помехи. При баттервортовских аппроксимациях первой и второй степени эффективность обоих РФ третьего порядка практически одинакова, а эффективность нерекурсивного РФ третьего порядка при всех аппроксимациях практически эквивалентна эффективности рекурсивного РФ второго порядка с частотой среза $\theta_c = 0,6\pi$ (сплошные кривые на рис. 1).

Заключение

Таким образом, гауссовской аппроксимации спектральной плотности пассивных помех соответствует наиболее эффективное их режектирование, что обусловлено быстрым спадом спектра. При этом гауссовская аппроксимация характеризуется наибольшей чувствительностью к параметрам режекторных фильтров при анализе их эффективности, что обуславливает целесообразность ее использования при сравнительном анализе систем выделения сигналов движущихся целей на фоне пассивных помех с различными типами режекторных фильтров.

Библиографический список

1. Radar Handbook / ed. by M. I. Skolnik. – 3rd ed. – New York : McGraw–Hill, 2008. – 1352 p.
2. **Richards, M. A.** Principles of Modern Radar: Basic Principles / eds. M. A. Richards, J. A. Scheer, W. A. Holm. – New York : SciTech Publishing, IET, Edison, 2010. – 924 p.
3. **Попов, Д. И.** Статистическая теория радиотехнических систем : учеб. пособие / Д. И. Попов. – Рязань : Изд-во РГРТУ, 2011. – 80 с.
4. Principles of Modern Radar: Advanced Techniques / eds. W. L. Melvin, J. A. Scheer. – New York : SciTech Publishing, IET, Edison, 2013. – 846 p.
5. **Richards, M. A.** Fundamentals of Radar Signal Processing, Second Edition / M. A. Richards. – New York : McGraw–Hill Education, 2014. – 618 p.
6. **Кузьмин, С. З.** Цифровая радиолокация. Введение в теорию / С. З. Кузьмин. – Киев : КВиЦ, 2000. – 428 с.
7. Цифровая обработка сигналов в многофункциональных радиолокаторах. Методы. Алгоритмы. Аппаратура : монография / под ред. Г. В. Зайцева. – М. : Радиотехника, 2015. – 376 с.
8. **Лозовский, И. Ф.** Цифровая обработка сигналов в РЛС обзора : монография / И. Ф. Лозовский. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – 270 с.
9. **Уайлд, Д. Дж.** Методы поиска экстремума : пер. с англ. / Д. Дж. Уайлд. – М. : Наука, 1967. – 268 с.
10. **Гантмахер, Ф. Р.** Теория матриц / Ф. Р. Гантмахер. – М. : Наука, 1988. – 552 с.
11. **Химмельблау, Д.** Прикладное нелинейное программирование : пер. с англ. / Д. Химмельблау. – М. : Мир, 1975. – 536 с.

References

1. *Radar Handbook*. Ed. by M. I. Skolnik. 3rd ed. New York: McGraw–Hill, 2008, 1352 p.
2. Richards M. A., Scheer J. A., Holm W. A. (Eds.) *Principles of Modern Radar: Basic Principles*. New York: SciTech Publishing, IET, Edison, 2010, 924 p.
3. Popov D. I. *Statisticheskaya teoriya radiotekhnicheskikh sistem: ucheb. posobie* [Statistical theory of radio systems: tutorials]. Ryazan: Izd-vo RGRTU, 2011, 80 p.

4. *Principles of Modern Radar: Advanced Techniques*. Eds. W. L. Melvin, J. A. Scheer. New York: SciTech Publishing, IET, Edison, 2013, 846 p.
5. Richards M. A. *Fundamentals of Radar Signal Processing, Second Edition*. New York: McGraw-Hill Education, 2014, 618 p.
6. Kuz'min S. Z. *Tsifrovaya radiolokatsiya. Vvedenie v teoriyu* [Digital radar. Introduction to theory]. Kiev: KViTs, 2000, 428 p.
7. *Tsifrovaya obrabotka signalov v mnogofunktsional'nykh radiolokatorakh. Metody. Algoritmy. Apparatura: monografiya* [Digital signal processing in multi-function radars. Methods. Algorithms. Equipment: monograph]. Ed. by G. V. Zaytsev. Moscow: Radio-tehnika, 2015, 376 p.
8. Lozovskiy I. F. *Tsifrovaya obrabotka signalov v RLS obzora: monografiya* [Digital signal processing in the radar review: monograph]. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2016, 270 p.
9. Uayld D. Dzh. *Metody poiska ekstremuma: per. s angl.* [Extremum search methods: translated from english]. Moscow: Nauka, 1967, 268 p.
10. Gantmakher F. R. *Teoriya matrits* [Matrix theory]. Moscow: Nauka, 1988, 552 p.
11. Khimmel'blau D. *Prikladnoe nelineynoe programmirovaniye: per. s angl.* [Applied non-linear programming: translated from english]. Moscow: Mir, 1975, 536 p.

Попов Дмитрий Иванович

доктор технических наук, профессор,
кафедра радиотехнических систем,
Рязанский государственный
радиотехнический университет
(Россия, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1)

E-mail: adop@mail.ru

Popov Dmitriy Ivanovich

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of radio engineering
systems, Ryazan State Radio Engineering
University (59/1 Gagarina street,
Ryazan, Russia)

УДК 621.391:621.396.96

Попов, Д. И.

Анализ эффективности подавления пассивных помех режекторными фильтрами / Д. И. Попов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2018. – № 2 (46). – С. 87–95. – DOI 10.21685/2072-3059-2018-2-8.