

УДК 629.7:621.396

Г.В. Певцов¹, А.Я. Яцуценко¹, Д.В. Карлов¹, М.Ф. Пичугин¹, Ю.В. Трофименко¹,
О.Ю. Чернявский², М.В. Борцова³¹ Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков² Национальный технический университет «ХПИ», Харьков³ Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ОБНАРУЖЕНИЯ РАДИОСИГНАЛОВ. ОСНОВЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ

Излагается альтернативный вариант энергетической теории обнаружения радиосигналов, разработанной на основании учета закона сохранения энергии М.В. Ломоносова и байесовской безусловной оптимизации статистических решений. Энергетическое обнаружение радиосигнала – это поиск интервала времени, где суммарная энергия сигнала и шума по отношению к усредненной энергии внутреннего шума превышает порог обнаружения с заданными качественными показателями. Рассматриваются способы последовательного и параллельного энергетического обнаружения радиосигналов на радиочастоте по энергетике, соизмеримых или меньших уровня внутреннего шума радиоприемника, без учета и с учётом влияния внешних активных маскирующих помех.

Ключевые слова: радиосигнал, статистическое решение, энергия, радиочастота.

1. Постановка задачи

На основании закона сохранения энергии М.В. Ломоносова и байесовской безусловной оптимизации статистических решений в энергетической теории обнаружения ставится задача обнаружить интервал времени, где сосредоточена суммарная энергия сигнала и шума относительно усредненной энергии шума при статистической обработке случайного процесса и использовании критерия минимума среднего риска. Принятие решения об обнаружении суммарной энергии сигнала и шума осуществляется после сравнения энергетического отношения правдоподобия с порогом принятия решения (например, по критерию Неймана-Пирсона).

2. Сущность энергетической теории обнаружения радиосигналов

В энергетической теории обнаружения формулируется задача обнаружения интервала времени, где суммарная энергия сигнала и шума относительно усредненной энергии шума превышает порог обнаружения, что позволяет учесть закон сохранения энергии при статистической обработке случайного процесса. При энергетическом обнаружении радиосигналов, как и в классической теории обнаружения [1], для принятия решения об обнаружении радиосигнала используется критерий минимума среднего риска

$$\bar{r} = r_{лп}P(A_1)(1-D) + r_{пп}P(A_0)F,$$

$$\bar{r} = r_{лп}P(A_1) - r_{пп}P(A_1)(D - l \cdot F), \quad (1)$$

где $l = r_{лп}P(A_0)/r_{пп}P(A_1)$ – весовой множитель;

$r_{лп}, r_{пп}$ – риски ложной тревоги и пропуска цели;

$P(A_1)$ – вероятность наличия цели; $P(A_0)$ – веро-

ятность отсутствия цели; D – условная вероятность правильного обнаружения; F – условная вероятность ложной тревоги.

Минимум выражение (1) имеет при

$$[D - L_0F] = \int_{-\infty}^{\infty} p_n(y^2) A^*(y^2) [L(y^2) - L_0] dy = \max,$$

где $A^*(y^2)$ – оптимальное правило принятия решения об обнаружении относительной суммарной энергии сигнала+шума; $L(y^2) = p_{sn}(y^2)/p_n(y^2)$ – в отличие от классического подхода, энергетическое отношение правдоподобия; $p_{sn}(y^2)$ – плотность вероятности распределения суммарной энергии сигнала и шума; $p_n(y^2)$ – плотность вероятности распределения энергии внутреннего шума приемника. Энергетическое отношение правдоподобия учитывает закон сохранения энергии; L_0 – порог обнаружения, который определяется, как принято в радиолокации, критерием Неймана-Пирсона.

При энергетическом подходе необходимо оценить плотность вероятности суммарной энергии сигнала и шума $p_{sn}(y^2)$ по отношению к плотности вероятности распределения энергии шума $p_n(y^2)$.

Поскольку плотность вероятности распределения суммарной энергии сигнала и шума зависят от времени запаздывания эхо-сигнала и его энергии, то в условиях априорной неопределенности временного запаздывания радиосигнала возникает необходимость оценки суммарной энергии сигнала и шума на всех интервалах анализа $m = T/\tau$ в течение периода следования зондирующих радиосигналов. Апостериорная плотность вероятности распределения суммарной энергии сигнала и шума непосредственно связана с оценками энергии на всех интервалах ана-

лиза. Очевидным является предположение, что энергетическое отношение правдоподобия $L(y^2)$ функционально связано с оценками энергии текущей реализации у:

$$L(y^2) \sim K(y^2) = W_{sn} / \overline{W_n} \quad \forall i \in 1..m,$$

где $W_{sn} = \sum_{k=0}^n \{y_k\}^2 \Delta t_k$ – оценка энергии неразделенной суммы амплитуд сигнала+шума на интервале равном длительности радиосигнала; n – общее количество дискретных измерений на интервале статистического анализа τ ;

$$\overline{W_n} = \frac{1}{M} \left[\sum_{k=0}^n \{\xi_k\}^2 \Delta t_{k1} + \sum_{j=0}^n \{\xi_j\}^2 \Delta t_j + \dots \right] -$$

оценка усредненного значения энергии входной реализации шума на M интервалах равных длительности радиосигнала.

Полученное отношение статистической оценки суммарной энергии сигнала и шума к усредненной энергии шума за несколько предыдущих интервалов анализа будем называть в дальнейшем энергетическим отношением правдоподобия, подразумевая при этом только его функциональную связь.

Порог принятия решения об обнаружении радиосигнала L_0 в радиолокации определяется по критерию Неймана-Пирсона из выражения условной вероятности ложной тревоги. Для модели χ^2 -распределения суммы квадратов амплитуд оцифрованных гауссовых шумовых выборок условная вероятность ложных тревог имеет вид:

$$F = \frac{1}{\sqrt{2^n} \sigma^{2n} \Gamma(n/2) L_0} \int_{L_0}^{\infty} (y)^{2[(n/2)-1]} \exp\left(-\frac{(y)}{2\sigma^2}\right) dy.$$

Требование ограничения условной вероятности ложной тревоги приводит к небайесовскому критерию Неймана-Пирсона.

3. Качественные показатели энергетического обнаружения детерминированного радиосигнала для гауссовой модели амплитуд случайных величин внутреннего шума

Для определения плотности вероятности распределения суммы энергий детерминированного радиосигнала с амплитудой a_i и гауссовых шумовых выборок ξ_i рассмотрим

$$\sum_{i=1}^n (\xi_i + a_i)^2 = \sum_{i=1}^n \xi_i^2 + \sum_{i=1}^n (2a_i \xi_i + a_i^2).$$

Функция распределения суммы квадратов гауссовой случайной величины $\sum_{i=1}^n \xi_i^2$ описывается χ^2 -распределением:

$$f_{\xi_i^2} = \frac{1}{\sigma^2} f_{\chi^2} \left(\frac{y}{\sigma^2} \right),$$

слагаемое $\sum 2a_i \xi_i$ имеет гауссову функцию распределения

$$f_{\sum 2a_i \xi_i} = \frac{1}{\sqrt{2\pi \sum 4a_i^2 \sigma^2}} e^{-\left(\frac{y^2}{\sum 4a_i^2 \sigma^2}\right)} = N\left(0, \sqrt{4a_i^2 \sigma^2}\right).$$

Распределение суммы случайных величин $\sum (2a_i \xi_i + a_i^2)$ имеет гауссову функцию распределения

$$f_{\sum (2a_i \xi_i + a_i^2)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi \sum (2a_i \xi_i + a_i^2)}} e^{-\left(\frac{y^2 - \sum a_i^2}{\sum 4a_i^2 \sigma^2}\right)} = N\left(\sum a_i^2, \sqrt{\sum (2a_i \xi_i + a_i^2)}\right).$$

Плотность вероятности распределения квадрата суммы случайных величин имеет вид интеграла свертки гауссовой функции распределения и χ^2 -распределения:

$$f(y) = \frac{1}{\sigma^2} \int_{-\infty}^{\infty} f_{\chi^2} \left(\frac{t}{\sigma^2}, n \right) f_N \left((y-t), \sum a_i^2, \sqrt{\sum 4a_i^2 \sigma^2} \right) dt. \quad (2)$$

Интегральная функция распределения случайной величины (2) характеризует условную вероятность ложного обнаружения суммарной энергии сигнала и шума при отсутствии сигнала:

$$F(y) = \int_{L_0}^{\infty} f(y) dy. \quad (3)$$

Условная вероятность правильного обнаружения радиосигнала определяется выражением:

$$D = \frac{1}{\sigma^2} \int_{L_0}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_{\chi^2} \left(\frac{t}{\sigma^2}, n \right) f_N \left\{ (y-t), \sum a_i^2, \sqrt{\sum 4a_i^2 \sigma^2} \right\} dt dy, \quad (4)$$

$f_N \left\{ (y-t), \sum a_i^2, \sqrt{\sum 4a_i^2 \sigma^2} \right\}$ – гауссова функция распределения смеси детерминированного сигнала и гауссового шума.

Порог энергетического обнаружения суммарного радиосигнала и шума L_0 определяется из уравнения:

$$P \left\{ \sum_{i=1}^n (\xi_i^2 \Delta t) > L_0 \right\} = F;$$

где ξ_i^2 – квадрат амплитуды шумовой гауссовой выборки; Δt – интервал дискретизации входной реализации случайного процесса.

С учетом реального уровня внутренних шумов

$$P \left\{ \frac{1}{\sigma^2} \sum_{i=1}^n (\xi_i^2 \Delta t) > \frac{L_0}{\sigma^2 \Delta t} \right\} = F.$$

Для модели χ^2 -распределения уравнение имеет вид:

$$1 - F_{\chi^2}(x, n) = F; \quad x = L_0 / (\sigma^2 \Delta t), \quad (5)$$

откуда порог обнаружения

$$L_0 = x \sigma^2 \Delta t, \quad (6)$$

σ^2 – дисперсия случайного процесса $y(t)$, определяемая на интервале, где отсутствует радиосигнал; L_0 – порог принятия решения об обнаружении радиосигнала с заданной вероятностью ложной тревоги F ; $F_{\chi^2}(x, n)$ – табулированная функция χ^2 -распределения суммы квадратов амплитуд оцифрованных шумовых выборок n ; x – значение табулированной интегральной функции χ^2 -распределения суммы квадратов амплитуд оцифрованных шумовых выборок.

Условные вероятности правильного обнаружения энергии суммарного детерминированного сигнала и гауссового шума для разных длительностей радиосигналов при фиксированной условной вероятности ложной тревоги F и совпадении интервала анализа с длительностью радиосигнала в зависимости от отношения энергий сигнала и шума, полученные из выражения (4) методом численного интегрирования, представлены на рис. 1.

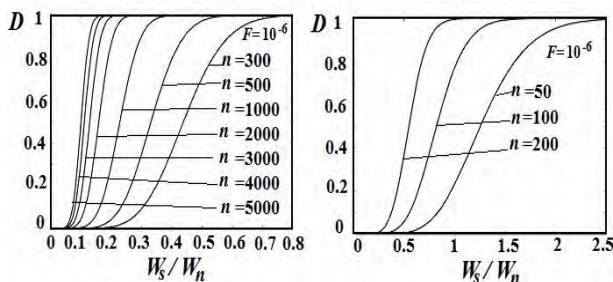


Рис. 1. Условные вероятности правильного обнаружения суммарной энергии детерминированного радиосигнала разной длительности и гауссового шума от отношения энергий радиосигнала и шума

Из рис. 1 следует, что с увеличением длительности радиосигналов улучшается чувствительность приемника к слабым радиосигналам. Гарантированно обнаруживаются слабые радиосигналы с энергией 0,2 энергии шума при длительностях $n > 5 \cdot 10^3$ (больших 500λ) при учете того, что частота оцифровки радиосигнала на порядок выше несущей частоты.

Справедливо и утверждение, что при фиксированных длительностях радиосигнала при определенных условиях (которые необходимо в дальнейшем выяснить), с увеличением числа выборок (точности измерения энергий сигнала и шума) увеличивается чувствительность приемника (с предложенным способом обработки) к слабым радиосигналам.

Условные вероятности правильного обнаружения энергии суммарного детерминированного сигнала и гауссового шума при разных условных вероятностях ложной тревоги F длинных ($n \geq 10^5$) радиосигналов в зависимости от отношения энергий сигнала и шума представлены на рис. 2.

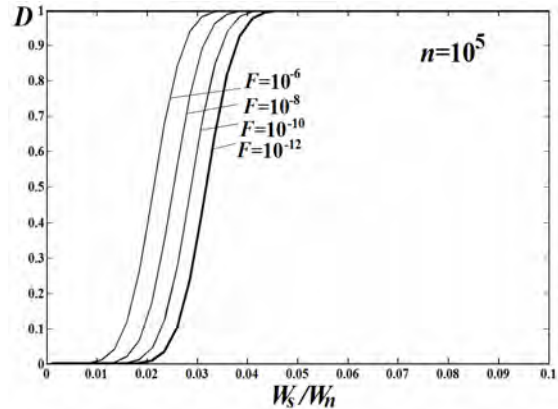


Рис. 2. Условные вероятности правильного обнаружения суммарной энергии для модели детерминированного длинного радиосигнала и гауссового шума

4. Результаты моделирования процесса энергетического обнаружения радиосигнала с известными параметрами

На рис. 3 приведен график зависимости условной вероятности правильного обнаружения D энергии суммы детерминированного радиосигнала со случайной начальной фазой и гауссового шума при совпадении интервала анализа с длительностью (а) и с половиной длительности радиосигнала (б) для $F=10^{-6}, 10^{-8}, 10^{-10}$ от амплитудного отношения сигнал/шум q известного способа обнаружения при длительности сигнала пропорциональной n выборкам и полученные из имитационной аналого-цифровой модели статистическим путем для несущей частоты $f = 2 \cdot 10^8$ Гц и частоты оцифровки $f_{\text{ц}} = 2 \cdot 10^9$ Гц при усреднении 10^5 реализаций на каждую точку. На рис. 3 приведен график зависимости порога принятия решения об обнаружении суммарной энергии сигнала от цели и шума $L_0 = W_{\text{sn}} / W_n$ по критерию Неймана-Пирсона для модели χ^2 -распределения квадратов амплитуд оцифрованных шумовых выборок в зависимости от числа выборок n для значений условных вероятностей ложных тревог $10^{-4}, 10^{-6}, 10^{-8}, 10^{-10}$.

Из сравнения условных вероятностей правильного обнаружения энергии суммы радиосигнала и шума (рис. 1), оцененных по выражению (4), и полученных путем статистического моделирования для $n=500$ и случайной начальной фазы (рис. 3) видно их соответствие для случая совпадения интервала анализа с длительностью радиосигнала.

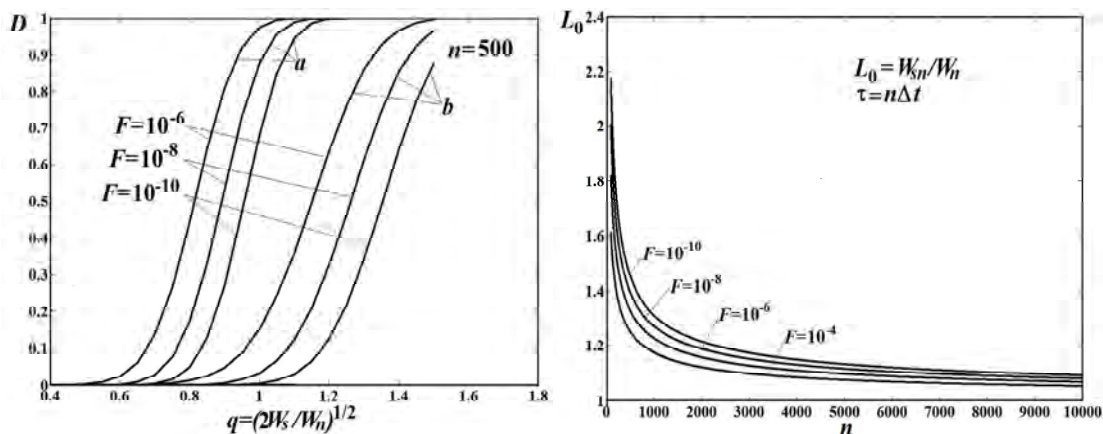


Рис. 3. Графики зависимости условной вероятности правильного обнаружения радиосигналов и порога принятия решения L_0 об обнаружении радиосигнала от его длительности

5. Выигрыш в дальности обнаружения целей

Выигрыш в дальности обнаружения целей при использовании энергетического критерия по сравнению с известным возможно оценить путем сравнения кривых обнаружения классической радиолокации и полученных в энергетической теории как путем моделирования, так и при теоретической оценке, исходя из плотности вероятностей распределения суммарной энергии сигнала и шума, которая определяется интегралом свертки гауссового и

χ^2 -распределений, по отношению максимальных дальностей обнаружения целей при энергетическом обнаружении r_E и при известном способе обнаружения r_A : $r_E/r_A = \sqrt[4]{\gamma_\Sigma^A/\gamma_\Sigma^E}$, где γ_Σ^E , γ_Σ^A – коэффициенты различимости при энергетическом и классическом способах обнаружения.

Кривые обнаружения сигналов с полностью известными параметрами, со случайной начальной фазой и сигналов с релеевскими флуктуациями классической радиолокации представлены на рис. 4 [1].

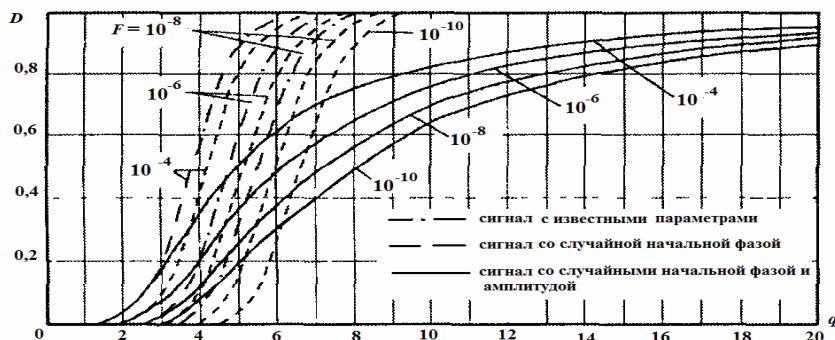


Рис. 4. Условные вероятности правильного обнаружения сигналов с полностью известными параметрами, со случайной начальной фазой и сигналов с релеевскими флуктуациями классической радиолокации

Поскольку кривые обнаружения энергетической теории обнаружения существенно зависят от длительности радиосигнала, то и оценки выигрыша будут разными для разных длительностей радиосигналов. Корректным является сравнение выигрыша для модели детерминированного радиосигнала энергетической теории и кривых обнаружения сигнала со случайной начальной фазой классической теории.

Из формулы r_E/r_A , кривых обнаружения классической радиолокации и энергетической теории (рис. 1 – 4) видно, что в наихудшем случае дальность обнаружения радиолокационной цели при энергетическом критерии обнаружения и неизменном потенциале РЛС при $F=10^{-6}$ $D=0,9$ вырастет больше чем в 1,5 раза для коротких сигналов ($\tau \sim 50\lambda$), которые при обнаружении попали на половину интервала ана-

лиза (в 1,53 раза), и в 1,62 раза для радиосигналов со случайной начальной фазой, которые совпали с интервалом анализа.

Выигрыш в дальности обнаружения для длинных сигналов с $\tau \sim 10^4\lambda$ составляет в идеальном случае 2,3 раза (табл. 1).

Таблица 1

Выигрыш в дальности обнаружения при энергетическом обнаружении

n	W_s/W_n $F=10^{-6}; D=0,9$	q^E	q^A	r_E/r_A
500	0,45	0,9486	6,5	1,618
1000	0,3	0,7746	6,5	1,7
1500	0,25	0,7071	6,5	1,74
4500	0,145	0,538	6,5	1,86
6500	0,1	0,447	6,5	1,95
10^5	0,027	0,2323	6,5	2,299

6. Способы практической реализации энергетического обнаружения радиосигналов

Последовательное (одноканальное) обнаружение. Сущность практического применения предложенного способа энергетического обнаружения радиосигналов [2, 3] заключается в разбиении периода следования радиосигналов T на интервалы времени, равные длительности ожидаемого сигнала τ , и измерении энергии на каждом из них. Полученные значения энергий составляют источник для определения последовательности энергетических отношений правдоподобия $\|L(y^2)\|$.

Энергетическое отношение правдоподобия начальных интервалов анализа определяется как отношение оценки энергии текущего интервала анализа к усредненной энергии шума за предыдущий период следования зондирующих сигналов, а следующие как отношение текущей энергии к усредненной энергии $(i-2)$ интервала анализа. Принятие решения об обнаружении радиосигнала в каждом интервале анализа осуществляется после сравнения значения энергетического отношения правдоподобия $L(y^2)$ для произвольного закона распределения случайных величин с порогом принятия решения L_0 :

$$L(y^2) = W_{sn} \pm \Delta W \sqrt{\frac{W_n}{W_n}} > L_0 \quad \forall i \in 1...m,$$

где $\pm W(y^2)$ – величина энергетических флуктуаций текущего значения энергии шума по отношению к усредненному значению энергии шума и определяет предельную чувствительность способа обнаружения.

При этом процесс энергетического обнаружения позволяет сделать квазиоптимальный прием по энергетике на основании анализа пропорции отношения сигнал+шум/шум в двух интервалах анализа и сдвинуть интервал анализа на расстояние пропорциональное этому отношению, и получить максимальное энергетическое отношение на интервале оценивания. Положение сигнала, квазиоптимальное в энергетическом отношении сигнал+шум/шум, определяется выражением начала этого интервала анализа

$$t_{ц} = t_k - ((W_1 - W_n)/W) \cdot \tau, \quad (7)$$

где $W = (W_1 - W_n) + (W_2 - W_n)$ – энергия сигнала при оптимальном энергетическом обнаружении; $(W_1 - W_n)$; $(W_2 - W_n)$ – энергии сигнала в первом и во втором интервалах анализа; t_k – положение центра двух соседних интервалов анализа, которые превысили порог обнаружения (при равенстве энергий $(W_1 - W_n) = (W_2 - W_n)$ положение сигнала от цели определяется как $(t_k - \tau/2)$); W_n – значение усредненной энергии шума; W_i – значение энергии смеси сигнала и шума в i -м интервале анализа.

Заключительное принятие решения об оптимальном энергетическом обнаружении осуществля-

ется путем поиска максимального значения энергетического отношения правдоподобия при изменении интервала анализа пропорциональному диапазону возможных флуктуаций текущего значения энергии шума по отношению к усредненному значению $\pm \Delta t$:

$$t_{ц} = (t_k - ((W_1 - W_n)/W) \cdot \tau) \pm \Delta t. \quad (8)$$

Способ оптимального последовательного энергетического обнаружения радиосигналов реализуется с помощью алгоритма оптимального энергетического обнаружения радиосигналов на основании проверки статистических гипотез по критерию минимума среднего риска с использованием энергетического отношения правдоподобия представлен на рис. 5.

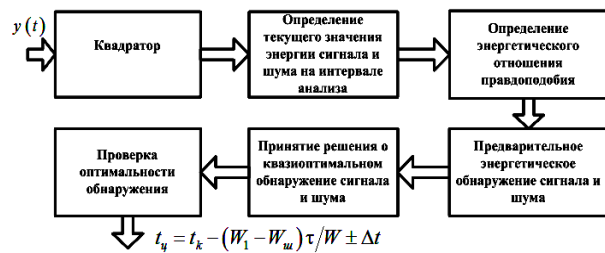


Рис. 5. Алгоритм оптимального последовательного энергетического обнаружения радиосигналов

Параллельное (многоканальное) обнаружение. Недостатком одноканального способа энергетического обнаружения радиосигналов является то, что он не обеспечивает равномерную чувствительность приемника к энергетике радиосигналов на интервале периода излучения зондирующего сигнала вследствие случайного расположения радиосигнала относительно интервала анализа. Это видно из кривых обнаружения радиосигнала (рис. 3) для случая совпадения интервала анализа с радиосигналом и при совпадении интервала анализа с половиной радиосигнала, когда энергия сигнала делится между двумя интервалами анализа.

Способом стабилизации чувствительности радиоприемника при энергетическом обнаружении радиосигналов и случайном их расположении относительно временного интервала анализа, который приблизит кривые обнаружения наихудшего случая к идеальному, то есть сделает чувствительность радиоприемника одинаково наилучшей за период следования зондирующих сигналов, является многоканальное во времени обнаружение и оценивание времени задержки радиосигнала [4].

Задача решается за счет того, что с использованием критерия минимума среднего риска при обнаружении энергии суммы радиосигналов и внутренних шумов радиоприемника на интервале анализа, равному длительности радиосигнала, применяется обработка радиосигналов в N каналах, максимально сдвинутых во времени на $n\Delta t/2$ с задержкой в каждом из них на $m\Delta t$, где Δt – интервал дискретизации, n – количество оцифрованных выборок за длительность радиоим-

пульса. Принятие решения о квазиоптимальном обнаружении радиосигнала осуществляется после анализа энергетических отношений правдоподобия на выходе временных каналов обнаружения по критерию максимума энергетического отношения правдоподобия:

$$\max_{0-T} \left(\frac{W_s + W_n}{\tau_i} / \frac{W_n}{\tau_{i-2}} \right) \geq L_0. \quad (9)$$

Способ оптимального параллельного энергетического обнаружения радиосигналов реализуется с помощью алгоритма энергетического обнаружения суммы энергий радиосигнала и шума, представленного на рис. 6.

Сущность предложенного способа многоканального во времени энергетического обнаружения радиосигналов заключается в суммарном сдвиге входной реализации в N каналах на время, равное половине

длительности радиоимпульса, разбиении периода следования радиосигналов T в каждом временном канале на интервалы времени, равные длительности ожидаемого сигнала τ и измерении энергии смеси сигнала и шума на каждом из них. Полученные значения энергий составляют источник для определения последовательности энергетических отношений правдоподобия. Энергетические отношения правдоподобия первых интервалов анализа определяются как отношение оценки энергии текущего интервала анализа к усредненной энергии шума за предыдущие периоды следования зондирующих сигналов. При этом процесс энергетического обнаружения позволяет принять решение о квазиоптимальном обнаружении по энергетике на основании анализа энергетических отношений правдоподобия в каждом временном канале и нахождения канала с их максимальным значением (9).

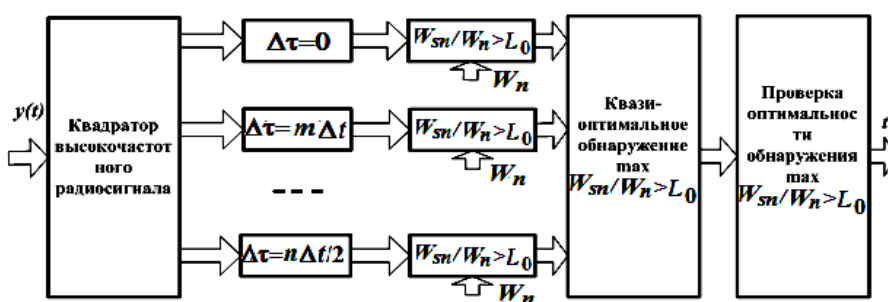


Рис. 6. Алгоритм многоканального оптимального энергетического обнаружения суммы энергий радиосигнала и шума

Заключительное принятие решения об оптимальном энергетическом обнаружении осуществляется путем поиска максимального значения энергетического отношения правдоподобия при последовательном изменении интервала анализа на шаг в диапазоне $\pm \Delta t$ относительно квазиоптимального пропорциональному диапазону возможных флуктуаций энергии внутреннего шума приемника относительно его усредненной энергии.

7. Исследование многоканального обнаружителя радиосигналов

Исследованию подлежал алгоритм, аналогом которого является многоканальный обнаружитель с задержкой сигнала в каждом канале на $m\Delta t \forall m \in 1 \dots n/2$. В каждом канале оценивается энергия сигнала на интервале, равном длительности радиосигнала, и находится отношение оценки энергии текущего интервала анализа к усредненной энергии шума за предыдущий период следования зондирующих сигналов, а следующие как отношение текущей энергии к усредненной энергии шума (i-2) интервала анализа. Принятие решения об обнаружении радиосигнала принимается по критерию максимума энергетического отношения правдоподобия. Предварительные результаты моделирования представлены на рис. 7 и 8.

На рис. 7 приведены графики зависимости среднеквадратичной ошибки определения дальности до цели в длинах волн зондирующего сигнала при длительностях радиосигналов $\tau \sim 100; 200; 300; 500\lambda$ и задержке обработки информации между временными каналами обнаружения $\Delta t: 10\lambda$ при аналого-цифровом моделировании и усреднении 1000 реализаций на каждую точку от энергетического отношения сигнал/шум.

Из анализа графиков рис. 7 видно, что среднеквадратичная ошибка определения интервала времени нахождения суммарной энергии сигнала и шума существенно зависит от отношения энергии сигнала к энергии шума и изменяется от 8λ до $2,5\lambda$ при изменении W_s / W_n в пределах $0,5 \dots 5$ при длительности радиосигнала 100λ и задержке обработки информации между временными каналами обнаружения $\Delta t: 10\lambda$. С увеличением длительности радиосигнала от 100λ до 500λ при малых отношениях энергии сигнала к энергии шума (0,5) среднеквадратичная ошибка оценки дальности до цели возрастает от 8λ до 35λ . При отношениях энергии сигнала к энергии шума $W_s / W_n = 5$ ошибка определения дальности от длины радиосигнала не зависит и составляет $2,5\lambda$.

На рис. 8 приведены графики зависимости среднеквадратичной ошибки определения дальности до цели в длинах волн зондирующего сигнала при длительностях радиосигналов $\tau \sim 100\lambda$ и 200λ и отношениях энергии радиосигнала к энергии шума

$W_s/W_n=2$ и $W_s/W_n=0,5$ при аналого-цифровом моделюванні и усреднении 1000 реализаций на каж-

дую точку от величины задержки обработки информации между временными каналами обнаружения.

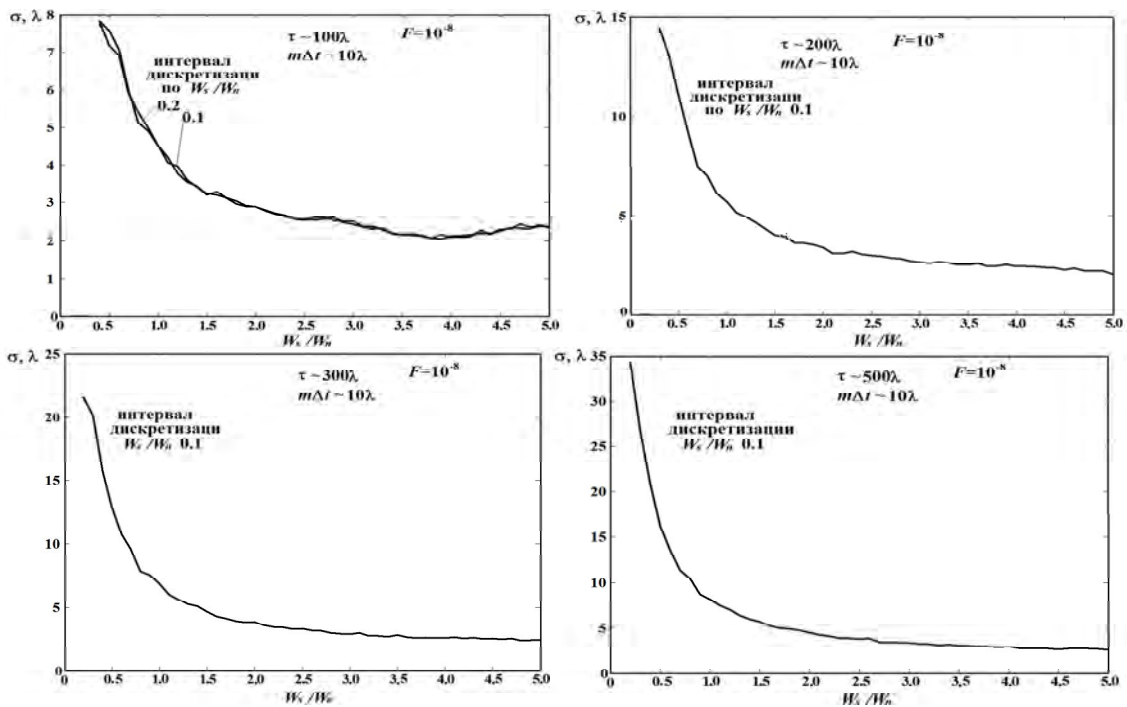


Рис. 7. Графики зависимости среднеквадратичной ошибки определения дальности до цели от энергетического отношения сигнал/шум

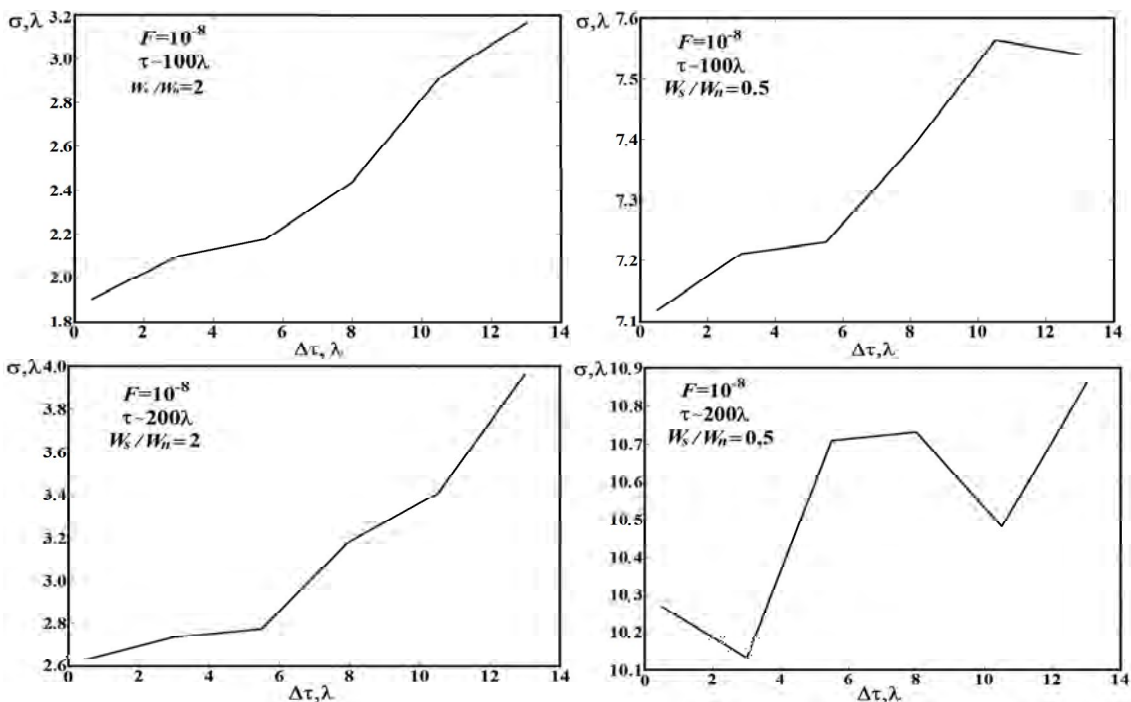


Рис. 8. График зависимости среднеквадратичной ошибки определения дальности до цели от величины задержки между временными каналами обнаружения

Из анализа графиков рис. 8 видно, что среднеквадратичная ошибка определения интервала времени нахождения суммарной энергии сигнала и шума существенно зависит от отношения энергии сигнала к энергии шума и изменяется примерно на λ при изменении задержки между временными каналами обнаружения от λ до 10λ .

8. Функция рассогласования (неоднозначности, неопределенности) радиосигналов

Рассогласование параметров когерентных сигналов оценивается по выходному эффекту средства обработки радиосигналов. Выходной эффект классической системы обработки – это модуль корреля-

ционного интеграла $|Z(\alpha_c, \alpha)| = \Psi(\alpha_c, \alpha)$. Последний считают оптимизированным для ожидаемого сигнала на фоне некоррелированных стационарных внутренних шумов радиоприемника с фиксированной плотностью мощности. Совокупный векторный параметр сигнала α_c рассогласован по отношению к ожидаемому параметру α , что существенно при обнаружении, измерении и различении. Принятый сигнал $Y(t) = X(t, \alpha_c)$ считают без влияния дополнительных помех, но с рассогласованным значением параметра α_c . Функция рассогласования

$$\Psi(\alpha_c, \alpha) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} X^T(t, \alpha_c) X^*(t, \alpha) dt \right|$$

Нормированная функция рассогласования

$$\rho(\alpha_c, \alpha) = \Psi(\alpha_c, \alpha) / \sqrt{\Psi(\alpha_c, \alpha_c) \Psi(\alpha, \alpha)}$$

В энергетической теории обнаружения выходной эффект процесса обработки сигналов – это определение текущего энергетического отношения правдоподобия суммы радиосигнала и шума к усредненной энергии шума за несколько предыдущих интервалов анализа, равных длительности радиосигнала и сравнение с порогом обнаружения.

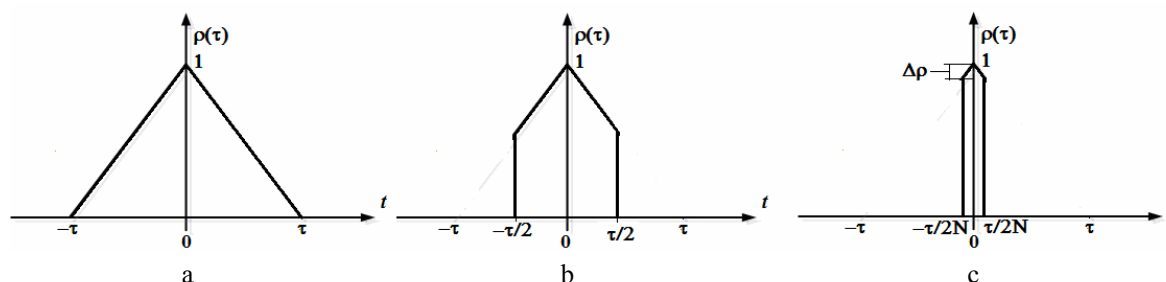


Рис. 9. Нормированная функция рассогласования при обнаружении энергии суммы радиосигнала и шума

На рис. 9, а представлена функция рассогласования для одного интервала анализа. При последовательном обнаружении функция рассогласования имеет вид рис. 9, б, а при многоканальном обнаружении – рис. 9, с.

При энергетическом последовательном обнаружении попадание радиосигнала на два интервала анализа, то есть когда энергия радиосигнала поровну делится между двумя интервалами анализа – это наихудший случай, который вероятен. Этот недостаток устраняется путем использования многоканального обнаружителя. Не совпадение радиосигнала с интервалом анализа ведет к энергетическим потерям. Максимальные относительные энергетические потери $\Delta\rho$ при обнаружении определяются величиной текущих энергетических флуктуаций шума относительно его усредненной энергии на интервале статистического анализа и зависят от длительности радиоимпульса. Ширина пика функции рассогласования при многоканальном обнаружении определяется интервалом дискретизации задержек

При этом рассогласованная функция зависит от одного параметра τ , что физически означает степень отклонения определяемого значения энергетического отношения правдоподобия от интервала анализа. Нормированная функция рассогласования – это отношение модуля корреляционного интеграла между энергетическим отношением правдоподобия и функцией анализа во времени к модулю согласованного во времени энергетического отношения правдоподобия:

$$\rho_E(\tau) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} L(t-\tau) A^*(t) dt \right| / |L(t)|,$$

где $A^*(t)$ – положение оптимальной функции анализа

$$A^*(t) = \begin{cases} 1 & t = \tau_{и}; \\ 0 & t > \tau_{и}; \end{cases}$$

$L(t-\tau)$ – рассогласованное во времени энергетическое отношение правдоподобия;

$L(t)$ – согласованное во времени энергетическое отношение правдоподобия.

На рис. 9 представлена нормированная функция рассогласования при обнаружении суммы энергий радиосигнала и шума.

между каналами $\Delta\tau = \tau / N$, где N – число каналов обработки информации.

При энергетическом обнаружении в широкой полосе средства АЦП значения доплеровской частоты и формы радиосигнала не влияют на оптимальное обнаружение суммарной энергии сигнала и шума, что важно для оптимального обнаружения в случае априорной неопределенности формы и несущей частоты радиосигнала.

9. Энергетическое обнаружение радиосигналов при влиянии активных шумовых помех

Распознавание влияния маскирующих шумовых помех возможно за счет запоминания значения уровня собственных шумов предыдущих измерений W_n при априорном отсутствии активных помех, что видно из анализа энергетического отношения правдоподобия [5]:

$$\max_{0-T} (W_s + W_n + W_{ai}) / W_n > L_0, \quad (10)$$

где W_{ai} – абсолютный энергетический уровень активной помехи; W_s – энергетический уровень радиосигнала; W_n – энергетический уровень внутреннего шума.

Порог энергетического обнаружения активной маскирующей помехи L_0 определяется из уравнения (5) и имеет значение (6). При отсутствии сигнала отношение энергетического правдоподобия показывает относительный уровень активной помехи. Длительность воздействия активной помехи определяется количеством интервалов, где произошло превышение порога обнаружения. Чувствительность критерия к обнаружению сигнала на фоне активных маскирующих помех определяется из такого энергетического отношения правдоподобия:

$$\max_{0-T} \frac{(W_{sn} + W_{ai} + \Delta W)}{\tau_i} / \frac{(W_n + W_{ai})}{\tau_{i-2}} > L_1 \quad (11)$$

Обнаружение начала интервала расположения суммарной энергии сигнала, активной маскирующей помехи и внутреннего шума осуществляется по методике аналогичной обнаружению суммарной энергии активной маскирующей помехи и внутреннего шума приемника.

При последовательном обнаружении в выражении (7) для t_{ci} значение W_i – значение энергии смеси сигнала, активной маскирующей помехи и шума в i -м интервале анализа;

$$W = (W_1 - W_{n\Sigma}) + (W_2 - W_{n\Sigma}) -$$

значение энергии сигнала при оптимальном энергетическом обнаружении; $(W_1 - W_{n\Sigma})$, $(W_2 - W_{n\Sigma})$ – уровни энергии радиосигнала в первом и во втором интервалах анализа; $W_{n\Sigma} = W_n + W_{ai}$ – уровень энергии гауссовых внутренних шумов и активной маскирующей помехи; ΔW – уровень флуктуаций текущего значения энергии шума относительно ее усредненного значения, L_1 – порог энергетического обнаружения радиосигнала при воздействии активной маскирующей помехи определяется из уравнения (5) и имеет значение (6) с учетом суммарной дисперсии гауссовых внутренних шумов и активной маскирующей помехи.

На рис. 10 представлена общая схема способа энергетического обнаружения радиосигналов при влиянии активных маскирующих помех на основании проверки статистических гипотез по критерию минимума среднего риска с использованием разных энергетических отношений правдоподобия (10, 11).

На рис. 11 представлена иллюстрация способа энергетического обнаружения радиосигнала на фоне активной маскирующей помехи (а), по энергетике в 2 раза превосходящей уровень собственных шумов без учета флуктуаций текущего значения энергии суммы радиосигнала, собственных шумов и помех относительно усредненного уровня энергии суммы собственных шумов и помех (б). Результаты исследования устойчивости энергетического критерия при влиянии активных шумовых помех при 10% флуктуациях представлены на рис. 12.

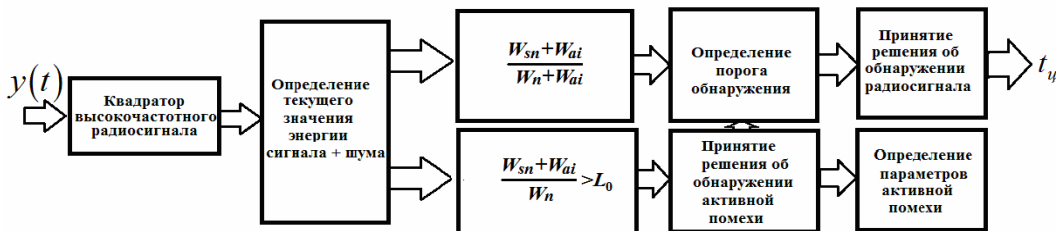


Рис. 10. Общая схема способа энергетического обнаружения радиосигналов при влиянии активных маскирующих помех

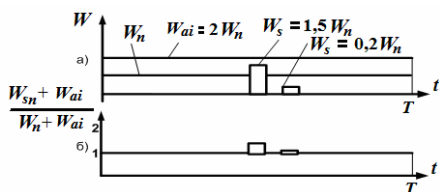


Рис. 11. Иллюстрация энергетического критерия обнаружения радиосигнала на фоне активной маскирующей помехи

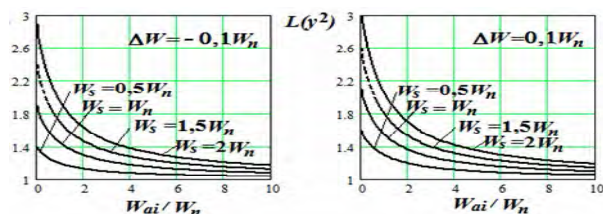


Рис. 12. Результаты исследования устойчивости энергетического критерия при влиянии активных шумовых помех

Выводы

Предложенный вариант теории энергетического обнаружения радиосигнала на фоне внутреннего шума отличается самой постановкой задачи: обнаруживаются не амплитуды радиосигналов, а интервалы времени, где относительная суммарная энергия сигнала и шума превышает порог обнаружения.

Энергетический подход позволяет более объективно описать процесс обнаружения сигналов с про-

извольным законом распределения амплитудных флуктуаций при влиянии активных маскирующих помех и имеет большое значение для практического применения, как в радиолокации, так и в радиотехнике. Он позволяет, например, увеличить время предупреждения о начале землетрясения в сейсмически опасных районах, увеличить дальность обнаружения в радиолокационных системах при том же потенциале в 1,5...2 раза (или уменьшить потенциал минимум на порядок для выполнения заданной задачи).

Использование критерия минимума среднего риска при рассмотрении задачи энергетического обнаружения является простым и достаточно универсальным способом статистической оптимизации.

Предварительные исследования показали следующие недостатки классической теории обнаружения сигналов и её практической реализации: Отношение правдоподобия не опирается на закон сохранения энергии. Отношение правдоподобия не измеряется и непосредственно не используется в качестве критерия для принятия решения об обнаружении радиосигналов. Использование отношения правдоподобия принципиально не позволяет обнаруживать радиосигналы меньшие по энергетике внутренних шумов.

Недостатки практической реализации теоретических основ обнаружения:

В радиоприемниках ведется амплитудная обработка радиосигналов, не учитывая того, что отношение правдоподобия удерживает энергетические показатели. При обнаружении радиосигналов не учитывается их длительность, что ведет к росту ложных тревог. Так ложное обнаружение даже миллисекундных радиосигналов без учета их длительности возможно любыми амплитудными выбросами случайного процесса. Стабилизация ложных тревог требует высоких отношений сигнал/шум и высоких порогов обнаружения, что ведет к большим энергетическим затратам радиопередающих устройств.

Оптимальный фильтр для прямоугольного радиосигнала с энергетической точки зрения не является оптимальным вследствие того, что увеличивает длительность радиосигнала в два раза и уменьшает энергию радиосигнала в два раза.

Использование приведенного альтернативного варианта энергетического обнаружения радиосигна-

лов от цели цифровыми РЛС открывает перспективу построения новых низкочастотных радиолокаторов с автоматическим распознаванием воздействия активных маскирующих помех, повышения боевых возможностей существующих РЛС. Результаты исследований могут быть обобщены на радиотехнические системы, где используется процесс обнаружения и оценивания параметров радиосигналов на фоне внутреннего шума и радиопомех.

Материалы статьи полезны для широкого круга специалистов в отрасли радиолокации, которые занимаются фундаментальными теоретическими исследованиями и практическими разработками радиотехнических систем.

Список литературы

1. *Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. Справочник / Под ред. Я.Д. Ширмана.* – М.: ЗАО «МАКВИС», 1998. – 828 с.
2. *Метод энергетичного виявлення радіосигналів / Г.В. Певцов та інші. // Системи управління, навігації та зв'язку.* – К.: ДП «ЦНДІ НІУ», 2010. – Вип. 4(16). – С. 72-76.
3. *Патент на корисну модель 57216. Україна, МПК G01S 7/02. Процес енергетичного виявлення радіосигналів / Г.В.Певцов, А.Я.Яцуценко, та ін.; – №201012202; заявл. 15.10.2010; опубл. 10.02.2011, Бюл. №3.*
4. *Патент на корисну модель 64707. Україна, МПК G01S 7/34. Спосіб багатоканального за часом енергетичного виявлення радіосигналів / Певцов Г.В., Яцуценко А.Я. и др.; №201106721; заявл. 30.05.2011; опубл. 10.11.2011, Бюл. №21.*
5. *Патент на корисну модель 64706. Україна, МПК G01S 7/34. Спосіб енергетичного виявлення радіосигналів при впливі активних маскуючих перехід / Певцов Г.В., Яцуценко А.Я. и др. В.І.; №201106697; заявл. 30.05.2011; опубл. 10.11.2011, Бюл. №21.*
6. *Певцов Г.В. Основи енергетичного виявлення-оцінювання параметрів радіосигналів / Г.В. Певцов, А.Я. Яцуценко, Д.В. Карлов, Ю.В. Трофименко, О.О. Клімішєн, А.М. Остапова // Сборник научных трудов. 4-го Межд. радиоэлектронного форума (МРФ 2011). – Х., 2011. – С. 192-195.*
7. *Pevtsov G. Theoretical Basics of Radar Signals Energy Detection / G. Pevtsov, A. Yatsutsenko, Yu. Trofimenko, D. Karlov, M. Bortsova [Electron recourse]: Proc. of the 14th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. – Kharkov.: KNAME. – 2012. – 1 CD-ROM.*

Поступила в редколлегию 27.08.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

РОЗВИТОК ТЕОРІЇ ВІЯВЛЕННЯ РАДІОСИГНАЛІВ. ОСНОВИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ВІЯВЛЕННЯ

Г.В. Певцов, А.Я. Яцуценко, Д.В. Карлов, М.Ф. Пічугін, Ю.В. Трофіменко, О.Ю. Чернявський, М.В. Борцова

Висловлюється альтернативний варіант енергетичної теорії виявлення радіосигналів, розробленої на підставі обліку закону збереження енергії М.В. Ломоносова і байєсовської безумовної оптимізації статистичних рішень. Енергетичне виявлення радіосигналу – це пошук інтервалу часу, де сумарна енергія сигналу і шуму по відношенню до усередненої енергії внутрішнього шуму перевищує поріг виявлення із заданими якісними показниками. Розглядаються способи послідовного і паралельного енергетичного виявлення радіосигналів на радіочастоті по енергетиці, сумірних або менших рівня внутрішнього шуму радіоприймача, без урахування і з урахуванням впливу зовнішніх активних маскуючих перехід.

Ключові слова: радіосигнал, статистичне рішення, енергія, радіочастота.

RADIO-SIGNALS DETECTION THEORY DEVELOPMENT. FUNDAMENTALS OF ENERGY DETECTION

G.V. Pevtsov, A.Ya. Yatsutsenko, D.V. Karlov, M.F. Pichugin, Yu.V. Trofimenko, O.Yu. Chernyvskiy, M.V. Bortsova

An alternative variant of radio-signals energy detection theory developed on the basis of M. Lomonosov energy conservation law and Bayes unconstrained optimization of statistical decisions is considered. Radio-signal energy detection implies search of a time interval where the total signal-and noise energy against average internal noise energy exceeds the detection

threshold with the given qualitative measure. The methods of sequential and parallel radio-signals energy detection at radio frequency for the signals commensurable or lower than the level of radio-receiver internal noise when the influence of external active masking interference is not taken and taken into account are discussed.

Keywords: *radio signal, statistical decision, energy, radio frequency.*