

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 ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАДИОСИГНАЛОВ. ОСНОВЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОЦЕНИВАНИЯ

Излагается альтернативный вариант энергетической теории оценивания параметров радиосигналов, разработанной на основании учета закона сохранения энергии М.В. Ломоносова и байесовской безусловной оптимизации статистических решений. Энергетическое оценивание параметров радиосигналов – это поиск максимального значения суммарной энергии сигнала и шума по отношению к усредненной энергии внутреннего шума при сложении (умножении) обнаруженной входной реализации с изменяемыми эталонными радиосигналами на множестве возможных значений в условиях их априорной неопределенности или в узком диапазоне параметров в условиях априорной определенности.

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 оценивания ставится задача найти эталонный радиосигнал с искомыми параметрами, при котором энергетическое отношение правдоподобия приобретает максимальное значение при корреляционной обработке обнаруженной входной реализации со множеством эталонных радиосигналов.

2. Сущность энергетической теории оценивания параметров радиосигналов

В основу теории измерения параметров радиосигналов при энергетическом подходе, как и в классическом случае, положена минимизация условного среднего риска для каждой реализации y путем подбора оценки $\hat{\alpha} = \hat{\alpha} \left[(y + x_{etj})^2 \right] \forall j \in N$ при заданных функциях стоимости и использовании апостериорного энергетического отношения правдоподобия как измерительного инструмента.

Регулярная оценка максимума апостериорной плотности вероятности суммы энергий сигнала и шума находится из условия

$$\frac{\partial p(\alpha / y^2)}{\partial \alpha_i} = 0 \quad \text{при } \alpha = \hat{\alpha},$$

где $i = 1, 2, \dots, m$ и совпадает с оценкой апостериорного математического ожидания. При отсутствии априорных данных $p(\alpha) = \text{const}$ плотность вероятности $p(\alpha / y^2)$ заменяется на функцию энергетическо-

го правдоподобия $p(y^2 / \alpha)$, энергетическое отношение правдоподобия $L(\alpha / y^2)$. Это приводит к условию максимума энергетического отношения прав-

доподобия $\frac{\partial p(y^2 / \alpha)}{\partial \alpha_i} = 0$ при $\alpha = \hat{\alpha}$, или к

$$\frac{\partial L(y^2 / \alpha)}{\partial \alpha_i} = 0 \quad \text{при } \alpha = \hat{\alpha},$$

что означает – после приёма реализации y при отсутствии априорных данных регулярная оптимальная оценка $\hat{\alpha}$ находится из условия максимума энергетического отношения правдоподобия на выходе приёмника обнаружения при использовании множества возможных значений α эталонных (ожидаемых) сигналов. В отличие от классической теории оценивания использование энергетического отношения правдоподобия позволяет оценить значения параметров радиосигналов по энергетике меньших уровня внутренних шумов.

Измерение (оценка) параметров обнаруженного радиосигнала осуществляется путем определения максимума энергетического отношения правдоподобия суммы входного радиосигнала, шума и эталонного радиосигнала с переменными параметрами, определенного на множестве N , для простой функции стоимости (в теоретическом плане – максимума функционала энергетического отношения правдоподобия как отношения плотности вероятности распределения энергий суммы радиосигнала, шума и эталонного радиосигнала на интервале изменения его параметров к плотности вероятности распределения энергии внутреннего шума):

$$\max_j \left((W_{sn} + W_{etj}) / W_n \right) \quad \forall j \in 1 \dots N.$$

3. Проверка возможности синтеза измерительных систем на основе энергетического отношения правдоподобия

Замысел измерения параметров слабых радиосигналов заключается в обнаружении радиосигнала (определении интервала времени, где находится радиосигнал, и определении его абсолютной величины энергии относительно усредненного уровня внутренних шумов) [2,3], сложении или перемножении оцифрованных выборок смеси радиосигнала и шума, с множественным числом эталонных сигналов (корреляционная обработка радиосигналов), которые сформированы на основании априорных данных или измерения их, по энергетике соизмеримой с энергетикой обнаруженного сигнала на высокой частоте с непрерывной оценкой энергетического отношения правдоподобия на каждом шаге анализа с поиском его максимума на интервале оценивания (существования радиосигнала) при использовании когерентных свойств радиосигналов [6].

Метод синтеза оптимальных систем приема радиосигналов основывается на критерии минимума среднего риска при использовании максимума энергетического отношения правдоподобия.

Обнаружение радиосигналов в энергетической теории осуществляется путем сравнения максимума энергетического отношения правдоподобия суммы энергий входного радиосигнала и шума к усредненной энергии внутреннего шума с порогом обнаружения, который определяется из выражения условной вероятности ложных тревог для модели χ^2 -распределения суммы квадратов амплитуд шумовых выборок для гауссовой модели флуктуаций внутренних шумов [3].

Байесовский подход к синтезу оптимальной приемной системы требует учета всех априорных сведений о параметрах радиосигналов и основных задачах РЛС.

Из классической теории радиолокации известна высокая точность фазовых методов оценивания координат при устранении неоднозначности оценивания.

Исследованию подлежала возможность использования фазового метода в энергетической теории обнаружения и оценивания параметров радиосигналов по энергетике меньших или соизмеримых с внутренними шумами для оценки начальной фазы и доплеровской частоты.

С целью оценки возможностей использования фазового метода при энергетическом подходе оценивания исследованию подлежала детерминированная модель не модулированной суммы входного $a_s \cdot \sin((2\pi(f + f_{\text{дс}})\tau + \varphi_s))$ и эталонного радиосигналов $a_{\text{ет}} \sin((2\pi(f + f_{\text{ет}})\tau + \varphi_{\text{ет}}))$ на частоте $f = 2 \cdot 10^7$ Гц для разных длительностей радиосигналов $\tau = 10^{-6}, \dots, 10^{-3}$ с при $a_s = a_{\text{ет}} = 1$ и частоте дискретизации $f_{\text{ц}} = 2 \cdot 10^8$ Гц.

Энергия суммарного радиосигнала детерминированной модели без учета внутреннего шума имеет вид:

$$W_{\Sigma}(y^2(\tau)) = \left[\sum_{i=1}^n \left(a_{si} \sin((2\pi(f + f_{\text{дс}})\tau + \varphi_s)) + a_{eti} \sin((2\pi(f + f_{\text{ет}})\tau + \varphi_{\text{ет}})) \right) \right]^2$$

Зависимость энергии суммарного радиосигнала от цели с выхода сумматора при последовательном оценивании доплеровской частоты при длительности радиосигнала $\tau = 4,85 \cdot 10^{-4}$ с и $\tau = 9,7 \cdot 10^{-4}$ с представлена на рис. 1 в диапазоне изменения эталонных радиосигналов $\pm 10^3$ Гц с шагом изменения доплеровской частоты 5 Гц.

Доплеровская частота входного радиосигнала составляет 100 Гц. Квазиоптимальная оценка частоты составляет 120 Гц (рис. 1, а). При увеличении длительности радиосигнала в два раза (рис. 1, б) точность оценки доплеровской частоты повышается и приближается к интервалу дискретизации эталонных радиосигналов.

Зависимость энергии суммарного радиосигнала от цели с выхода сумматора при оценивании начальной фазы в диапазоне изменения начальной фазы $[0, 2\pi]$ представлена на рис. 2.

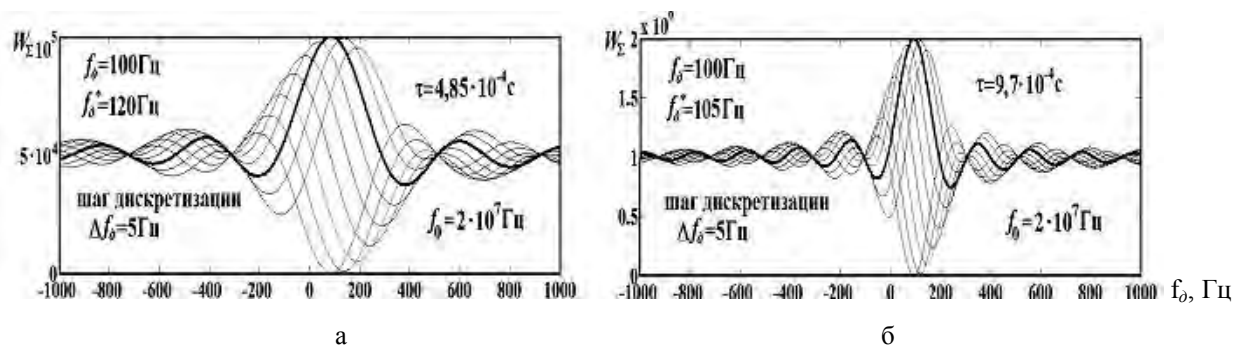


Рис. 1. Зависимость энергии суммарного радиосигнала в диапазоне доплеровских частот с выхода сумматора при квазиоптимальном последовательном оценивании

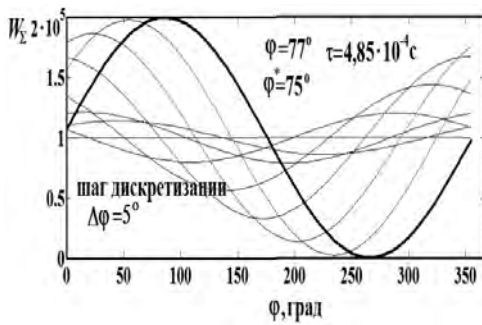


Рис. 2. Зависимость энергии суммарного радиосигнала от начальной фазы

Начальная фаза входного радиосигнала для доплеровской частоты 100 Гц задавалась 77°. Квазиоптимальная оценка начальной фазы составляла 75° при шаге дискретизации эталонного радиосигнала 5°. Ошибка определения начальной фазы входного когерентного радиосигнала от длительности радиосигнала не зависит, а зависит от интервала дискретизации эталонного сигнала. График зависимости максимальной ошибки определения доплеровской частоты радиосигнала от его длительности по максимуму суммарной энергии для корреляционного способа обработки информации представлен на рис. 3.

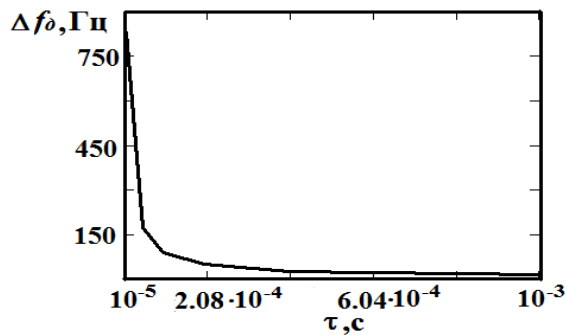


Рис. 3. Зависимость точности определения доплеровской частоты от длительности радиосигнала

При увеличении длительности радиосигнала до секундных интервалов возникает неоднозначная оценка доплеровской частоты и начальной фазы радиосигнала. Зависимость энергии суммарного длинного радиосигнала в диапазоне доплеровских частот с выхода сумматора при квазиоптимальном последовательном оценивании представлена на рис. 4. На рис. 4, а при заданной доплеровской частоте обнаруженного радиосигнала 20 Гц, оценка её составляет -4015 Гц. Изменение шага дискретизации неоднозначность измерения не устранила (рис. 4, б).

Предлагается предварительная классификация радиосигналов на короткие и длинные. Под короткими радиосигналами понимаются радиосигналы такой длительности, при которой отсутствует неоднозначность оценивания доплеровской частоты и начальной фазы при простейшем методе оценки искомых параметров.

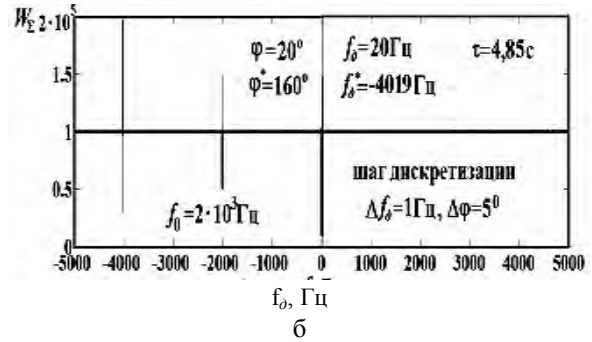
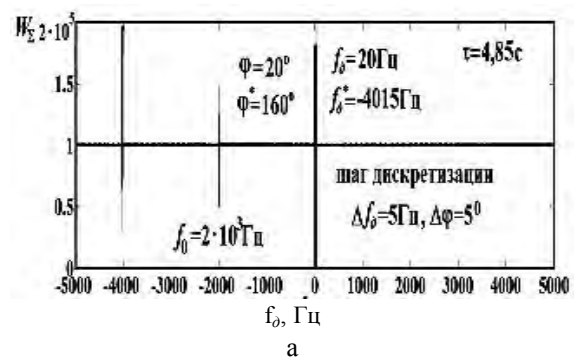


Рис. 4. Зависимость энергии суммарного длинного радиосигнала в диапазоне доплеровских частот с выхода сумматора при квазиоптимальном последовательном оценивании

Метод базируется на поиске максимального энергетического отношения правдоподобия при сложении обнаруженной выборки смеси радиосигнала и шума с совокупностью эталонных радиосигналов с переменными начальными фазами и доплеровскими частотами на множестве их возможных значений. Для уменьшения вычислительных затрат предлагается двухэтапное (и более) оценивание с разной дискретизацией эталонных радиосигналов – квазиоптимальное и оптимальное оценивание. Общая схема метода оценки доплеровской частоты и начальной фазы коротких когерентных немодулированных радиосигналов в энергетической теории обнаружения и оценивания при использовании эталонных радиосигналов [6] представлена на рис. 5.

Из предыдущих исследований следует, что для однозначного оценивания начальной фазы и доплеровской частоты длинных радиосигналов необходимо выбирать такие выборки из них, чтобы обеспечить заданные ошибки и устранить неоднозначность оценивания.

При цифровой обработке информации для оценивания доплеровской частоты короткого радиосигнала с заданными ошибками необходимо создавать псевдопачку из обнаруженной смеси радиосигнала и шума путем смыкания её повторений к необходимой длительности, при которой обеспечивается однозначность оценивания. Способ оценки начальной фазы и доплеровской частоты коротких радиосигналов в энергетической теории оценивания с заданным качеством представлен на рис. 6.

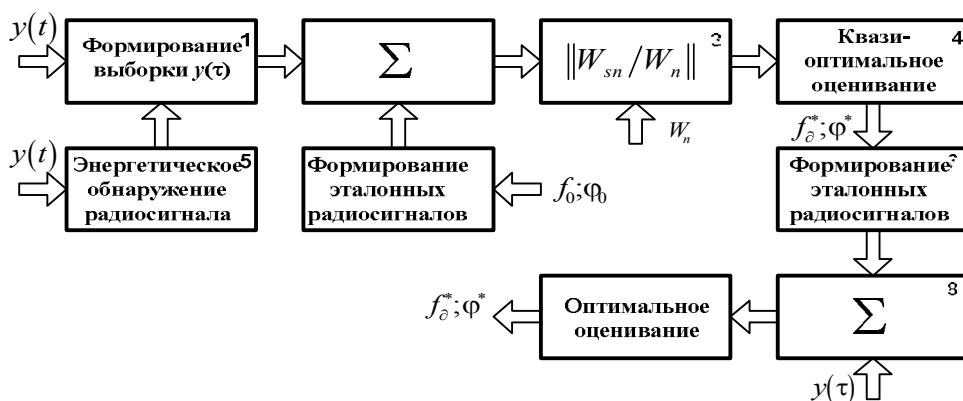


Рис. 5. Общая схема метода оценки начальной фазы и доплеровской частоты коротких радиосигналов в энергетической теории обнаружения и оценивания

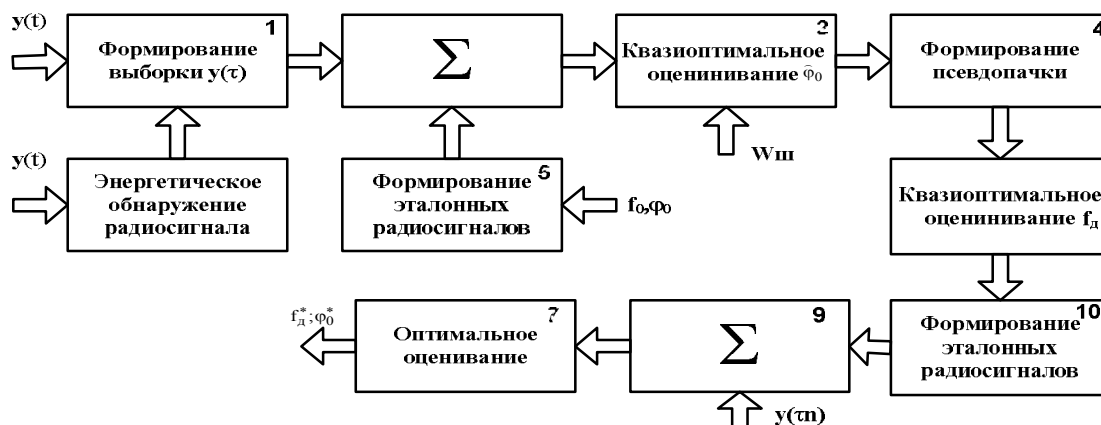


Рис. 6. Способ оценки начальной фазы и доплеровской частоты коротких радиосигналов в энергетической теории оценивания с заданным качеством

4. Исследование возможности оценивания доплеровской частоты и начальной фазы длинных радиосигналов

Цель исследования – определить закономерности зависимости энергетического отношения правдоподобия от параметров радиосигналов и оценить возможности использования их для синтеза измерительного алгоритма.

Методика исследования:

- установить диапазон изменения доплеровских частот для известных классов объектов для выбранной несущей частоты;
- оценить частотные свойства энергетического отношения правдоподобия для радиосигналов разной длительности;
- установить зависимость энергетического отношения правдоподобия в диапазоне однозначного изменения начальных фаз эталонных радиосигналов для разных доплеровских частот длинного радиосигнала;
- оценить степень влияния расфазировки между принятым и эталонным радиосигналами на энергетическое отношение правдоподобия;

- оценить степень влияния флуктуаций текущего значения энергии шума относительно усредненного значения на возможность измерения доплеровской частоты радиосигналов по энергетике соизмеримых с энергетикой шума и меньших её;
- оценить необходимость использования квадратурной обработки радиосигналов;
- оценить возможности определения доплеровских частот всех известных классов объектов на выбранной несущей частоте.

Поскольку использование оптимальной фильтрации с энергетической точки зрения ведет к уменьшению энергии радиосигнала (оптимальный фильтр удлинит радиосигнал вдвое, а, следовательно, уменьшает энергию сигнала вдвое), то рассмотрим возможности использования безинерционной корреляционной обработки радиосигналов с использованием энергетического отношения правдоподобия.

С целью оценки возможностей использования фазового метода в энергетической теории обнаружения и оценивания для корреляционного способа обработки длительных радиосигналов исследованию подлежала детерминированная модель суммы гармонических входного

$$a_s \cdot \cos((2\pi(f_0 + f_{ds})\tau + \varphi_s))$$

и эталонного радиосигналов

$$a_{et} \cdot \cos((2\pi(f_0 + f_{\delta et})\tau + \varphi_{et}))$$

на частоте $f_0 = 2 \cdot 10^8$ Гц и эквивалентной амплитуды шума n_{ekv} , определенной из усредненной энергии шума, для разных длительностей радиосигналов $\tau = 10^{-1} \dots 10^{-8}$ с :

$$y_j(t) = a_s \cdot \cos((2\pi(f_0 + f_{\delta s})\tau + \varphi_s) + n_{ekv} + a_{et} \cos((2\pi(f_0 + f_{\delta etj})\tau + \varphi_{etj})).$$

Энергетическое отношение правдоподобия детерминированной модели имеет вид:

$$L(a_s, n_{ekv}, f_{\delta s}, a_{et}, \varphi_{etj}) = \frac{\left[a_s \cos((2\pi(f_0 + f_{\delta s})\tau + \varphi_s) + n_{ekv} + a_{et} \cos((2\pi(f_0 + f_{\delta etj})\tau + \varphi_{etj})) \right]^2}{(n_{ekv})^2}.$$

4.1 Диапазон изменения доплеровских частот для известных классов объектов

Интерес представляет оценка возможности измерения доплеровской частоты в диапазоне скоростей известных объектов, особенно в космическом пространстве, что необходимо для достоверной предварительной классификации сигналов от разных целей по одному измерению.

Зависимость доплеровской частоты радиосигналов от модуля вектора для разных несущих частот радиосигнала определяется известным выражением

$$f_{\delta} = \frac{2V_r f_0}{c},$$

где c – скорость света, V_r – радиальная составляющая модуля вектора скорости объекта и представлена на рис. 7.

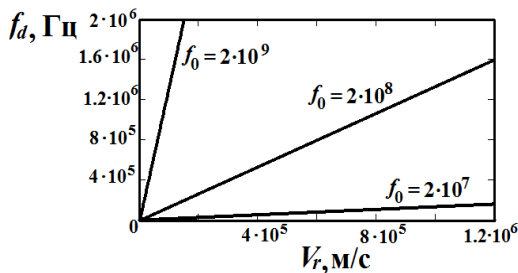


Рис. 7. Зависимость доплеровской частоты отраженного радиосигнала от скорости цели

Спектр доплеровских частот радиосигналов (головных эхо-сигналов), которые отражаются от подвижных ионизированных образований метеорных частиц ($V=10 \dots 80$ км/с) для выбранной несущей частоты, составляет соответственно

$$f_{\delta} = 1,333 \cdot 10^4 \dots 1,067 \cdot 10^5 \text{ Гц}.$$

Скорости 500 км/с достигает движущаяся вдоль межпланетных силовых линий солнечная плазма, что соответствует доплеровской частоте

$f_{\delta} = 6,667 \cdot 10^5$ Гц. Максимальная ожидаемая на выбранной несущей доплеровская частота радиосигнала от известных объектов составляет на $f_0 = 2 \cdot 10^8$ Гц $f_{\delta} = 0,7 \cdot 10^6$ Гц.

4.2 Частотные свойства энергетического отношения правдоподобия для радиосигналов разной длительности

Определим полосу однозначности энергетического отношения правдоподобия.

Зависимость энергетического отношения правдоподобия при разных длительностях радиосигнала при равных начальных фазах эталонного и анализируемого радиосигнала в диапазоне изменения частоты эталонного радиосигнала ± 3 кГц для разных доплеровских частот отраженного от цели радиосигнала (на несущей частоте $f_0 = 2 \cdot 10^8$ Гц) представлена на рис. 8.

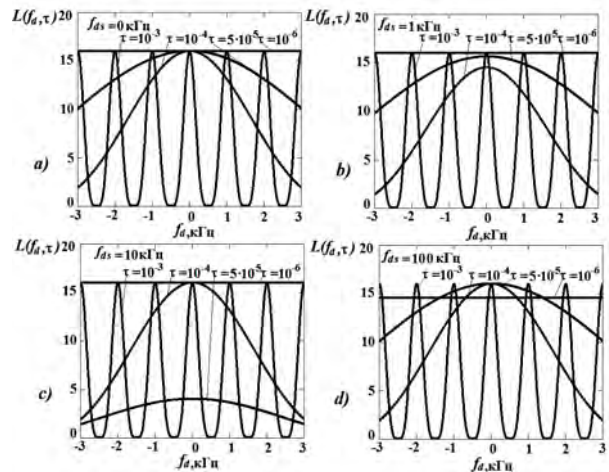


Рис. 8. Зависимость энергетического отношения правдоподобия от доплеровской частоты в диапазоне ± 3 кГц при разных длительностях радиосигнала при равных начальных фазах эталонного и анализируемого радиосигналов

Из анализа рис. 8 видно, что для однозначного оценивания доплеровской частоты разных классов объектов необходимы разные длительности радиосигналов, что эквивалентно разным полосам пропускания радиоприемника. Данный рисунок не позволяет полностью представить всю динамику изменения доплеровской частоты. Распределения энергетических отношений правдоподобия в полосе доплеровских частот для разных длительностей радиосигналов представлены на рис. 9.

Из рис. 9 видно, что полосы однозначного определения энергетического отношения правдоподобия для разной длительностей радиосигналов – разные. Для высокоточного оценивания доплеровской частоты необходимо использование радиосигналов секундных длительностей.

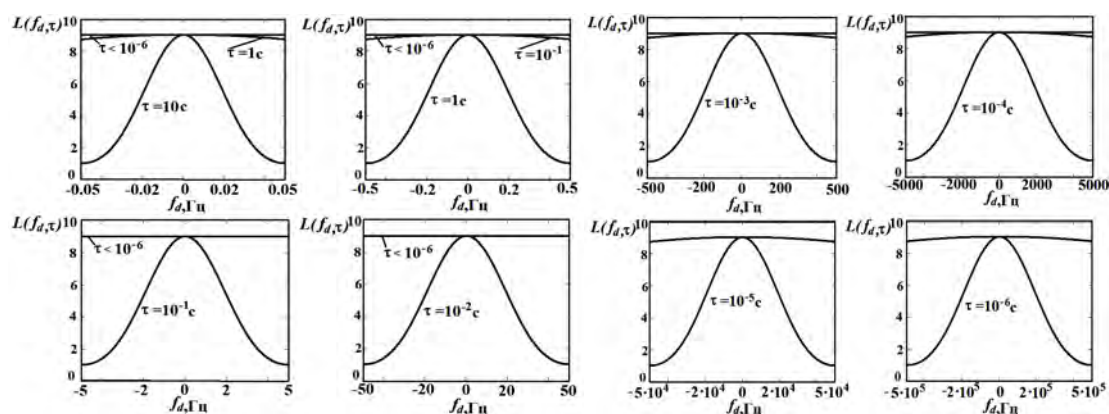


Рис. 9. Распределения энергетических отношений правдоподобия в полосе доплеровских частот для разных длительностей радиосигналов

4.3 Степень влияния расфазировки между принятым и эталонным радиосигналами и уровня обнаруженного радиосигнала на энергетическое отношение правдоподобия

Зависимость энергетического отношения правдоподобия в широкополосном канале оценивания

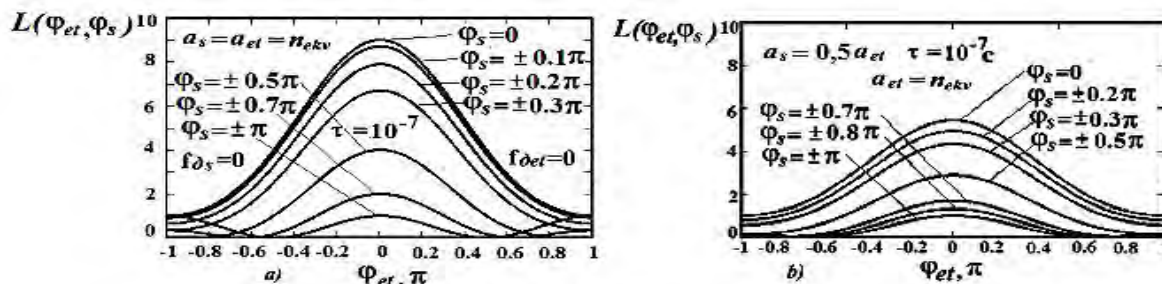


Рис. 10. Зависимость энергетического отношения правдоподобия в широкополосном канале оценивания

Изменения начальной фазы обнаруженного радиосигнала при нулевой начальной фазе эталонного радиосигнала в диапазоне $[-\pi; \pi]$ ведет к изменению абсолютной величины энергетического отношения правдоподобия. При расфазировке обнаруженного радиосигнала по отношению к эталонному абсолютная величина энергетического отношения правдоподобия при равенстве амплитуд обнаруженного, эталонного радиосигнала и эквивалентной амплитуды шума имеет диапазон изменения 8. При уменьшении амплитуды обнаруженного радиосигнала вдвое (рис. 10, b) диапазон изменения энергетического отношения правдоподобия тоже уменьшается вдвое.

($\tau = 10^{-7}; 10^{-8}$ c) для известных классов объектов в диапазоне фаз эталонного радиосигнала при изменении начальных фаз оцениваемого для одинаковых и разных амплитуд принятого, эталонного и эквивалентного шумового сигнала представлена на рис. 10.

Зависимость энергетического отношения правдоподобия от начальных фаз более слабых (чем на рис. 10, b) принятого и эталонного радиосигналов при отсутствии и наличии частотных сдвигов в широкополосном канале представлена на рис. 11, a, b.

Из анализа рисунков следует, что в широкополосном радиоканале доплеровская частота от известных классов объектов не влияет на значения энергетического отношения правдоподобия. Диапазон изменения значения энергетического отношения правдоподобия для слабых радиосигналов уменьшается при расфазировке. Следовательно, уменьшается точность установления степени расфазировки сигналов.

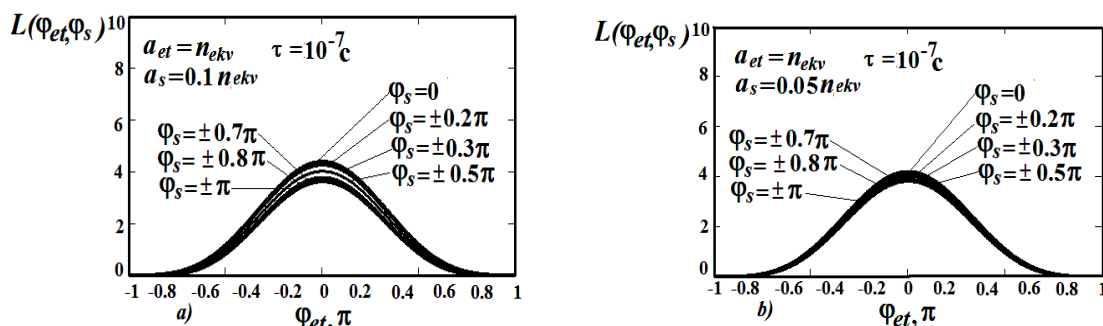


Рис. 11. Зависимость энергетического отношения правдоподобия от начальных фаз принятого и эталонного радиосигналов

На рис. 12 представлена зависимость энергетического отношения правдоподобия в широкополосном радиоканале от величины и знака начальной

фазы эталонного радиосигнала и от степени расфазировки обнаруженного радиосигнала.

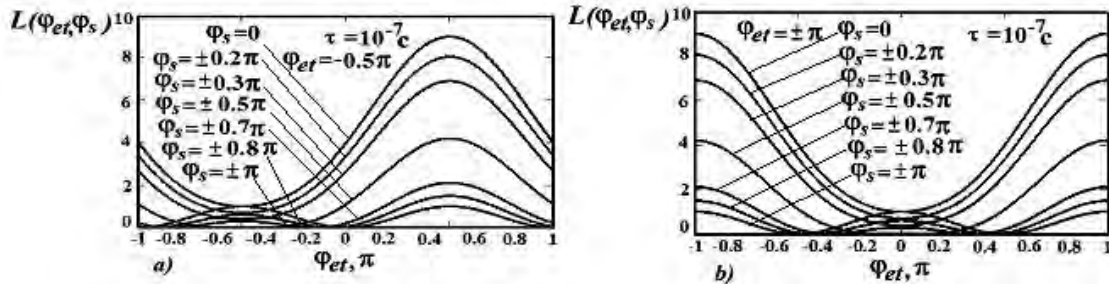


Рис. 12. Зависимость энергетического отношения правдоподобия в широкополосном радиоканале от величины и знака начальной фазы эталонного радиосигнала и от степени расфазировки обнаруженного радиосигнала

Из рис. 12, а следует, что начальная фаза эталонного радиосигнала отстает на $\pi/2$ от начальной фазы анализируемого радиосигнала. На рис. 12, b представлено распределение энергетического отношения правдоподобия при начальной фазе, равной $\pm\pi$. Следует отметить, что на границе области распределения энергетического отношения правдоподобия возникает неоднозначность. Логика распознавания и выравнивания фаз принятого и эталонного радиосигналов состоит в том, что отличие фазового рассогласования от синфазного для принятого радиосигнала влияет на абсолютную величину энергетического отношения правдоподобия. Начальная фаза эталонного радиосигнала изменяет положение максимума энергетического отношения правдоподобия в диапазоне однозначного определения. Рис. 12, а можно интерпретировать как несимметричный квадратурный канал. Для выравнивания начальной фазы эталонного радиосигнала необходимо сдвинуть его соответственно на $0,5\pi$, т.е. создать последовательность эталонных радиосигналов, обеспечивающих четное распределение энергетического отношения правдоподобия. Рис. 12, b характерен для четного квадратурного канала и начальной фазы эталонного радиосигнала $\pm\pi$. Знак и модуль начальной

фазы эталонного радиосигнала определяется номером элемента матрицы максимального значения $\|L_j\|$ относительно нулевого фазового сдвига.

4.4 Возможности обработки радиосигналов при управлении параметрами обнаруженных радиосигналов

Рассмотрим зависимость энергетического отношения правдоподобия в диапазоне однозначного изменения начальных фаз для разных доплеровских частот длинного радиосигнала при флуктуациях текущего значения энергии шума относительно усредненного значения.

Исследованию подлежало энергетическое отношение правдоподобия радиосигналов разных амплитуд длительностью 0,05с при изменении доплеровской частоты от долей Герца до сотен Герц и сложении с эталонным радиосигналом на несущей частоте совпадающим по начальной фазе. Распределения максимумов энергетического отношения правдоподобия для радиосигналов, соизмеримых по энергетике с уровнем шума и меньших в диапазоне однозначного определения фазовых сдвигов радиосигнала $[-\pi; \pi]$ представлены на рис. 13, а, б, с.

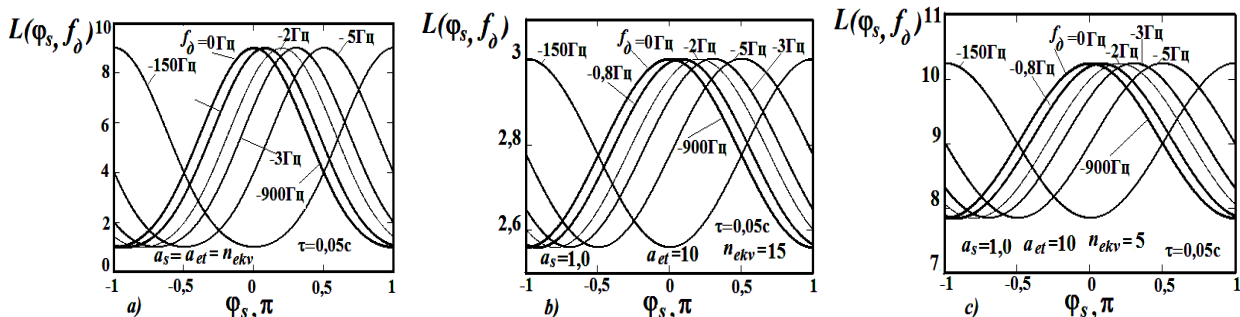


Рис. 13. Распределения максимумов энергетического отношения правдоподобия для радиосигналов, соизмеримых по энергетике с уровнем шума и меньших в диапазоне однозначного определения фазовых сдвигов радиосигнала

Из анализа рис. 13 следует, что в полосе однозначного изменения начальных фаз $[-\pi, \pi]$ обнаруженного радиосигнала распределения энергетиче-

ского отношения правдоподобия при наличии отрицательных доплеровских сдвигов частоты обнаруженного радиосигнала находятся в области положи-

тельных начальных фаз. Физически это можно интерпретировать как когерентное сложение обнаруженного радиосигнала с отрицательными доплеровскими частотами с радиосигналом на несущей частоте, которое возможно при компенсации фазовых набегов, пропорциональных доплеровской частоте. Уменьшение амплитуды обнаруженного радиосигнала на порядок относительно эквивалентной амплитуды шума при 25% флуктуациях текущей энергии шума (рис. 13, b, c) уменьшает диапазон изменения энергетического отношения правдоподобия, но позволяет распознать распределение максимумов, т.е. оценить значение доплеровской частоты.

Радиосигналы с частотами вне полосы однозначного определения энергетического отношения правдоподобия (рис. 13, a) занимают положение либо синфазного сложения ($f_d = -900\text{Гц}$), либо противофазного ($f_d = -150\text{Гц}$). По мере увеличения полосы однозначного определения энергетического отношения правдоподобия (рис. 14, a, b, c) на порядок максимум энергетического отношения правдоподобия для радиосигналов с малыми частотами приближается к $f_d = 0\text{Гц}$, а с более высокими частотами занимают соответствующее положение в более широкополосных каналах при слабых радиосигналах $a_s = 0,05$; $a_{et} = n_{ekv} = 10$.

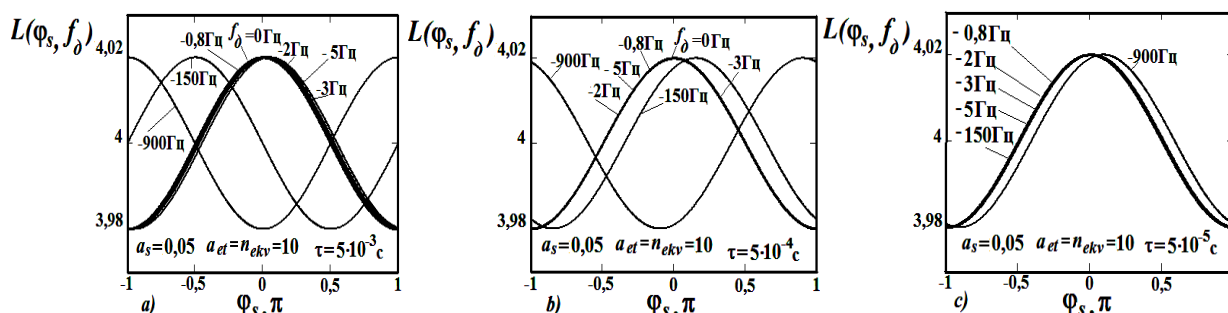


Рис. 14. Зависимость энергетического отношения правдоподобия от набега фазы за длительность радиопульса при равных начальных фазах эталонного радиосигнала и входного радиосигнала с разными доплеровскими частотами при использовании операции суммирования

Осуществление фазовых задержек обнаруженного радиосигнала в диапазоне однозначного определения энергетического отношения правдоподобия позволяет оценить его доплеровскую частоту по расположению максимума энергетического отношения правдоподобия.

4.5 Возможности обработки радиосигналов при управлении эталонными радиосигналами и суммировании

Рассмотрим зависимость энергетического отношения правдоподобия от набега фазы за длительность радиопульса при равных начальных фазах эталонного радиосигнала и входного радиосигнала с разными доплеровскими частотами при использовании операции суммирования (рис. 15). На рис. 15, a показана зависимость энергетического отношения правдоподобия при амплитуде эталонного радиосигнала в два раза превышающую амплитуду

ду шума и в четыре раза превышающую амплитуду обнаруженного радиосигнала. Из рис. 15, a видно, что по мере отклонения доплеровской частоты от нуля максимум энергетического отношения правдоподобия уменьшается по сравнению с рис. 13 и повторяет частотную характеристику однозначного распределения (рис. 9). При отсутствии радиосигнала энергетическое отношение правдоподобия повторяет распределение эталонных радиосигналов (рис. 15, b). Из этого следует, что для распознавания закономерностей распределения энергетических отношений правдоподобия необходимо отслеживать уровни распределений для эталонных радиосигналов, что вызовет увеличение вычислительных операций в условиях дефицита времени на обработку радиосигналов в реальном масштабе времени. Кроме этого эталонные радиосигналы изменяются и на множестве доплеровских частот.

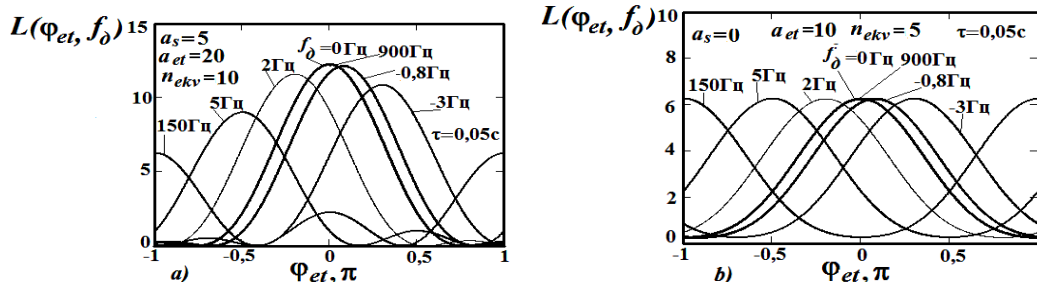


Рис. 15. Зависимость энергетического отношения правдоподобия от набега фазы за длительность радиопульса при равных начальных фазах эталонного радиосигнала и входного радиосигнала с разными доплеровскими частотами при использовании операции суммирования

4.6 Возможности обработки радиосигналов при управлении эталонными радиосигналами и корреляционной обработке

Модель энергетического отношения правдоподобия при корреляционной обработке обнаруженно радиосигнала имеет вид:

$$L(a_s, \varphi_s, n_{ekv}, f_{\delta s}, a_{et}, \varphi_{etj}) = \frac{\left[a_s \cos((2\pi(f_0 + f_{\delta s})\tau + \varphi_s) + n_{ekv}) a_{et} \times \cos((2\pi(f_0 + f_{etj})\tau + \varphi_{etj}) \right]^2}{(n_{ekv})^2}$$

При умножении принятых радиосигналов на эталонный радиосигнал энергетическое отношение правдоподобия для слабых длинных ($\tau=0,05c$) радиосигналов и разных доплеровских частот при управлении эталонными радиосигналами имеет вид, представленный на рис. 16 а, б. Полоса фаз однозначного определения энергетического отношения правдоподобия сузилась в два раза. Диапазон изменения вели-

чины энергетического отношения правдоподобия зависит от величины сигнала. При отсутствии радиосигнала энергетическое отношение правдоподобия равно нулю. Зависимость энергетического отношения правдоподобия от набега фазы за длительность радиосигнала при использовании разных длительностей представлена на рис. 17. Из рис. 17 видно, что распределение максимумов энергетического отношения правдоподобия в диапазоне изменения начальных фаз эталонного сигнала для разных длительностей радиосигналов имеет разное положение. Сигналы с малыми доплеровскими частотами сливаются с распределением энергетического отношения правдоподобия для $f_{\delta} = 0$ (рис. 17, б, с). На рис. 18 представлена зависимость энергетического отношения правдоподобия при анализе радиосигналов разной длительности в диапазоне однозначного изменения начальной фазы эталонного радиосигнала $[-\pi/2... \pi/2]$ с доплеровской частотой 101577 Гц (рис. 18, а) и в отсутствии доплеровской частоты эталонного радиосигнала (рис. 18, б).

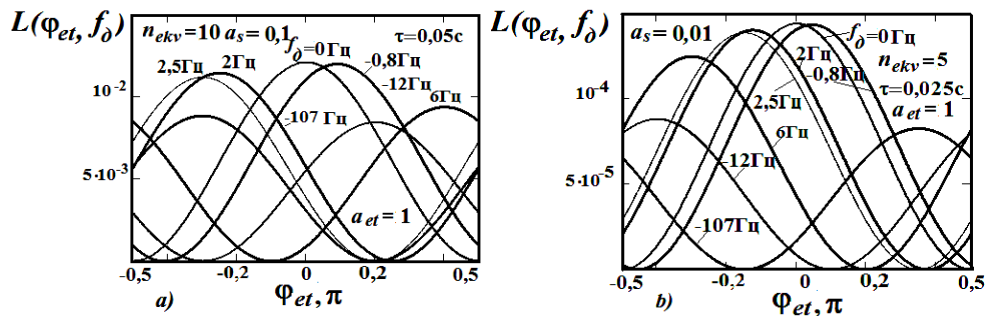


Рис. 16. Зависимость энергетического отношения правдоподобия от набега фазы за длительность радиосигнала при использовании разных длительностей и амплитуд радиосигналов

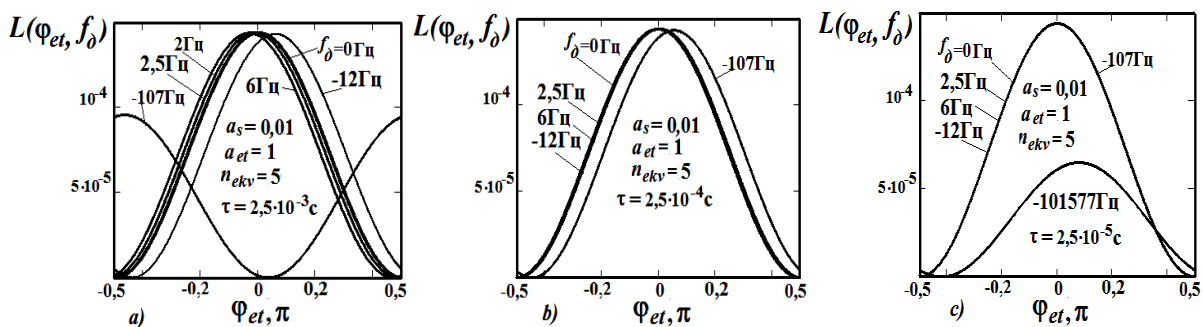


Рис. 17. Зависимость энергетического отношения правдоподобия от набега фазы за длительность радиосигнала при использовании разных доплеровских частот и длительностей радиосигналов

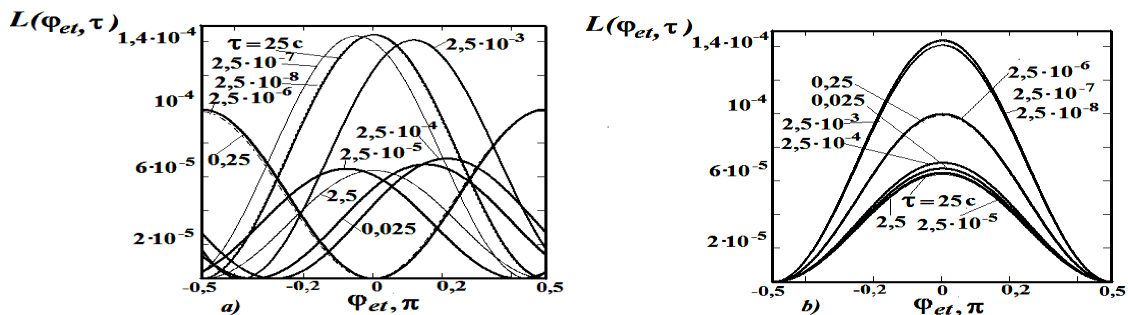


Рис. 18. Зависимость энергетического отношения правдоподобия при анализе радиосигналов разной длительности в диапазоне однозначного изменения начальной фазы эталонного радиосигнала

Метод обработки радиосигналов при управлении эталонным радиосигналом ограниченно годен вследствие того, что при отклонении частоты эталонного радиосигнала от частоты принятого радиосигнала распределение максимумов энергетического отношения правдоподобия повторяет частоту эталонного радиосигнала. Возможна только идентификация априори известной частоты принятого радиосигнала. Зависимости однозначного распределения энергетических

отношений правдоподобия в полосе доплеровских частот для разных длительностей радиосигналов при корреляционной обработке обнаруженного радиосигнала и управлении его фазовыми задержками представлены на рис. 19. Длительность радиосигналов (полоса доплеровских частот) выбиралась исходя из кратности десятичным числам и простоты дешифрации распределения максимумов энергетических отношений правдоподобия.

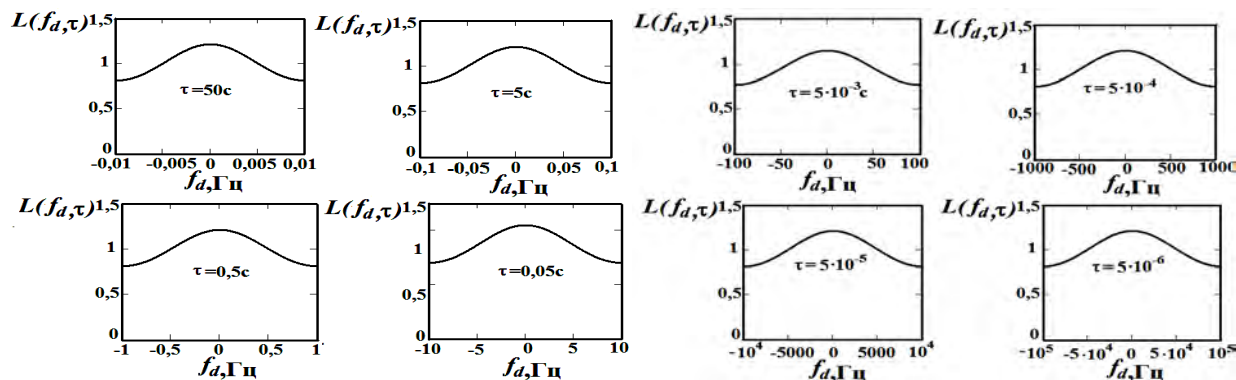


Рис. 19. Зависимости однозначного распределения энергетических отношений правдоподобия в полосе доплеровских частот для разных длительностей радиосигналов при корреляционной обработке обнаруженного радиосигнала и управлении его фазовыми задержками

4.7 Возможности управления начальными фазами обнаруженных радиосигналов при корреляционной обработке

Зависимость энергетического отношения правдоподобия от набега фазы анализируемого радиосигнала за длительность радиоимпульса при равных начальных фазах эталонного и принятого радиосиг-

налов для разных доплеровских частот и длительностей в диапазоне однозначного изменения начальных фаз представлена на рис. 20. На рис. 20, а величина амплитуды обнаруженного радиосигнала составляла 0,5 при амплитуде эталонного радиосигнала и эквивалентной амплитуде шума 10, а на рис. 20, б амплитуда радиосигнала в пять раз меньше.

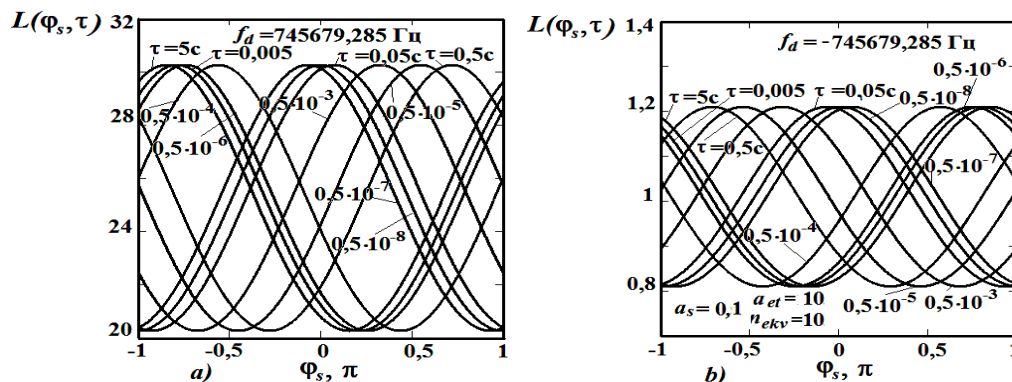


Рис. 20. Зависимость энергетического отношения правдоподобия от набега фазы анализируемого радиосигнала за длительность радиоимпульса при равных начальных фазах эталонного и принятого радиосигналов для разных доплеровских частот и длительностей в диапазоне однозначного изменения начальных фаз

Из анализа распределений энергетических отношений правдоподобия в диапазоне однозначного изменения начальных фаз обнаруженного радиосигнала при корреляционной обработке возможно определение доплеровской частоты длинного радиосигнала по расположению максимумов энергетических отношений правдоподобия в каналах оцениваемых радиосигналов разной длительности.

4.8 Способы синтеза измерителей начальной фазы и доплеровской частоты обнаруженных радиосигналов

Из анализа зависимостей энергетического отношения правдоподобия следуют следующие способы синтеза измерителей доплеровской частоты и начальной фазы длинных радиосигналов с учетом решаемых задач и степени априорной определенно-

сти и требуемой точности оценивания:

на основании управления фазовыми задержками принятых радиосигналов в диапазоне однозначности при суммировании или умножении на сфазированный эталонный радиосигнал с неизменной несущей частотой;

на основании управления частотой эталонных радиосигналов в диапазоне однозначного изменения начальных фаз при суммировании или умножении обнаруженного и эталонного радиосигналов.

Алгоритм обработки обнаруженного радиосигнала при управлении его фазовыми задержками

Сущность фазового метода оценивания начальной фазы и доплеровской частоты радиосигналов заключается в использовании радиосигналов разной длительности для достижения однозначности оценивания доплеровской частоты для разных классов объектов.

Предлагается синтез приемника на основании анализа особенностей энергетического отношения правдоподобия длительного радиосигнала с обработкой его частей для создания разнополосных каналов однозначного оценивания доплеровских частот.

Для оценивания начальных фаз радиосигналов отраженных от разных известных объектов необходимо использовать канал оценивания, который находится за пределами доплеровских частот всех известных классов объектов.

Выравнивание фаз (оценивание начальных фаз) входного радиосигнала по совокупности эталонных радиосигналов необходимо осуществлять в широкополосных каналах по максимальному значению энергетического отношения правдоподобия. Алгоритм оценивания начальной фазы радиосигнала заключается в оценке её в широкополосном канале по критерию максимума энергетического отношения правдоподобия и формирования выровненных по начальной фазе эталонных радиосигналов для использования их в узкополосных каналах, оптимизированных для однозначного оценивания доплеровской частоты.

Основные требования к построению динамичных адаптивных алгоритмов оценивания радиальных скоростей целей по доплеровской частоте радиосигнала определяются назначением РЛС, шириной полосы однозначного измерения доплеровской частоты по фазовым набегам.

Общая схема алгоритма оценивания начальной фазы и доплеровской частоты по критерию максимума энергетического отношения правдоподобия для радиосигналов от всех известных классов объектов [7] представлена на рис. 21. Алгоритм включает определение интервала времени, где энергетическое отношение правдоподобия превысило порог принятия решения об обнаружении радиосигнала по критерию Неймана-Пирсона [3, 4].

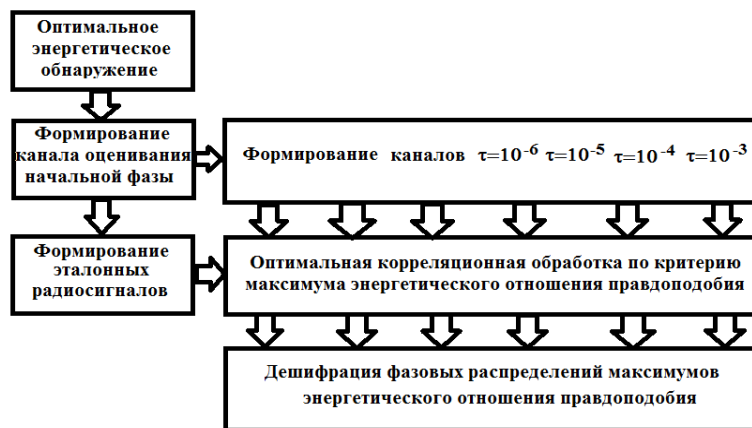


Рис. 21. Общая схема алгоритма оценивания начальной фазы и доплеровской частоты по критерию максимума энергетического отношения правдоподобия для радиосигналов от всех известных классов объектов

Оценивание начальных фаз осуществляется в широкополосном канале, нечувствительном к доплеровским частотам радиосигнала относительно эталонного радиосигнала (рис. 10; 12) при использовании в качестве эталонных двух квадратурно смещенных зондирующих радиосигналов. При этом оценивается значение энергетического отношения правдоподобия относительно эталонного радиосигнала при отсутствии начальной фазы в диапазоне однозначного определения энергетического отношения правдоподобия от начальных фаз эталонного

радиосигнала $[-\pi, \pi]$. При наличии начальной фазы эталонного радиосигнала максимум распределения энергетических отношений правдоподобия смещается в зависимости от знака начальной фазы эталонного радиосигнала (рис. 10, а) в четном канале.

Выравнивание начальных фаз принятого и априори определенных эталонных квадратурных сдвинутых радиосигналов в радиоканалах оценивания доплеровской частоты осуществляется по оценке модуля фазы, пропорциональному отношению разницы энергетических отношений правдопо-

добия при синфазном сложении и оптимально оцененном к разнице энергетических отношений правдоподобия при синфазном и противофазном сложении контрольных и эталонных радиосигналов в широкополосном квадратурном канале с четным распределением энергетического отношения правдоподобия, рассчитанном на полосу доплеровских частот объектов, которые движутся с большими скоростями за пределами известных аналогов

$$\Delta\varphi_0 = \frac{L_{\max} - L_{\text{изм}}}{L_{\max} - L_{\min}} \pi,$$

где L_{\max} – максимальное значение энергетического отношения правдоподобия при синфазном сложении радиосигналов с оцененными и известными амплитудами по контрольным радиосигналам; $L_{\min}(\pi)$ – минимальное значение энергетического отношения правдоподобия при противофазном сложении радиосигналов с оцененными и известными амплитудами по контрольным радиосигналам; $L_{\text{изм}}$ – оцененное значение энергетического отношения правдоподобия при сложении входной реализации с эталонными радиосигналами с оцененными и известными амплитудами в квадратурном канале с четным распределением энергетического отношения правдоподобия.

Знак начальной фазы эталонного радиосигнала оценивается по расположению максимума энергетического отношения правдоподобия в четном квадратурном канале в зависимости от фазовых сдвигов (рис. 10, а). По оценке начальной фазы формируются эталонные радиосигналы для каждого частотного канала для квазиоптимального и оптимального оценивания.

При соответствии фаз радиосигналов энергетическое отношение правдоподобия будет иметь максимальное значение, которое определяется по контрольным радиосигналам. Из пропорции значений энергетических отношений правдоподобия определяется начальная фаза входного радиосигнала. Начальная фаза учитывается в эталонных радиосигналах, которые используются в каналах анализа фазовых набегов для определения доплеровской частоты.

Выборка смеси сигнала и шума распределяется по продолжительности по нескольким каналам ($\tau = 10^{-6}; 10^{-5}; 10^{-4}; 10^{-3}$ с), и в каж-

дом из них по N каналам с равномерными задержками $\Delta\varphi = 2\pi / N$ на интервале $[-\pi, \pi]$ и складывается с эталонными радиосигналами таких же длительностей. Количество каналов N определяет точность оценивания доплеровской частоты, однако их большое количество ведет к увеличению вычислительных затрат. Поэтому целесообразно осуществлять оценку за несколько этапов приближения к истинному значению: квазиоптимальное и оптимальное оценивание с заданной точностью. Квазиоптимальное оценивание осуществляется путем поиска максимального значения элемента матрицы $\|L_j\|$ энергетических отношений правдоподобия в квадратурных каналах с четным распределением. Вариант алгоритма оценивания начальной фазы и доплеровской частоты длинного радиосигнала от известных объектов в широкой полосе доплеровских частот при двух этапах приближения по критерию максимума энергетического отношения правдоподобия для миллисекундных радиосигналов [7] представлен на рис. 22.

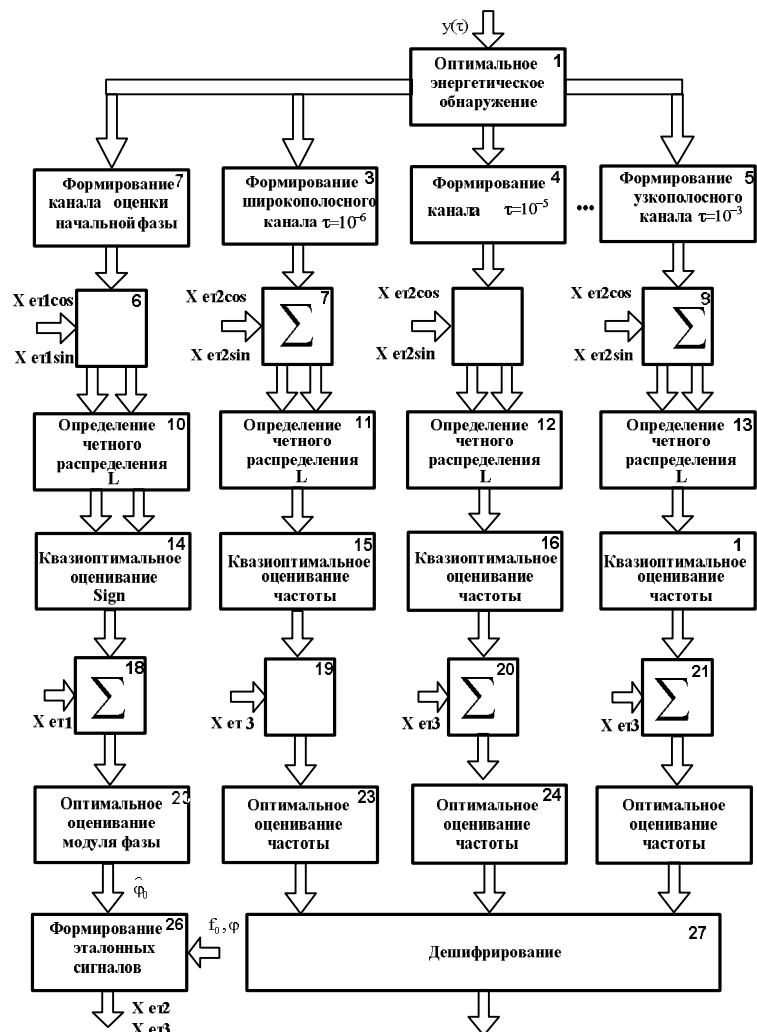


Рис. 22. Алгоритм оценивания начальной фазы и доплеровской частоты длинного радиосигнала по критерию максимума энергетического отношения правдоподобия

Распределение максимумов отношения правдоподобия для доплеровских частот

$$f_d = \pm 777675 \text{ Гц}$$

на выходе каналов оценивания при равных амплитудах входного радиосигнала, шума и амплитуде эталонных радиосигналов представлено на рис. 23.

Дешифратор осуществляет формирование значения доплеровской частоты на основе фазовых распределений максимумов энергетического отношения правдоподобия в частотных каналах.

Для настройки динамического алгоритма используются контрольные радиосигналы.

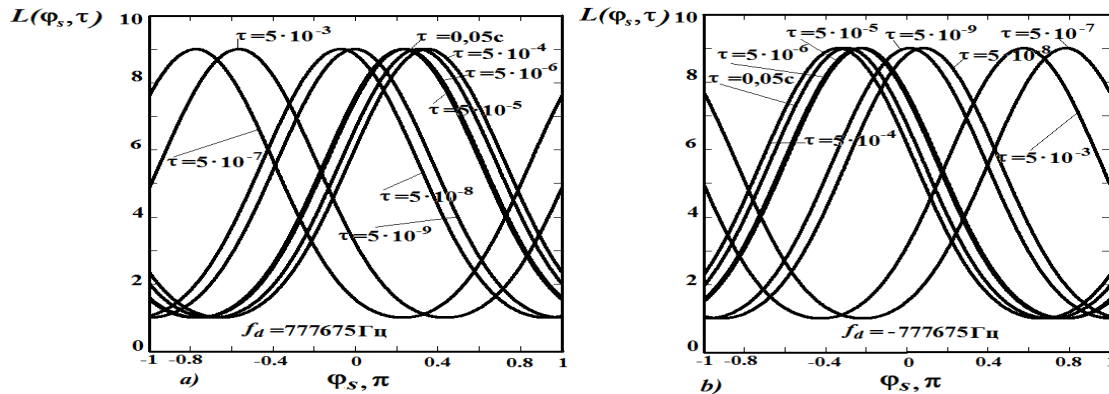


Рис. 23. Распределение максимумов отношения правдоподобия для доплеровских частот $f_d = \pm 777675 \text{ Гц}$ на выходе каналов оценивания

С целью повышения точности оценивания доплеровской частоты до долей Герц (рис. 19) возможно создание псевдодлинных радиосигналов путем смыкания повторений обнаруженного радиосигнала до секундных длительностей ($\tau = 10^{-2}$; $\tau = 10^{-1}$; $\tau = 1$; $\tau = 10 \text{ с}$) (рис. 24) с оптимальной корреляционной обработкой по максимуму энергетического отношения правдоподобия.

Выводы

В основу теории оценивания параметров радиосигнала при энергетическом подходе, как и в классическом случае, положена минимизация условного среднего риска для каждой реализации случайного процесса путем поиска оценки параметров обнаруженных радиосигналов при сложении их с множеством эталонных радиосигналов (корреляционная обработка радиосигналов) при заданных функциях стоимости и поиска максимального значения апостериорного энергетического отношения правдоподобия. Значение эталонного радиосигнала, которому отвечает максимальное значение апостериорного энергетического отношения правдоподобия, и является оценкой параметра радиосигнала. В отличие от классической теории оценивания использование энергетического отношения правдоподобия позволяет оптимально оценить значение параметров радиосигналов по энергетике меньших за уровень внутренних шумов.

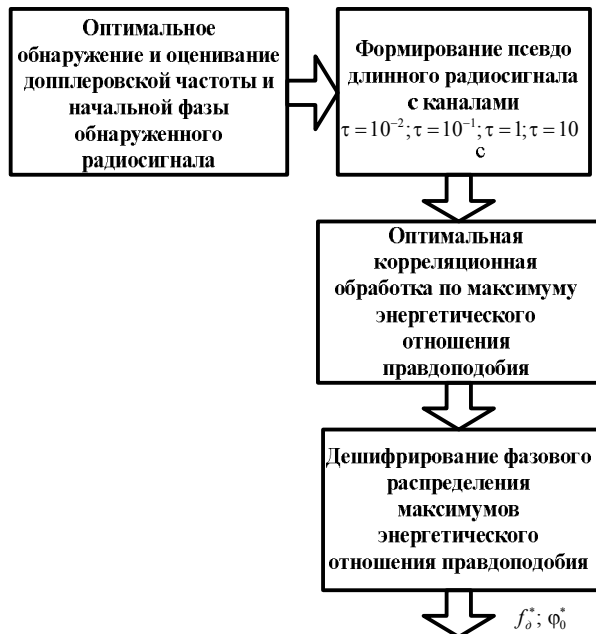


Рис. 24. Алгоритм оценивания начальной фазы и доплеровской частоты длительного радиосигнала с заданной точностью по критерию максимума энергетического отношения правдоподобия

Исследования детерминированной модели определения максимума суммарной энергии обнаруженного короткого радиосигнала, соизмеримого с совокупностью эталонных, показали следующую закономерность: значение ошибки оценки доплеровской частоты зависит от длительности радиосигнала (как и в классическом случае) и при длинных радиосигналах возникает неоднозначность оценки; ошибка оценки начальной фазы определяется шагом дискретизации эталонных радиосигналов. С целью оптимизации вычислительных затрат следует использовать разношаговое квантование эталонных радиосигналов, постепенно приближа-

ясь к оптимальному значению оцениваемого параметра.

Сущность фазового метода оценивания начальной фазы и доплеровской частоты длинных радиосигналов заключается в формировании из длинного радиосигнала радиосигналов разной длительности для достижения однозначности оценивания начальной фазы и доплеровской частоты для разных классов объектов.

Для энергетического оценивания параметров радиосигналов фазовым методом необходимо из длинного обнаруженного радиосигнала сформировать разноразмерные выборки в диапазоне однозначных фазовых сдвигов, оценить начальную фазу принятого радиосигнала в широкополосном радиоканале, сформировать квадратурные эталонные радиосигналы и дешифровать распределение максимумов энергетического отношения правдоподобия на четном выходе разнополосных каналов в зависимости от фазовых задержек обнаруженных радиосигналов.

Рассмотренные основы энергетического оценивания параметров радиосигналов позволяют оценивать параметры радиосигналов по энергетике соизмеримой (или меньшей) с внутренними шумами радиоприемника без влияния и при влиянии активных маскирующих помех, что позволит улучшить качественные показатели вооружения и уменьшить энергетические затраты для решения тех же задач.

Список литературы

1. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. Справочник / Я.Д. Ширман, Ю.И. Лосев, Н.Н. Минервин, С.В. Москвитин, С.А. Горшков, Д.И. Леховицкий, Л.С. Левченко; Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: ЗАО «МАКВИС», 1998. – 828 с.

2. Певцов Г.В. Метод энергетического выявления радиосигналов / Г.В. Певцов, А.Я. Яцуценко, Д.В. Карлов, Ю.В. Трофименко // Системы управления, навигации та зв'язку. – К.: ДП «ЦНДІ НГУ», 2010. – Вип. 4(16). – С. 72-76.

3. Патент на корисну модель 57216. Україна, МПК G01S 7/02. Процес енергетичного виявлення радіосигналів / Певцов Г.В., Яцуценко А.Я. 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., Карлов Д.В., Трофименко Ю.В., Клімішен О.О. – №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 перешкод / Певцов Г.В., Яцуценко А.Я., Карлов Д.В., Трофименко Ю.В., Челпанов А.В., Шевченко В.І. – №201106697; заявл. 30.05.2011; опубл. 10.11.2011, Бюл. №21.

6. Патент на корисну модель 75125. Україна, МПК G01S 7/34. Спосіб енергетичного виявлення коротких немодульованих радіосигналів і послідовного оцінювання їх початкових фаз і доплерівських частот / Певцов Г.В., Яцуценко А.Я., Карлов Д.В., Трофименко Ю.В., Остапова А.М., Клімішен О.О. – №2012004731; заявл. 17.04.2012; опубл. 26.11.2012, Бюл. №22.

7. Патент на корисну модель 75126. Україна, МПК G01S 7/34. Спосіб енергетичного виявлення тривалого немодульованого радіосигналу і послідовного оцінювання його початкової фази і доплерівської частоти / Певцов Г.В., Яцуценко А.Я., Карлов Д.В., Трофименко Ю.В., Остапова А.М., Клімішен О.О. – №2012004737; заявл. 17.04.2012; опубл. 26.11.2012, Бюл. №22.

Поступила в редколлегию 11.11.2013

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

РОЗВИТОК ТЕОРІЇ ОЦІНЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РАДІОСИГНАЛІВ. ОСНОВИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОЦІНЮВАННЯ

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

Висловлюється альтернативний варіант енергетичної теорії оцінювання параметрів радіосигналів, розробленої на підставі обліку закону збереження енергії М.В. Ломоносова і байєсовської безумовної оптимізації статистичних рішень.

Енергетичне оцінювання параметрів радіосигналів – це пошук максимального значення сумарної енергії сигналу і шуму по відношенню до усередненої енергії внутрішнього шуму при складанні (множенні) виявленої вхідної реалізації із змінними еталонними радіосигналами на безлічі можливих значень в умовах їх апріорної невизначеності або у вузькому діапазоні параметрів в умовах апріорної визначеності.

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

RADIO-SIGNAL PARAMETERS ESTIMATION THEORY DEVELOPMENT. FUNDAMENTALS OF ENERGY DETECTION

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

An alternative variant of radio-signals parameters estimation in energy theory developed on the basis of M. Lomonosov energy conservation law and Bayes unconstrained optimization of statistical decisions is considered.

Radio-signal parameters energy estimation implies search of maximal value of the total signal-and-noise energy against the averaged energy of internal noise for the case of addition (multiplication) of the detected input realization and variable model radio-signals on a set of possible values in conditions of their prior uncertainty or in the narrow range of parameters in conditions of prior definiteness.

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