УДК. 519.216.22

С.В. Полишко

Центр военно-стратегических исследований Национального университета обороны Украины имени Ивана Черняховского, Киев

ОСОБЕННОСТИ МЕЖДУПЕРИОДНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ НА ФОНЕ МЕШАЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ В ИМПУЛЬСНЫХ НЕКОГЕРЕНТНЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Проведен анализ статистических характеристик оптимальных последетекторных обнаружителей полезных сигналов, особенностей обработки сигналов в них.

Ключевые слова: *междупериодная обработка, статистическое быстродействие, плотность распределения, квадратичный детектор, гауссовы помехи.*

Постановка проблемы

Импульсные радиотехнические системы (в частности радиолокационные станции (РЛС)) с зондирующими сигналами со случайной начальной фазой, в которых отсутствуют системы обеспечения когерентности импульсов пачки отраженных сигналов (некогерентные (НК) РЛС [2, 3]) в силу своей простоты широко распространены на практике. Междупериодная обработка (МПО) сигналов на фоне пассивных помех в таких РЛС имеет специфические особенности, связанные с невозможностью когерентной компенсации помех в линейных системах с постоянными параметрами (в частности, неадаптивных системах череспериодного вычитания (ЧПВ) различной кратности). Эти системы в них обычно включаются после амплитудного детектора (АД).

На сегодняшний день «…неизвестна структура статистически оптимального устройства обработки видеосигналов и не оценены ее потенциальные возможности при обнаружении целей на фоне коррелированных отражений»[3, с. 106]. К негативным особенностям НК РЛС относят и их свойство "… обнаруживать движущуюся цель только тогда, когда на входе одновременно с сигналом присутствует помеха [2, с. 19]" или "…отсутствие на выходе сигналов от цели и от пассивных помех, если эти сигналы не перекрываются [1, с. 350]".

Цель статьи - синтез структуры оптимальных последетекторных обнаружителей гауссовых (до детектора) сигналов на фоне гауссовых (до детектора) помех, оценка их потенциальных возможностей, анализ причин подавления полезных сигналов вне зоны помех в известных системах последетекторной МПО, определение способов устранения этого эффекта, обоснованию рациональной структуры и параметров квазиоптимальных систем последетекторной МПО.

Изложение основного материала

Оптимальная последетекторная междупериодная обработка

Оптимальная обработка предполагает сравнение с порогом монотонно возрастающей функции (как правило, логарифма) отношения правдоподобия

$$L(\mathbf{v}) = p_1(\mathbf{v}) \,/\, p_0(\mathbf{v}), \qquad (1)$$

где $p_{¥}(x)$ плотности распределения М - мерного вектора пачки $\mathbf{v} = \{\upsilon_i\}_{i=1}^{M}$ выходных сигналов АД анализируемого элемента дальности в М смежных периодах зондирования при наличии (γ=1) и отсутствии (γ=0) полезного сигнала. Элементы $³_i$ вектора $\mathbf{v}$ связаны с элементами u_i вектора $\mathbf{u} = \{u_i\}_{i=1}^{M}$ пачки сигналов на выходе приемника (входе АД) равенствами

$$\upsilon_i = \begin{cases} |u_i|^2 & \text{– для квадратичного детектора;} \\ |u_i| & \text{– для линейного детектора.} \end{cases} \qquad (2)$$

Можно показать, что в случае гауссового комплексного вектора $\mathbf{u} = \mathbf{u}_\gamma \sim CN(0, \Phi_{¥})$ с нулевым - средним значением ($\overline{\mathbf{u}_\gamma} = 0$) и М×М корреляционной матрицей (КМ) междупериодных флюктуаций

$$\mathbf{\Phi}_\gamma = \overline{\mathbf{u}_\gamma \cdot \mathbf{u}_\gamma^*} = \Phi + ¥ \cdot \Phi_s \qquad (\gamma = 0,\ 1) \qquad (3)$$

плотность распределения вектора М - элементной пачки на выходе АД можно записать в виде [5]

$$p_\gamma(\mathbf{v}) = p_\gamma(\upsilon_1, \upsilon_2, ..., \upsilon_M) = c_\gamma \cdot J_\gamma, \qquad (4)$$

где

$$c_\gamma = \pi^{-M} \det^{-1} \mathbf{\Phi}_\gamma \cdot \begin{cases} 2^{-M} - \text{ для квадратичного детектора;} \\ \prod_{i=1}^{M} \upsilon_i - \text{ для линейного детектора;} \end{cases} \qquad J_\gamma = \int_0^{2\cdot\pi} \cdots \int_0^{2\cdot\pi} \exp\left\{ -\mathbf{E}^*(\varphi) \cdot \mathbf{T}_\gamma \cdot \mathbf{E}(\varphi) \right\} d\varphi_1 \cdots d\varphi_M \; ;$$

$$\mathbf{E}(\varphi) = \left\{ \mathbf{exp}(j \cdot \varphi_i) \right\}_{i=1}^{M}; \qquad \mathbf{T}_\gamma = \left\{ t_{ij}^{(\gamma)} \right\}_{i,j}^{M} = \mathbf{L} \cdot \mathbf{\Psi}_\gamma \cdot \mathbf{L}\,; \qquad \mathbf{\Psi}_\gamma = \left\{ \psi_{ij}^{(\gamma)} \right\}_{i,j=1}^{M} = \mathbf{\Phi}_\gamma^{-1}, \qquad (5)$$

$\mathbf{L} = diag\{\ell_i\}_{i=1}^{M}$ –диагональная M × M матрица с элементами $\ell_i = |u_i|$. Для M ∈ 1, 3

$$J_\gamma = 2 \cdot \pi \cdot \boldsymbol{exp}\left\{ -tr\,\mathbf{T}_\gamma \right\} = 2 \cdot \pi \cdot \boldsymbol{exp}\left\{ -\ell_1^2 / \sigma_{1\gamma}^2 \right\} \qquad M = 1; \qquad (6)$$

$$J_\gamma = 4 \cdot \pi^2 \cdot \exp\left\{ -tr\,\mathbf{T}_\gamma \right\} \cdot I_0\left(2 \cdot \left| t_{12}^{(\gamma)} \right| \right), \qquad M = 2; \qquad (7)$$

$$J_\gamma = \boldsymbol{exp}\left\{ -tr\,\mathbf{T}_\gamma \right\} \times \sum_{k=-\infty}^{\infty} I_k\left(2 \cdot \left| t_{12}^{(\gamma)} \right| \right) \cdot I_k\left(2 \cdot \left| t_{13}^{(\gamma)} \right| \right) \cdot I_k\left(2 \cdot \left| t_{23}^{(\gamma)} \right| \right), \qquad M = 3; \qquad (8)$$

где I_k – модифицированная функция Бесселя k-го порядка, $\sigma_{1\gamma}^2 = 1 + \eta + \gamma \cdot h$, ¦ и h – относительные мощности помехи (ОПШ) и сигнала (ОСШ) соответственно.

Для M > 3 интеграл существенно усложняется и его выражение становится чрезмерно громоздким. Используя (4) - (7), можно получить оптимальную предпороговую статистику $\xi = \ln(L(\mathbf{v}))$. В частности для M = 2 она имеет вид

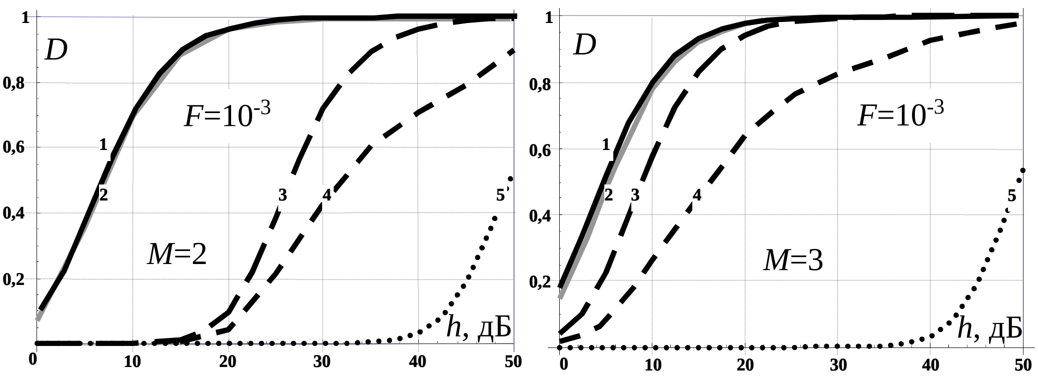
$$\xi = A \cdot \left(|u_1|^2 + |u_2|^2 \right) + \ln I_0\left(2|u_1| \cdot |u_2| \cdot \left|\psi_{21}^{(1)}\right| \right) - -\ln I_0\left(2|u_1| \cdot |u_2| \cdot \left|\psi_{21}^{(0)}\right| \right), \qquad (9)$$

где A – коэффициент, зависящий от параметров сигнала и помехи.

Из (9) следует, что оптимальная обработка предполагает комбинирование операций череспериодного накопления (ЧПН) и ЧПВ, вклад которых определяется параметрами сигналов и помех. В частности, при отсутствии помех (η = 0, $\mathbf{\Phi}_0 = \mathbf{I}$), $\psi_{21}^{(0)} = 0$; $I_0\left(2 \cdot |u_1| \cdot |u_2| \cdot \left|\psi_{21}^{(0)}\right| \right) = 1$,

$$\xi = A \cdot \left(\left|u_1^2\right| + \left|u_2^2\right| \right) + \ln I_0\left(2 \cdot |u_1| \cdot |u_2| \cdot \left|\psi_{21}^{(1)}\right| \right).$$

Отсюда видно, что при отсутствии внешних помех операции ЧПВ исключаются из оптимальной обработки, которая в этом случае предусматривает только ЧПН $\left|u_1^2\right| + \left|u_2^2\right|$ или $\left(|u_1| + |u_2|\right)^2$, зависящее от параметров полезного сигнала. На рис. 1 для M = 2 (а) и M = 3 (б) показаны характеристики обнаружения оптимальных додетекторных (кривые 1, 3) и последетекторных (кривые 2, 4) систем МПО M-элементных когерентных пачек полезного сигнала цели, движущейся с оптимальной скоростью.



а) б)

Рис. 1. Характеристики обнаружения когерентного сигнала

Кривые 1, 2 соответствуют отсутствию (η = 0), а кривые 3, 4 – наличию пассивных помех с ОПШ η = 40 (дБ), гауссовой корреляционной функцией и коэффициентом междупериодной корреляции ρ = 0,99. Кривая 5 соответствует отсутствию последетекторной МПО.

Из рисунка видно, что при отсутствии помех (кривые 1, 2) эффективность оптимальной последетекторной (некогерентной) и додетекторной (когерентной) обработки практически совпадают. Этот результат физически очевиден, так как в этом случае оптимальная додетекторная обработка сводится к когерентному, а последетекторная – к некогерентному накоплению импульсов пачки полезного сигнала. Потери последнего в рассматриваемых условиях малой пачки $M \le 3$ составляют доли дБ, что наглядно видно из рис. 1.

При наличии пассивных помех (кривые 3, 4) последетекторная обработка, естественно, уступает додетекторной, поскольку утрачивается информация о фазе принимаемого сигнала. Тем не менее ее эффективность оказывается достаточно высокой. В частности, по сравнению с отсутствием обработки ($M = 1$) уже при $M = 2$ требуемый уровень порогового сигнала для $D = 0,5$ уменьшается примерно на 17 дБ, а при $M = 3$ выигрыш в пороговом сигнале превышает 30 дБ.

Оптимальная обработка становится практически нереализуемой в типичном для практики случае многоэлементных ($M \ge 3$) пачек. Практический интерес в этих условиях представляют более простые квазиоптимальные системы последетекторной обработки.

Квазиоптимальная последетекторная междупериодная обработка

Известный вариант [3] такой обработки предполагает линейное весовое суммирование выходных сигналов АД m ($m < M$) смежных периодов зондирования с фиксированным вектором весов d_k ($k \in 1, m$), накопление ($M - m$) квадратов выходных сигналов весового сумматора и последующее сравнение результата с порогом. Рекомендуемые в [3] фиксированные знакочередующиеся веса d_k симметричны по модулю относительно центрального элемента ($|d_k| = |d_{m+1-k}|$, $k \in 1, m$), а их сумма равна нулю $\left(\sum_{k=1}^{m} d_k = 0\right)$.

Первое свойство может быть оправдано только при постоянном периоде зондирования, в реальных условиях зачастую неприемлемом из-за эффекта слепых скоростей. В РЛС с вобуляцией периодов зондирования симметрия модулей весов не имеет теоретического обоснования и может оказаться далеко не лучшей по качеству подавления помех.

Второе свойство весов d_k приемлемо только при наличии мощных пассивных помех и когерентных сигналов точечных целей, движущихся со скоростями, близкими к оптимальной. Однако при отсутствии помех именно это свойство является причиной подавления полезного сигнала вне зоны помех независимо от скорости движения цели. В этом случае амплитуды импульсов пачки полезных сигналов из m смежных периодов зондирования примерно одинаковы, а их взвешенная сумма примерно равна произведению амплитуды на сумму весов. При равенстве этой суммы нулю полезный сигнал цели неизбежно подавляется.

Отсюда следует, что причиной подавления сигнала вне зоны помех является не некогерентность РЛС, а неоптимальность линейной последетекторной МПО с нулевой суммой весов (в частности, систем ЧПВ). Для исключения этого эффекта должны использоваться не фиксированные, а изменяющиеся в соответствии с корреляционными свойствами помех веса, т.е. последетекторная система МПО должна быть адаптивной.

Адаптивная последетекторная междупериодная обработка на основе обеляющих фильтров

Возможный вариант адаптивной системы последетекторной междупериодной обработки показан на рис. 2 [5].

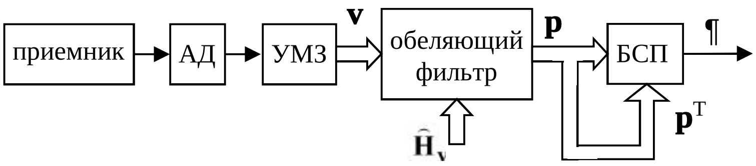


Рис. 2. Структура адаптивной системы последетекторной МПО на основе обеляющего фильтра

Она строится на основе обеляющего фильтра, включенного на выходе блока памяти, выполняющего функции M – отводной линии задержки (УМЗ) сигналов на время между отводами, определяемое законом зондирования. Матричная импульсная характеристика обеляющего фильтра пропорциональна $M \times M$ матрице $\mathbf{H}_\mathbf{v}$ – сомножителю матрицы $\Psi_{0\mathbf{v}}$ в представлении

$$\mathbf{\Psi}_{0\mathbf{v}} = \mathbf{H}_{\mathbf{v}}^{\mathrm{T}} \cdot \mathbf{H}_{\mathbf{v}} = \mathbf{\Phi}_{0\mathbf{v}}^{-1}, \quad \mathbf{\Phi}_{0\mathbf{v}} = \overline{\mathbf{v}_0 \cdot \mathbf{v}_0^{\mathrm{T}}}, \qquad (10)$$

где (т) – символ транспонирования. В реальных условиях априорного незнания КМ $\mathbf{\Phi}_0$ в ее роли выступает та или иная невырожденная оценка $\hat{\mathbf{\Phi}}$, по которой и строится оценочная матрица $\hat{\mathbf{H}}$. Предпороговая статистика ξ, формируемая в блоке скалярного перемножения (БСП), равна

$$\xi = \mathbf{p}^{\mathrm{T}} \cdot \mathbf{p} = \sum_{i=1}^{M} p_i^2 , \qquad (11)$$

где $\mathbf{p} = \{p_i\}_{i=1}^{M} = \hat{\mathbf{H}} \cdot \mathbf{v}$ – M - мерный вектор выходных сигналов обеляющего фильтра.

Эффективность МПО на основе обеляющего фильтра иллюстрируется расчетным семейством кривых обнаружения D(h), приведенным на рис. 3. Сплошные кривые 1, 2 здесь соответствуют оптимальной додетекторной обработке и обработке в схеме рис. 2 при отсутствии помех, штриховые кривые 4 – оптимальной последетекторной обработке при M = 2 и M = 3, кривая 5 – отсутствию МПО, штрихпунктирные кривые 6 и 7 – обработке по схеме рис. 2 при M = 3 и M = 5 в гипотетических условиях точно известной матрицы (10), в той же сигнально-помеховой обстановке, что и на рис. 1.

Видно, что в отсутствии помех адаптивная МПО рис. 2 не подавляет полезный сигнал, поскольку в этих условиях $\mathbf{\Phi}_0 = \mathbf{\Psi}_0 = \mathbf{H} = \mathbf{I}$, $\mathbf{p} = \mathbf{v}$ и, следовательно, обработка (11) заключается только в некогерентном накоплении выходных сигналов АД.

В условиях помех (кривые 4, 6, 7) квазиоптимальная обработка (кривые 6, 7) уступает оптимальной, но эффект от ее использования по сравнению с отсутствием МПО (кривая 5) достаточно велик. В частности, схема рис. 2 при M = 5 близка по эффективности к существенно более сложной оптимальной последетекторной обработки при M = 3.

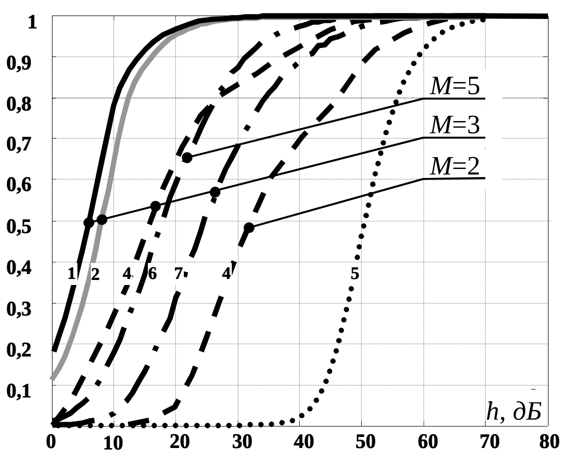


Рис. 3. Характеристики обнаружения когерентного сигнала (F=10^{-3})

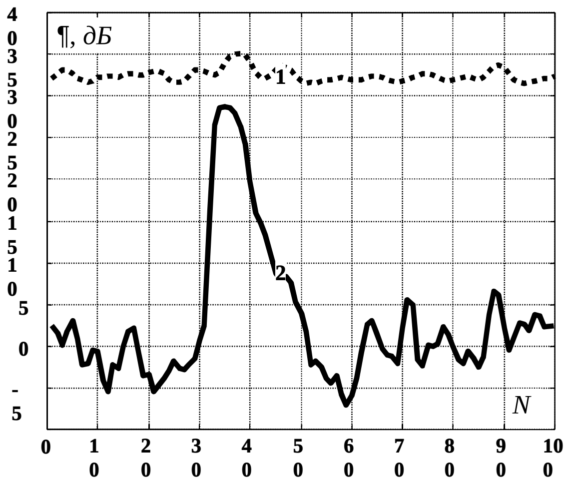


Рис. 4. Выходной эффект схемы рис. 2

В роли обеляющего в схеме рис. 2 могут использоваться адаптивные решетчатые фильтры (АРФ) [5]. На рис. 4 в качестве примера показана осциллограмма выходного эффекта (сплошная кривая 2) схемы рис. 2 на основе АРФ при обработке реальных сигналов (кривая 1) одной из некогерентных РЛС. Видно, что обнаружить цель на входе схемы рис. 2 практически невозможно, тогда как на ее выходе она надежно обнаруживается. В роли матрицы $\mathbf{\Phi}_{\mathbf{v}0}$ использовалась оценочная КМ вида

$$\hat{\mathbf{\Phi}}_{\mathbf{v}0} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \mathbf{v}_i \cdot \mathbf{v}_i^{\mathrm{T}} , \qquad (12)$$

сформированная из n/2=10 M – мерных векторов $\mathbf{v}_i$ из элементов дистанции, предшествующих элементу, проверяемому на наличие полезного сигнала, и n/2 векторов, следующих за ним.

Управление уровнем ложных тревог

Задание порога x_0, обеспечивающего требуемый уровень ложных тревог F, возможно при известном законе распределении предпороговой статистики в отсутствие полезного сигнала. Его аналитическое отыскание для схемы рис. 2 на основе АРФ, особенно в условиях (12), представляет собой исключительно сложную и еще не решенную задачу. Для ее решения по большим массивам записей реальных отражений одной из НК РЛС строились эмпирические гистограммы предпороговой статистики (11), (12) в отсутствие полезного сигнала.

Анализ показал, что с очень высокой точностью они аппроксимируются логнормальным распределением. Рассчитанные для него зависимости значения $\mu = \lg F$ от порога x_0 при отсутствии (кривая 1) и при наличии (кривая 2) помех показаны на рис 5.

В силу специфики схемы рис. 2, связанной с нормированием выходного эффекта, отличия кривых невелики, что позволяет практически всегда использовать один и тот же (больший) порог x_0, рассчитанный для условий наличия внешних помех (кривая 2).

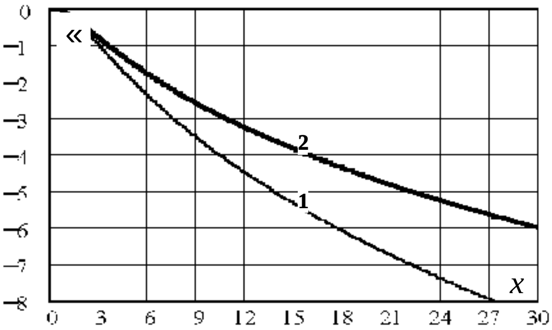


Рис. 5. Зависимость логарифма вероятности ложной тревоги от уровня порога

Такое завышение порога несущественно при их отсутствии, поскольку в этом случае отношение «сигнал / помеха + шум» оказывается большим, и вероятность правильного обнаружения будет достаточно высокой.

Заключение

Оптимальная последетекторная МПО гауссовых (до детектора) сигналов на фоне гауссовых (до детектора) помех в некогерентных РЛС связана с формированием нелинейных (бесселевых) функций выходных сигналов АД. Такая обработка ни при каких условиях (в том числе и при отсутствии помех) не приводит к подавлению полезного сигнала, характерному для описанных в литературе и реально использующихся НК РЛС. Эффект подавления сигнала в них обусловлен не некогерентностью РЛС, а фиксацией весовых коэффициентов МПО, сумма которых равна нулю. В связи с этим практически приемлемыми являются адаптивные последетекторные системы МПО, веса которых меняются в соответствии с помеховой обстановкой. К их числу относится предложенная схема адаптивной МПО на основе обеляющего фильтра (рис. 2), функции которого могут успешно выполнять адаптивные решетчатые фильтры. Показано, что такие системы МПО могут обеспечить достаточно высокую эффективность защиты некогерентных РЛС от пассивных помех. Направление дальнейших исследований - формирование практических рекомендаций по использованию предложенных систем.

Список литературы

1. *Вопросы статистической теории радиолокации / Под ред. Г.П. Тартаковского. – М.: Сов. радио, 1963.*
2. *Фельдман Ю.И., Гидаспов Ю.Б., Гомзин В.Н. Сопровождение движущихся целей / Под ред. Ю.И. Фельдмана. – М.: Сов. радио, 1978. – 288 с.*
3. *Морская радиолокация / Под ред. В.И. Винокурова. – Л.: Судостроение, 1986. – 256 с.*
4. *Леховицкий Д.И. Обобщенный алгоритм Левинсона и универсальные решетчатые фильтры // Радиофизика. – 1992. – Т. 35. – № 9–10. – С. 790 – 808.*
5. *Леховицкий Д.И., Флексер П.М., Кириллов И.Г., Полишко С.В. Эффективность и особенности междупериодной обработки сигналов в некогерентных РЛС / 10-я юбилейная МНК «Теория и техника передачи, приема и обработки информации». Сборник тезисов докладов. Ч.1. – Х.: ХНУРЭ, 2004. – С.201-202.*

Поступила в редакцию 24.04.2014

Рецензент: д.т.н., проф. В.А. Краснобаєв, ПолтНТУ імені Юрія Кондратюка, Полтава.

ОСОБЛИВОСТІ МІЖПЕРІОДНОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ НА ФОНІ ЗАВАЖАЮЧИХ ВПЛИВІВ В ІМПУЛЬСНИХ НЕКОГЕРЕНТНИХ РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

С.В. Полішко

Проведено аналіз статистичних характеристик оптимальних післядетекторних виявлювачів корисних сигналів, особливостей обробки сигналів у них.

Ключові слова: *міжперіодна обробка, статистична швидкодія, щільність розподілу, квадратичний детектор, гаусові завади.*

FEATURES INTER-PERIOD SIGNAL PROCESSING ON A BACKGROUND OF INTERFERING ACTION OF A PULSED INCOHERENT RADIO SYSTEMS

S.V. Polishko

The analysis of the statistical characteristics of the postdetector optimal detectors, signal processing features in them.

Keywords: *inter-period processing, statistical performance, density distribution, quadratic detector, Gaussian of clatter*