# Адаптивное режектирование неэквидистантных отсчетов пассивных помех

## Adaptive rejection of non-equidistant passive interference samples

**Попов / Popov D.**
Дмитрий Иванович
(adop@mail.ru)
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина», профессор кафедры радиотехнических систем.
г. Рязань

Ключевые слова: адаптация – adaptation; алгоритмы режектирования – rejection algorithms; вобуляция периода повторения – wobbulation of repetition period; пассивные помехи – passive interference; эффективность режектирования – rejection efficiency.

По критерию максимума усредненного по доплеровскому сдвигу фазы сигнала коэффициента улучшения отношения сигнал/помеха синтезированы алгоритмы адаптивного режектирования пассивных помех с априорно неизвестными спектрально-корреляционными характеристиками при вобуляции периода повторения. Проведен сравнительный анализ синтезированных и известных алгоритмов. Установлены существенные выигрыши в эффективности режектирования пассивных помех, обусловленные сочетанием адаптации к корреляционным характеристикам помехи и перестройкой весового вектора во времени.

According to the criterion of the maximum of the signal-to-noise ratio improvement coefficient averaged by the Doppler phase shift of the signal, algorithms for adaptive rejection of passive interference with a priori unknown spectral-correlation characteristics during the wobble of the repetition period are synthesized. A comparative analysis of the synthesized and known algorithms is carried out. Significant gains in the efficiency of passive interference rejection due to the combination of adaptation to the correlation characteristics of the interference and the restructuring of the weight vector in time are established.

### Введение

При проектировании и эксплуатации радиолокационных систем (РЛС) одной из актуальных неизменно остается проблема обнаружения сигналов движущихся целей на фоне пассивных помех [1-4]. Наличие сильной корреляционной связи в помехе, простирающейся, по крайней мере, на несколько периодов повторения зондирующего сигнала, позволяет использовать различие скоростей движения цели и источника пассивной помехи.

Способы защиты от пассивных помех зависят от типа РЛС и используемого зондирующего сигнала. Наиболее эффективно данная задача решается в так называемых импульсно-доплеровских РЛС с малой скважностью зондирующего сигнала или РЛС с квазинепрерывными излучениями, в которых используются импульсы с высокими частотами повторения (до нескольких десятков и даже сотен килогерц). Скважность импульсов при этом обычно не превосходит двадцати. Селекция движущихся целей на фоне мешающих отражений в таких РЛС основана на использовании эффекта Доплера [4].

Обработка принятых данных осуществляется в многоканальной по дальности и доплеровской частоте системе. Первоначально осуществляется стробирование (селекция) по дальности. Для каждого селектируемого интервала дальности набор доплеровских фильтров охватывает весь возможный диапазон доплеровских частот сигналов, отраженных от движущихся целей. Из-за различия доплеровских частот помехи и сигнала наблюдение последнего осуществляется в доплеровских фильтрах, свободных от помех, что обеспечивает наилучшую селекцию движущихся целей на фоне пассивных помех. При этом достигается однозначное измерение радиальной скорости цели с высокими разрешающей способностью и точностью. Измерение дальности, однако, связано с неоднозначностью, для устранения которой необходимо применять специальные методы, усложняющие обработку сигналов [4].

Однозначное измерение дальности большого числа целей простыми средствами и с высокой разрешающей способностью достигается в когерентно-импульсных РЛС с зондирующими импульсами высокой скважности, что обусловило широкое применение таких

РЛС на практике [4]. Низкая частота повторения импульсов, выбираемая из условия однозначного измерения дальности, приводит к близкому расположению гребенчатых спектральных составляющих, что затрудняет селекцию сигналов движущихся целей на фоне превосходящей по мощности помехи. В этом случае основной операцией обработки поступающих данных является режектирование спектральных составляющих помехи, а режекторный фильтр (РФ) – основным узлом соответствующей системы обработки [4].

Однако эффективная селекция сигналов движущихся целей на фоне пассивных помех невозможна при так называемых слепых скоростях цели, когда спектральные линии сигнала и помехи совпадают. Одним из способов устранения слепых скоростей является изменение (вобуляция) периода повторения импульсов, приводящая к образованию неэквидистантных отсчетов обрабатываемых данных, включая отсчеты пассивных помех. Вобуляция улучшает условия обнаружения целей, движущихся с бывшими слепыми скоростями, но приводит к сужению полосы задерживания режекторных фильтров (РФ), что существенно снижает эффективность режектирования помехи. Чтобы этого избежать, используются переменные во времени в соответствии с законом вобуляции весовые коэффициенты РФ [4]. Кроме того, отсутствие априорной информации о спектрально-корреляционных характеристиках помехи, а также их неоднородность и нестационарность в зоне обзора существенно затрудняют реализацию предельных возможностей режектирования помехи, что предполагает адаптивное построение РФ, предложенное в работе [5] при отсутствии вобуляции. Целью работы является синтез и анализ алгоритмов адаптивного режектирования пассивных помех при вобуляции периода повторения.

## Описание вобулированной последовательности

При вобуляции периода повторения последовательность неэквидистантных обрабатываемых отсчетов образует ядро вобуляции, состоящее из $p$ неэквидистантных или неравных временных интервалов $T_1, T_2, ..., T_i, ..., T_p$ и повторяющееся с постоянным периодом $T_в$, называемым периодом вобуляции:

$$T_в = \sum_{i=1}^{p} T_i .$$

Как правило, изменение межимпульсных интервалов в пределах ядра вобуляции осуществляется в соответствии с некоторым законом, который может быть представлен через изменение периодов повторения относительно минимального периода $T_{\min}$ на величину, кратную некоторому временному дискрету

$$\Delta T = T_{\min} / M ,$$

где $M$ – целочисленный масштабирующий множитель.

В частности, при линейном законе происходит последовательное изменение интервалов $T_i$ от импульса к импульсу на величину $\Delta T$ по правилу

$$T_i = T_{\min} + (i-1)\Delta T , \quad i = \overline{1, p} .$$

Перекрестный закон может быть получен из соотношений

$$T_{2i-1} = T_{\min} + (i-1)\Delta T , \quad T_{2i} = T_{\max} - (i-1)\Delta T , \quad i = \overline{1, p/2} ,$$

где максимальный период повторения в пределах ядра вобуляции

$$T_{\max} = T_{\min} + (p-1)\Delta T .$$

Характеристики РФ существенно зависят от выбора величин $p$, $\Delta T$ (или $M$) и закона вобуляции. С увеличением диапазона вобуляции периода повторения следует ожидать улучшения скоростных характеристик РФ, однако с точки зрения решаемых задач радиолокации необходимо наложить следующие ограничения:

– минимальный период $T_{\min}$ должен удовлетворять условию однозначного определения заданной дальности;

– максимальный период $T_{\max}$ из энергетических соображений должен удовлетворять условию $T_{\max} \le 1{,}5T_{\min}$.

Одним из основных количественных показателей вобулированной последовательности является глубина или индекс вобуляции

$$\text{mod} = \left( \frac{T_{\max}}{T_{\min}} - 1 \right) 100\% .$$

Каждой комбинации межимпульсных интервалов можно поставить в соответствие некоторую точку в $p$-мерном пространстве периодов повторения. Тогда точке ($T_{\min}$, $T_{\min}$, …, $T_{\min}$) будет соответствовать случай эквидистантной последовательности межимпульсных интервалов. Определим глубину вобуляции mod данной последовательности интервалов как нормированное к $T_{\min}$ расстояние от фактической точки в пространстве периодов повторения до точки ($T_{\min}$, $T_{\min}$, …, $T_{\min}$). Тогда для последовательности временных интервалов в этом случае можно найти, что

$$\text{mod} = (100\% / M) \sqrt{(p-1)p(2p-1)/6} .$$

С учетом нестационарности интервалов ($T_1, T_2, ..., T_p$) в пределах периода вобуляции $T_в$ свойства помехи целесообразно описывать $p$ корреляционными подматрицами $\mathbf{R}_l$, элементы которых

$$R_{jk}^{(l)} = \rho_{jk}^{(l)} \exp(\mathrm{i}\psi_{jk}^{(l)}),$$

где $\rho_{jk}^{(l)} = \rho(t_{l-j} - t_{l-k})$ – коэффициенты межпериодной корреляции, $\psi_{jk}^{(l)} = \psi(t_{l-j} - t_{l-k})$ – доплеровские сдвиги фазы, $j, k = \overline{0, m}$, $l = \overline{(m+1), (m+p)}$, $m$ – порядок РФ. Здесь и далее границы изменения величины $l$ смещены на $m$, чтобы не учитывать влияние переходного процесса в фильтре.

## Синтез адаптивных алгоритмов

Синтез искомых алгоритмов для нерекурсивного адаптивного режекторного фильтра (АРФ) заданного порядка $m$ состоит в определении вектора весовых коэффициентов $\mathbf{G} = \{G_k\}$, $k = \overline{0, m}$, реализующего наилучший показатель эффективности выделения сигналов движущихся целей на фоне поступающей помехи. В качестве критерия эффективности рассмотрим усредненный по доплеровскому сдвигу фазы сигнала коэффициент $\mu$ улучшения отношения сигнал/помеха [5]. Тогда в процессе адаптации РФ в общем случае должен формироваться вектор $\mathbf{G}$, реализующий максимальное значение $\mu$. А при вобуляции периода повторения в процессе адаптации РФ для каждой из $p$ корреляционных подматриц $\mathbf{R}_l$ помехи должен формироваться свой оптимальный подвектор $\mathbf{G}_l = \{G_k^{(l)}\}$ весовых коэффициентов. С учетом вышесказанного критерий адаптации записывается в виде

$$\mu_l = \max_{\mathbf{G}_l}(\mathbf{G}_l^{*\mathrm{T}}\mathbf{G}_l / \mathbf{G}_l^{*\mathrm{T}}\mathbf{R}_l\mathbf{G}_l), \quad l = \overline{(m+1), (m+p)}, \tag{1}$$

где символы * и $^{\mathrm{T}}$ означают комплексное сопряжение и транспонирование.

На основе экстремальных свойств характеристических (собственных) чисел $\alpha$ матриц оптимальный вектор $\mathbf{G}_l$ определяется как собственный вектор матрицы $\mathbf{R}_l$, соответствующий ее минимальному собственному значению $\alpha_{\min}^{(l)}$ из матричного уравнения

$$(\mathbf{R}_l - \alpha_{\min}^{(l)}\mathbf{I})\mathbf{G}_l = 0, \tag{2}$$

где $\mathbf{I}$ – единичная матрица, а величина $\alpha_{\min}^{(l)}$ является наименьшим корнем характеристического уравнения

$$\det(\mathbf{R}_l - \alpha\mathbf{I}) = 0.$$

Переходя в соответствии с методологией адаптивного байесовского подхода к оценочным значениям корреляционных подматриц $\hat{\mathbf{R}}_l$ помехи, найдем, что в общем случае уравнению (2) удовлетворяет вектор оптимальных весовых коэффициентов АРФ, который представим в виде

$$\hat{\mathbf{G}}_l = \{\hat{G}_k^{(l)}\} = \left\{\hat{g}_k^{(l)} \exp\left(\mathrm{i}\sum_{i=1}^{k}\hat{\psi}_{l-i}\right)\right\}, \quad k = \overline{0, m},$$

где $\hat{g}_k^{(l)}$ – коэффициенты, определяемые оценками $\hat{\rho}_{jk}^{(l)}$ и $\hat{\alpha}_{\min}^{(l)}$ в соответствии с конкретными в зависимости от порядка $m$ РФ адаптивными алгоритмами; $\hat{\psi}_l$ – оценка доплеровского сдвига фазы помехи за период $T_l$ (очевидно, что $T_{l+np} = T_l$, $n = 0, 1, 2, \ldots$).

В соответствии со свойствами собственных чисел матричное уравнение (2), являясь системой $m+1$ однородных линейных уравнений с $m+1$ неизвестными, имеет следующие тождественные решения, отличные от тривиального (нулевого) [6]:

$$\hat{g}_k^{(l)} = C\hat{A}_{Rov,\,k}^{(l)}, \quad k = \overline{0, m},$$

где $C$ – произвольная константа; $\hat{A}_{Rov,\,k}^{(l)}$ – алгебраическое дополнение соответствующего элемента в определителе $D_l = \det[\hat{\rho}_{jk}^{(l)} - \hat{\alpha}_{\min}^{(l)}\delta_{jk}]$, причем $Rov$ (строка разложения) выбрана так, что хотя бы одно из $\hat{A}_{Rov,\,k}^{(l)}$ было отлично от нуля; $\delta_{jk}$ – символ Кронекера.

При ограничивающем условии $\hat{g}_0^{(l)} = g_0 = 1$ для оптимальных весовых коэффициентов окончательно имеем

$$\hat{g}_k^{(l)} = \hat{A}_{Rov,\,k}^{(l)} \Big/ \hat{A}_{Row,\,0}^{(l)}, \quad k, Rov = \overline{0, m}. \tag{3}$$

Приведем конкретный вид адаптивных алгоритмов, вытекающих из выражения (3), для частных значений порядка АРФ $m$:

$$m = 1 \Rightarrow \; g_0 = 1, \; g_1 = -1;$$

$$m = 2 \Rightarrow \; g_0 = 1, \; \hat{g}_1^{(l)} = -\frac{(1-\hat{\alpha}_{\min}^{(l)})^2 - (\hat{\rho}_{02}^{(l)})^2}{(1-\hat{\alpha}_{\min}^{(l)})\hat{\rho}_{01}^{(l)} - \hat{\rho}_{12}^{(l)}\hat{\rho}_{02}^{(l)}},$$

$$\hat{g}_2^{(l)} = \frac{(1-\hat{\alpha}_{\min}^{(l)})\hat{\rho}_{12}^{(l)} - \hat{\rho}_{01}^{(l)}\hat{\rho}_{02}^{(l)}}{(1-\hat{\alpha}_{\min}^{(l)})\hat{\rho}_{01}^{(l)} - \hat{\rho}_{12}^{(l)}\hat{\rho}_{02}^{(l)}};$$

$$m = 3 \Rightarrow \; \hat{g}_k = \hat{A}_{1k} / \hat{A}_{10}, \; k = \overline{0, m},$$

$$\hat{A}_{10} = -(1-\hat{\alpha}_{\min}^{(l)})^2\hat{\rho}_{01}^{(l)} + (1-\hat{\alpha}_{\min}^{(l)})(\hat{\rho}_{02}^{(l)}\hat{\rho}_{12}^{(l)} + \hat{\rho}_{03}^{(l)}\hat{\rho}_{13}^{(l)}) + \\ + \hat{\rho}_{01}^{(l)}(\hat{\rho}_{23}^{(l)})^2 - \hat{\rho}_{02}^{(l)}\hat{\rho}_{13}^{(l)}\hat{\rho}_{23}^{(l)} - \hat{\rho}_{12}^{(l)}\hat{\rho}_{03}^{(l)}\hat{\rho}_{23}^{(l)},$$

$$\hat{A}_{11} = (1-\hat{\alpha}_{\min}^{(l)})^3 - (1-\hat{\alpha}_{\min}^{(l)})[(\hat{\rho}_{02}^{(l)})^2 + (\hat{\rho}_{03}^{(l)})^2 + \\ + (\hat{\rho}_{23}^{(l)})^2] + 2\hat{\rho}_{12}^{(l)}\hat{\rho}_{03}^{(l)}\hat{\rho}_{23}^{(l)},$$

$$\hat{A}_{12} = -(1-\hat{\alpha}_{\min}^{(l)})^2\hat{\rho}_{12}^{(l)} + (1-\hat{\alpha}_{\min}^{(l)})(\hat{\rho}_{01}^{(l)}\hat{\rho}_{02}^{(l)} + \hat{\rho}_{13}^{(l)}\hat{\rho}_{23}^{(l)}) + \\ + \hat{\rho}_{12}^{(l)}(\hat{\rho}_{03}^{(l)})^2 - \hat{\rho}_{01}^{(l)}\hat{\rho}_{23}^{(l)}\hat{\rho}_{03}^{(l)} - \hat{\rho}_{02}^{(l)}\hat{\rho}_{13}^{(l)}\hat{\rho}_{03}^{(l)},$$

$$\hat{A}_{13} = -(1-\hat{\alpha}_{\min}^{(l)})^2\hat{\rho}_{13}^{(l)} + (1-\hat{\alpha}_{\min}^{(l)})(\hat{\rho}_{01}^{(l)}\hat{\rho}_{03}^{(l)} + \hat{\rho}_{12}^{(l)}\hat{\rho}_{23}^{(l)}) + \\ + \hat{\rho}_{13}^{(l)}(\hat{\rho}_{02}^{(l)})^2 - \hat{\rho}_{01}^{(l)}\hat{\rho}_{23}^{(l)}\hat{\rho}_{02}^{(l)} - \hat{\rho}_{12}^{(l)}\hat{\rho}_{02}^{(l)}\hat{\rho}_{03}^{(l)}.$$

Как видим, адаптивные алгоритмы при $m = 3$ крайне громоздки и, кроме того, зависят от оценок 6 коэффициентов корреляции, поэтому в этом случае для

упрощения процедуры адаптации целесообразно построение АРФ в виде каскадного соединения звеньев 1-го и 2-го порядков. Оценки корреляционных параметров помехи находятся в соответствии с максимально правдоподобными алгоритмами оценивания.

Отметим связь полученных выше алгоритмов с уже известными алгоритмами [4, 5], для чего при $m = 2$ найдем следующие пределы:

$$\lim_{\Delta f \to 0} (\hat{g}_1^{(l)}) = -1 - (T_{l-1} / T_{l-2}), \quad \lim_{\Delta f \to 0} (\hat{g}_2^{(l)}) = T_{l-1} / T_{l-2}; \tag{4}$$

$$\lim_{\mathrm{mod} \to 0} (\hat{g}_1^{(l)}) = -2\hat{\rho}_{12}^{(l)} / (1 - \alpha_{\min}^{(l)}), \quad \lim_{\mathrm{mod} \to 0} (\hat{g}_2^{(l)}) = 1;$$

где $\Delta f$ – ширина спектра помехи.

В случае сильно коррелированной помехи (т. е. $\rho_{jk} \to 1$ или $\Delta f \to 0$) алгоритмы при $m = 2$ и произвольной глубине вобуляции mod, как следует из выражений (4), полностью совпадают с известными алгоритмами на основе переменных во времени в соответствии с законом вобуляции коэффициентами [4].

При $\mathrm{mod} \to 0$ получаем $\rho_{12}^{(l)} \cong \rho_{23}^{(l)} \cong \rho$ и алгоритмы при $m = 2$ полностью совпадают с выведенными в [5]. Кроме того, при $\rho \to 1$ они переходят в классические алгоритмы с биномиальными весовыми коэффициентами $g_k = (-1)^k C_m^k$. Сходимость синтезированных алгоритмов к известным алгоритмам в частных случаях подтверждает их достоверность.

При расчете весовых коэффициентов АРФ необходимым условием достижения предельной эффективности режектирования является использование оценки минимального собственного значения корреляционной матрицы пассивной помехи, которая является своеобразным стабилизирующим элементом расчета, причем для минимизации потерь, вызванных ошибками оценивания $\alpha_{\min}$, в качестве строки разложения следует выбрать первую строку $Row = 1$.

Для сохранения потенциальной точности расчета всех весовых коэффициентов предлагается следующая процедура расчета:

$$\hat{g}_0 = g_0 = 1; \quad \hat{g}_1 = -\frac{1}{1 - \alpha_{\min}} \left( \hat{\rho}_{01} + \sum_{k=2}^{m} \hat{\rho}_{1j} \hat{g}_k \right);$$

$$\hat{g}_k = \frac{\hat{A}_{1k}}{\hat{A}_{10}}, \; k = \overline{2, m},$$

при которой все весовые коэффициенты являются полиномами одинаковой $(m-1)$-степени относительно переменной $(1 - \alpha_{\min})$.

С учетом приведенных рекомендаций модифицированные алгоритмы адаптивного режектирования пассивных помех при вобуляции периода повторения принимают следующий вид:

при $m = 1 \Rightarrow \quad g_0 = 1, \; g_1 = -1;$

при $m = 2 \Rightarrow \quad g_0 = 1, \; \hat{g}_1^{(l)} = -\dfrac{1}{1 - \hat{\alpha}_{\min}^{(l)}} (\hat{\rho}_{01}^{(l)} + \hat{\rho}_{12}^{(l)} \hat{g}_2^{(l)}),$

$$\hat{g}_2^{(l)} = \frac{(1 - \hat{\alpha}_{\min}^{(l)}) \hat{\rho}_{12}^{(l)} - \hat{\rho}_{01}^{(l)} \hat{\rho}_{02}^{(l)}}{(1 - \hat{\alpha}_{\min}^{(l)}) \hat{\rho}_{01}^{(l)} - \hat{\rho}_{12}^{(l)} \hat{\rho}_{02}^{(l)}};$$

При $m = 3$ сохраняется громоздкость выражений, что подтверждает целесообразность использования на практике в этом случае каскадного включения звеньев 1-го и 2-го порядков.

Системная функция АРФ в $z$-плоскости определяется как суперпозиция $p$ частных системных функций следующим соотношением:

$$H(\{z_l\}) = \frac{1}{p} \sum_{l=m+1}^{m+p} \sum_{k=0}^{m} \hat{g}_k^{(l)} z_l^{-k} \exp\left( \mathrm{i} \sum_{i=1}^{k} \hat{\psi}_{l-i} \right),$$

где $z_l = \exp(i\omega T_l)$.

В соответствии с данной системной функцией может быть синтезирована структурная схема АРФ, отличающаяся от приведенных в [5] наличием дополнительного весового блока, соответствующего не равному единице при вобуляции периода повторения коэффициенту $\hat{g}_m^{(l)}$, выполнением блока вычисления весовых коэффициентов, реализующего, например, при $m = 2$ условие $\hat{\rho}_{23}^{(l)} = \hat{\rho}_{12}^{(l-1)}$ путем задержки оценок коэффициентов межпериодной корреляции и вычисляющего затем весовые коэффициенты по адаптивным алгоритмам, а также особенностями синхронизации блоков АРФ с учетом вобуляции. Оценки $\hat{\rho}_{jk}^{(l)}$ и $\exp(\mathrm{i}\hat{\psi}_l)$ находятся в соответствии с максимально правдоподобными алгоритмами оценивания работы [5].

## Анализ адаптивных алгоритмов

Проведем анализ синтезированных алгоритмов по вытекающему из выражения (1) критерию эффективности. В качестве результирующего усредненного коэффициента улучшения сигнала-помеха при $p$-кратной вобуляции периода повторения примем суперпозицию $p$ частных коэффициентов улучшения:

$$\mu = \frac{1}{p} \sum_{l=m+1}^{m+p} \mu_l = \sum_{l=m+1}^{m+p} (\mathbf{G}_l^{*\mathrm{T}} \mathbf{G}_l / \mathbf{G}_l^{*\mathrm{T}} \mathbf{R}_l \mathbf{G}_l).$$

Полагаем, что закон вобуляции – перекрестный, доплеровская фаза помехи скомпенсирована ($\psi_l = 0$), а корреляционная функция помехи аппроксимируется гауссовской кривой:

$$\rho_{jk} = \exp\{-\pi^2 [\beta(t_j - t_k) / T_{\min}]^2 / 2{,}8\},$$

где $\beta = \Delta f T_{\min}$ – нормированная ширина спектра помехи.

При этом $R_{jk}^{(l)} = \rho_{jk}^{(l)} = \rho_{l-j,\, l-k}$.

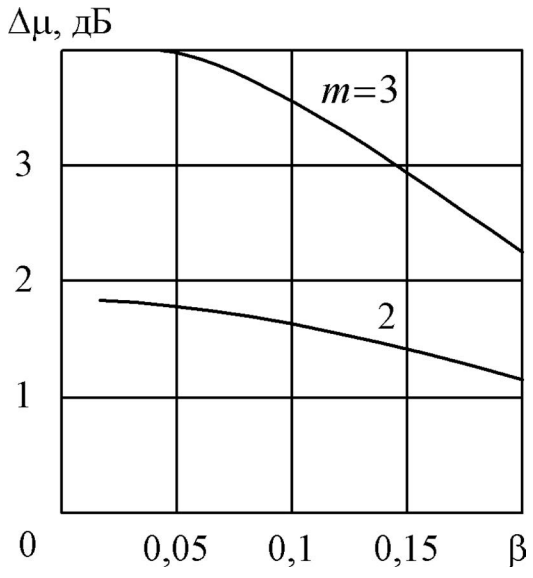


*Рис. 1. Зависимости выигрыша в коэффициенте улучшения АРФ от нормированной ширины спектра помех*

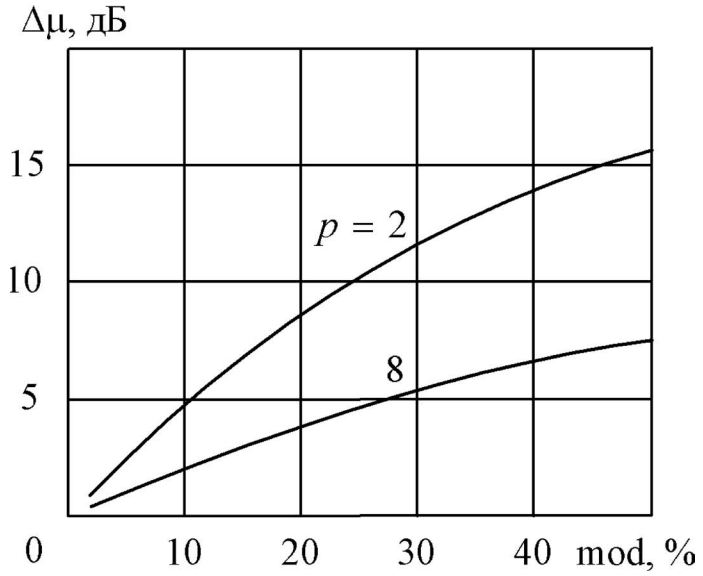


*Рис. 2. Зависимости выигрыша в эффективности АРФ от параметров закона вобуляции*

На рис. 1 при восьмикратной ($p = 8$) вобуляции периода повторения и глубине вобуляции mod = 25% приведены зависимости от нормированной ширины спектра помехи β выигрыша Δμ в коэффициенте улучшения μ АРФ на основе синтезированных алгоритмов по сравнению с РФ на основе неадаптивных переменных во времени алгоритмов [4]. Из кривых следует, что предлагаемая адаптация к корреляционным характеристикам помехи при вобуляции периода повторения позволяет по сравнению с неадаптивной обработкой получить существенные выигрыши в эффективности режектирования помехи, достигающие 1,8 и 4,2 дБ соответственно при порядке АРФ $m = 2$ и 3.

На рис. 2 при $m = 3$ и $\beta = 0{,}05$ представлены кривые, иллюстрирующие влияние параметров вобуляции на выигрыш в эффективности АРФ на основе предложенных алгоритмов по сравнению с АРФ со стационарными алгоритмами [5]. Как видим, при изменении глубины вобуляции в пределах mod ≤ 50% в зависимости от параметров вобуляции достигаются существенные (до 15 дБ) выигрыши, соответствующие перекрестному закону вобуляции. При линейном законе вобуляции аналогичная величина выигрыша не превосходит 5 дБ.

Данные выигрыши объясняются следующим образом. В АРФ со стационарными алгоритмами изменение межимпульсного интервала приводит к деформации скоростных характеристик АРФ в зоне режекции, что существенно снижает эффективность режектирования помехи. Предложенные алгоритмы обработки сочетают адаптацию к корреляционным характеристикам помехи и изменение весового вектора во времени, благодаря чему достигаются установленные выигрыши в эффективности режектирования помехи.

Анализ скоростных характеристик АРФ на основе предложенных алгоритмов показал, что при $m < p$ наряду с максимизацией эффективности режектирования помехи использование адаптивных алгоритмов (3) для вычисления весовых коэффициентов фильтра дает достаточно сглаженную характеристику АРФ в полосе пропускания при любой расстановке периодов повторения в группе. Кроме того, АРФ порядка $m=p$ является инвариантным по выбранному критерию эффективности (1) относительно различных расстановок периодов повторения в пределах периода вобуляции. Это позволяет снять противоречие между требованиями повышения эффективности подавления помехи и улучшения равномерности скоростной характеристики при выборе порядка чередования периодов повторения в группе.

## Заключение

Синтезированные алгоритмы в условиях априорной неопределенности спектрально-корреляционных характеристик пассивных помех позволяют адаптироваться к аргументу и модулю реальной корреляционной функции помехи, не прибегая к аппроксимации ее формы, с учетом законов и параметров вобуляции периода повторения.

Применение синтезированных алгоритмов позволяет получить по сравнению с известными алгоритмами обработки радиолокационного сигнала существенные выигрыши в эффективности выделения сигналов движущихся целей на фоне пассивной помехи в условиях априорной неопределенности характеристик помехи при вобуляции периода повторения, позволяющей исключить слепые скорости цели. Достижение данного выигрыша обусловлено сочетанием адаптации алгоритмов обработки к неизвестным параметрам помехи с их перестройкой во времени в соответствии с законом вобуляции.

Использование полученных алгоритмов при проектировании АРФ позволяет повысить эффективность выделения сигналов движущихся целей в значительно большем диапазоне их радиальных скоростей на фоне пассивных помех с неизвестными спектрально-корреляционными свойствами.

## Литература

1. Skolnik, M. I. Introduction to Radar System / M.I. Skolnik. – 3rd ed. – New York: McGraw-Hill, 2001. – 862 p.

2. Richards, M. A. Principles of Modern Radar: Basic Principles / M.A. Rich-ards, J.A. Scheer, W.A. Holm. – New York: SciTech Publishing, 2010. – 960 p.

3. Melvin, W. L. Principles of Modern Radar: Advanced Techniques / W.L. Melvin, J.A. Scheer. – New York: SciTech Publishing, 2013. – 872 p.

4. Справочник по радиолокации: в 2 кн. Кн. 1 / под ред. М.И. Сколника; пер. с англ. под ред. В.С. Вербы. – М.: Техносфера, 2014. – 680 с.

5. Попов, Д. И. Адаптивная обработка когерентных сигналов на фоне помех / Д.И. Попов // Информация и Космос. – 2016. – № 3. – С. 25–30.

6. Корн, Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1973. – 832 с.