

**ЭЛЕКТРОНИКА**

УДК 355.42

**ОБНАРУЖЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ВЫСТРЕЛОВ  
ИЗ АРТИЛЛЕРИЙСКИХ ОРУДИЙ**

С.Р. ГЕЙСТЕР, Р.В. БЫКОВ, А.В. КУРЕНЁВ

*Военная академия Республики Беларусь,  
Минск, 220057, Беларусь**Поступила в редакцию 8 октября 2008*

Проведен статистический синтез алгоритмов обнаружения акустических сигналов выстрелов, распространяющихся у поверхности Земли. В результате синтеза получены два оптимальных устройства обработки принятого сигнала для двух вариантов корреляционных свойств акустического сигнала выстрела. Проведен краткий анализ устройств обработки, реализующих разработанные алгоритмы.

*Ключевые слова:* акустический сигнал, статистический синтез, алгоритм обнаружения

**Введение**

Увеличение дальности ведения огня артиллерийскими подразделениями требует увеличения дальности разведки орудий противника. На сегодняшний день в Вооруженных Силах Республики Беларусь артиллерийская разведка имеет на вооружении оптические, радиолокационные и звукометрические средства и комплексы. Звуковая разведка обладает рядом преимуществ по сравнению с оптической и радиолокационной, а именно — высокой дальностью и скрытностью. В существующих автоматизированных звукометрических комплексах в устройствах обнаружения акустических сигналов (АС) выстрелов реализована фильтрация принятых сигналов в определенной полосе частот, что не позволяет в полной мере реализовать возможности звуковой разведки.

Путем разработки и использования оптимальных устройств автоматического обнаружения, полученных в результате статистического синтеза, могут быть достигнуты требуемые характеристики ведения звукометрической разведки.

**Постановка задачи**

Временная структура АС выстрела в начальной точке характеризуется изменением давления относительно атмосферного и имеет вид, представленный на рис. 1. При этом временная структура сигнала может быть описана выражением [1]:

$$p_{v\_ist}(t) = P_0 \left( 1 - \frac{t - t_z}{T_{ID}} \right) e^{-\frac{t - t_z}{T_{ID}}}, \quad (1)$$

где  $P_0$  — максимальное давление, создаваемое выстрелом в точке излучения;  $t$  — текущее время;  $t_z$  — время задержки относительно начала отсчета;  $T_{ID}$  — длительность фронта избыточного давления.

Акустические сигналы выстрелов нельзя рассматривать как сигналы известной формы, так как время корреляции этих сигналов сравнимо или меньше эффективной длительности самого сигнала ( $T_{ID} \approx \tau_v$ ), как показано на рис. 2 [2].

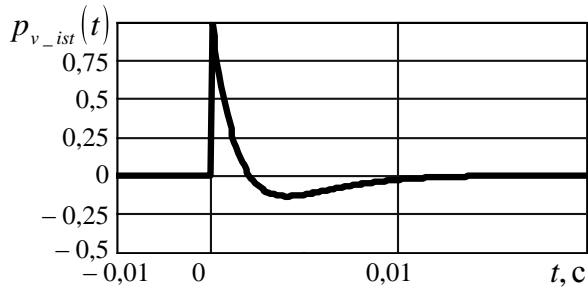


Рис. 1. Временная структура АС выстрела в начальной точке

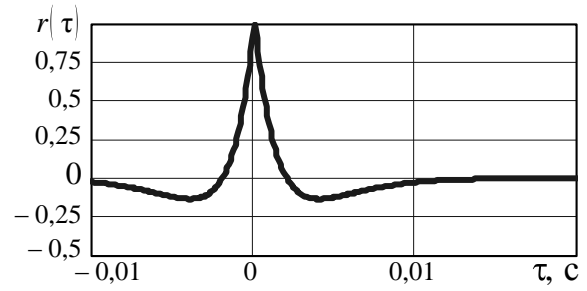


Рис. 2. Автокорреляционная функция АС выстрела в начальной точке

Обработка акустических сигналов в устройствах обнаружения может проводиться после преобразования этих сигналов в электрические аналоги при помощи акусто-электрических преобразователей [1].

В точке приема временная структура АС выстрела на выходе акусто-электрического преобразователя с учетом (1) в общем виде описывается выражением [1]:

$$\begin{aligned}
 u_{v_{pr}}(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \int_{-\infty}^{\infty} K_{ap} p_{v_{ist}}(t) \exp\{i\omega t\} dt \right] \exp\{i\Delta_z \Psi, \omega R + i\omega t\} d\omega = \\
 &= \frac{K_{ap} P_0}{8\pi^2 R^2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{i\omega T_{ID}^2}{(1 + i\omega T_{ID})^2} \exp\{i\Delta_z \Psi, \omega R + i\omega t\} d\omega
 \end{aligned} \quad (2)$$

где  $R$  — дальность распространения АС, м;  $\Delta_z \Psi, \omega$  — суммарный коэффициент погонного затухания,  $c^{-2}/m$ , который зависит от параметров среды распространения сигнала  $\Psi$  и частоты  $\omega$ ;  $K_{ap}$  — линейный коэффициент преобразования приемного устройства.

Из (2) видно, что форма сигнала в точке приема зависит от суммарного коэффициента погонного затухания  $\Delta_z \Psi, \omega$ , дальности до источника АС выстрела  $R$  и его формы в начальной точке  $p_{v_{ist}}(t)$ .

Как известно из [2, 3], любой непрерывный сигнал можно представить в виде набора дискретных значений в фиксированные моменты времени

$$u_n = u_{v_{pr}}(n\Delta t - t_z),$$

где  $\Delta t$  — интервал дискретизации АС.

Рассматривая дискретные отсчеты помехи  $h_n$  как статистически независимые нормально распределенные случайные величины с нулевым математическим ожиданием и средней мощностью (дисперсией)  $\sigma_h^2$ , многомерную плотность вероятности  $N$  дискретных значений принятого сигнала  $f_n$  в отсутствие на входе приемного устройства полезного сигнала ( $f_n = h_n$ ) в общем виде можно описать следующим выражением:

$$p_0(\vec{f}) = \frac{1}{\sqrt{\pi \sigma_h^2 N}} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_h^2} \sum_{n=1}^N f_n^2\right], \quad (3)$$

где  $N = \lfloor 3T_{ID}/\Delta t \rfloor$  — число дискретных значений АС в пределах эффективной длительности сигнала.

Статистически полезный сигнал выстрела можно представить в двух вариантах.

Для *первого варианта* полагаем, что соседние дискретные отсчеты сигнала выстрела, ввиду случайного характера времени задержки, а также сильных искажений этого сигнала при распространении у поверхности Земли, описываются одномерными нормальными законами распределения, некоррелированы между собой и сохраняют свои энергетические свойства. Для этого варианта многомерная плотность вероятности полезного сигнала может быть описана  $N$ -мерным нормальным законом распределения

$$p(\mathbf{f}) = \frac{1}{\sqrt{\pi^N \prod_{n=1}^N \sigma_{v,n}^2}} \exp\left[-\frac{1}{2} \sum_{n=1}^N \frac{u_n^2}{\sigma_{v,n}^2}\right]. \quad (4)$$

С учетом (3) и (4) многомерная плотность вероятности аддитивной смеси полезного сигнала и помехи ( $f_n = h_n + u_n$ ) на выходе приемного устройства определяется выражением

$$p_1(\mathbf{f}) = \frac{1}{\sqrt{\pi^N \prod_{n=1}^N (\sigma_{v,n}^2 + \sigma_h^2)}} \exp\left[-\frac{1}{2} \sum_{n=1}^N \frac{f_n^2}{\sigma_{v,n}^2 + \sigma_h^2}\right]. \quad (5)$$

Для *второго варианта* полагаем, что АС выстрела распространяется с определенной дальности в свободном воздушном пространстве, т.е. величина каждого дискретного отсчета известна. Для этого варианта справедливо можем полагать, что дискретные отсчеты полезного сигнала вносят лишь смещение в закон распределения принятого сигнала, а его многомерную плотность вероятности можно представить в виде

$$p_1^*(\mathbf{f}) = \frac{1}{\sqrt{\pi \sigma_h^2}} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_h^2} \sum_{n=1}^N (f_n - u_n)^2\right]. \quad (6)$$

В качестве критерия для синтеза оптимального алгоритма обработки принятого сигнала выберем критерий Неймана–Пирсона, для которого решающим правилом обнаружения полезного сигнала является превышение отношения правдоподобия, формируемого на выходе устройства обработки, некоторого порогового значения [2]:

$$\Lambda = \frac{p_1(\mathbf{f})}{p_0(\mathbf{f})} \geq \Lambda_*(F), \quad (7)$$

где  $p_1(f)$  — плотность вероятности смеси полезного сигнала и помехи;  $p_0(f)$  — плотность вероятности помехи;  $\Lambda_*(F)$  — пороговое значение отношения правдоподобия для фиксированного значения вероятности ложной тревоги  $F$ .

### Разработка устройств обнаружения акустических сигналов выстрелов

Для *первого варианта* представления полезного сигнала отношение правдоподобия (7) с учетом (3) и (5) принимает следующий вид:

$$\Lambda = \sqrt{\prod_{n=1}^N \left(\frac{1}{\gamma_n + 1}\right)} \exp\left[\frac{1}{2\sigma_h^2} \sum_{n=1}^N \frac{\gamma_n}{\gamma_n + 1} f_n^2\right],$$

где  $\gamma_n$  — отношение сигнал/помеха для  $n$ -го дискретного отсчета входного сигнала.

Логарифм отношения правдоподобия определяется выражением

$$\ln \Lambda = z_1 = L_0 + \sum_{n=1}^N k_n f_n^2, \quad (8)$$

где  $L_0 = 0,5 \sum_{n=1}^N \ln \left[ \frac{1}{\gamma_n + 1} \right]$  — смещение;  $k_n = \frac{\gamma_n}{2\sigma_h^2(\gamma_n + 1)}$  — весовой коэффициент.

Логарифм отношения правдоподобия определяет структуру оптимального устройства обработки принятого сигнала.

Решение  $A_1^*$  о наличии полезного сигнала в соответствии с выбранным критерием принимается при условии  $z_1 \geq z_*$ , где  $z_*$  — порог решения. В противном случае ( $z_1 < z_*$ ) принимается решение об отсутствии полезного сигнала  $A_0^*$ .

Структурная схема оптимального устройства обнаружения акустического сигнала в соответствии с алгоритмом (8) и решающим правилом имеет вид, представленный на рис. 3.

Принцип работы разработанного оптимального устройства обработки основан на весовом суммировании квадратов модулей дискретных отсчетов принятого сигнала в пределах длительности ожидаемого полезного акустического сигнала.

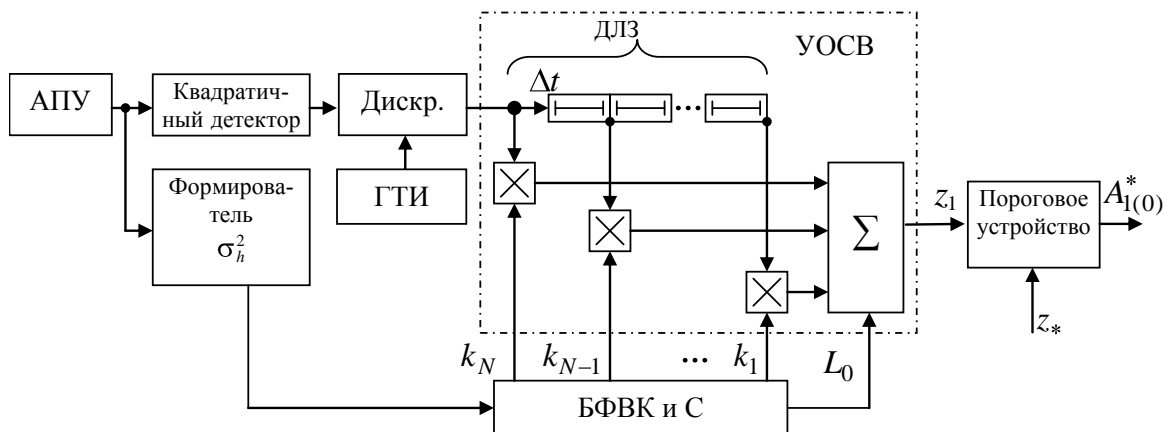


Рис. 3. Схема оптимального устройства обнаружения АС выстрела: АПУ — акустическое приемное устройство; Дискр. — дискретизатор входного сигнала; ГТИ — генератор тактовых импульсов; УОСВ — устройство обработки сигнала выстрела; ДЛЗ — дискретная линия задержки на длительность АС выстрела, величина каждого элемента которой определяется частотой дискретизации входного сигнала —  $\Delta t = 1/F_d$ ; БФВК и С — блок формирования весовых коэффициентов и смещения;  $\Sigma$  — сумматор

Алгоритм работы устройства следующий.

1. Непрерывный АС поступает на вход АПУ, где преобразуется в электрический, усиливается и дискретизируется с частотой  $F_d$ .

2. Квадрат каждого дискретного отсчета принятого сигнала  $f_n^2$  последовательно поступает на дискретную линию задержки и перемножается с весовым коэффициентом  $k_n$ .

3. Производится суммирование результатов перемножения, и полученный сигнал поступает на пороговое устройство, где принимается решение  $A_{1(0)}^*$  о наличии (отсутствии) полезного сигнала.

Величина средней мощности помехи  $\sigma_h^2$  для формирования весовых коэффициентов может быть получена из входной последовательности при отсутствии полезного сигнала выстрела.

Структура устройства обнаружения, представленная на рис. 3, оптимальна для одного АС выстрела, произведенного с определенной дальности из известного класса оружия. Для оптимальной обработки АС выстрела с различных дальностей для каждого из  $m = \overline{1, M}$  классов орудий необходимо использовать многоканальное устройство обнаружения, структура которого представлена на рис. 4. При этом зону ведения разведки можно разделить по дальности на  $I$  участков с глубиной  $R_i = i\Delta R$ ,  $i = \overline{1, I}$ .

В каждом подканале обработки формируется значение логарифма отношения правдоподобия, которое будет максимальным при соответствии энергетических параметров АС весовым коэффициентам и согласно решающему правилу:

$$\text{если } z_{i,m} \geq z_{j,b}, \quad i, j = \overline{1, I} \text{ и } i \neq j; \quad m, b = \overline{1, M} \text{ и } m \neq b, \quad (9)$$

принимается решение  $A_{i,m}^*$  о наличии полезного сигнала выстрела произведенного с дальности  $R_i$  и оружия  $m$ -го класса.

Недостатком таких типов обнаружителей являются высокие вычислительные (аппаратные) затраты при формировании весовых коэффициентов.

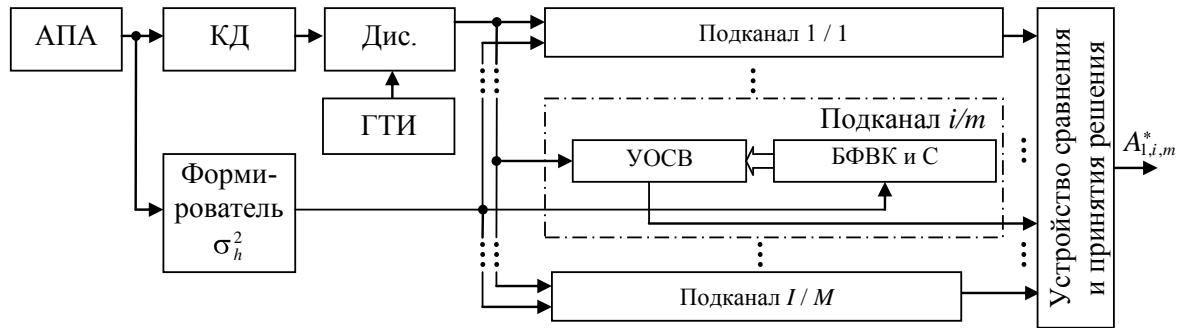


Рис. 4. Структура многоканального устройства оптимального обнаружения АС выстрела: УОСВ — устройство обработки сигнала выстрела; БФВК и С — блок формирования весовых коэффициентов  $k_n^{i,m}$  для АС сформированного на дальности  $R_i$ , характерного для  $m$ -го класса орудия

Для второго варианта представления полезного сигнала отношение правдоподобия (7) с учетом (3) и (6) принимает вид

$$\Lambda^* = \exp \left[ \frac{1}{\sigma_h^2} \sum_{n=1}^N f_n u_n - 2u_n^2 \right]. \quad (10)$$

Составляющая  $u_n^2$  является сигналом известной формы, поэтому этим слагаемым в (10) можно пренебречь.

Логарифм отношения правдоподобия определяется выражением

$$\ln \Lambda^* = z_2 = \frac{1}{\sigma_h^2} \sum_{n=1}^N f_n u_n. \quad (11)$$

Выражение (11) определяет оптимальный алгоритм обработки принятого сигнала для обнаружения АС выстрела с известной амплитудой каждого временного отсчета полезного сигнала. В соответствии с (11) и решающим правилом, аналогичным первому варианту (9), структура устройства обнаружения акустического сигнала выстрела принимает вид, представленный на рис. 5.

Принцип работы представленного на рис. 5 устройства заключается в перемножении дискретных отсчетов принятого сигнала с опорным и последующей нормировкой по уровню средней мощности помехи. На выходе устройства обработки формируется сигнал, амплитуда которого максимальна при совпадении формы принятого сигнала и опорного. По результатам сравнения величины полученного сигнала с опорным принимается решение  $A_{i(0)}^*$  о наличии (отсутствии) полезного сигнала.

Оптимальная обработка сигналов, сформированных различными классами оружия на различных дальностях, требует использования многоканального устройства.

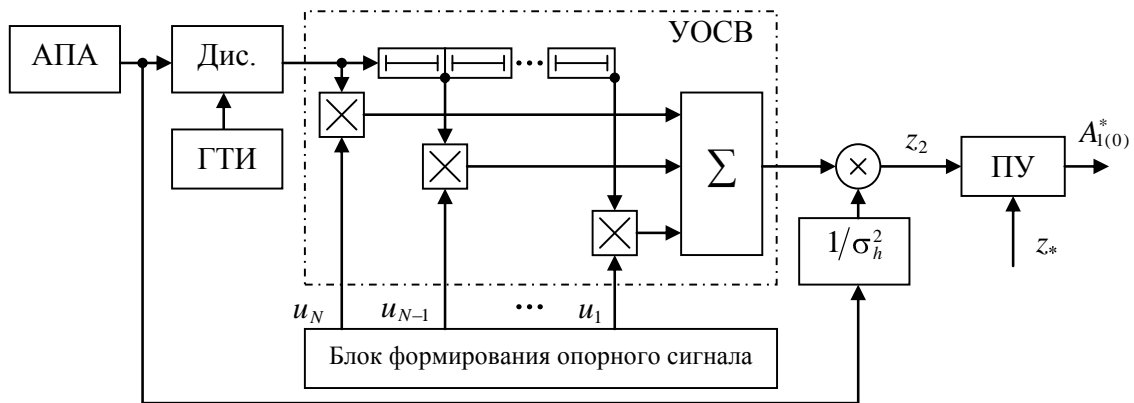


Рис. 5. Структура оптимального устройства обнаружения АС выстрела с известной временной структурой

### Анализ разработанных устройств обработки

Для анализа работы разработанных устройств обработки проведено математическое моделирование при следующих исходных данных.

1. Каждое устройство обнаружения имеет в своем составе три канала, каждый из которых настроен на обнаружение: 1 — акустического сигнала выстрела из артиллерийского орудия с длительностью фронта избыточного давления  $T_{ID}^{AO} = 6$  мс (калибр орудия — больше 122 мм); 2 — акустического сигнала выстрела из автомата (АК-74) с длительностью акустического сигнала  $T_{ID}^{AK} = 1$  мс; 3 — акустический сигнал выстрела из пистолета Макарова (ПМ) с длительностью акустического сигнала  $T_{ID}^{PM} = 0,6$  мс. Для формирования весовых коэффициентов (опорного сигнала) использовались математические модели этих сигналов.

2. На вход обнаружителя с интервалом 0,1 с последовательно поступали три реальных (структуры получены в результате экспериментальных исследований и представлены на рис. б) акустических сигнала (АС выстрела из артиллерийского орудия 122 мм, произведенного с дальности 2,5 км; АС выстрела из АК-74, произведенного с дальности 0,9 км и АС выстрела из ПМ, произведенного с дальности 0,9 км), а также помеха, время корреляции которой изменялось.

В качестве критерия эффективности работы разработанных устройств выбрано увеличение отношения сигнал/помеха на выходе устройств обработки в зависимости от времени корреляции помехи.

Из рис. 7 видно, что наиболее стабильными характеристиками обладает устройство обработки, разработанное для сигналов с низкой корреляцией между дискретными отсчетами полезного сигнала. Оба разработанных устройства увеличивают отношение сигнал/помеха на 6–15 дБ, что в 3–10 раз выше, чем в устройствах обработки стоящих на вооружении автоматизированных звукометрических комплексов.

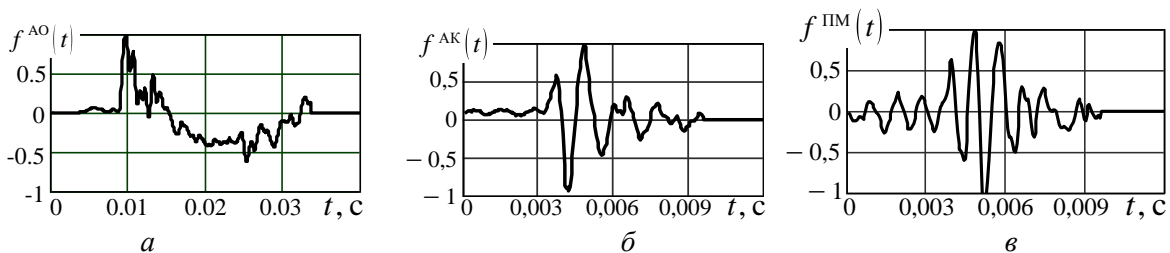


Рис. 6. Нормированные временные структуры АС выстрелов, полученные экспериментально: а — из артиллерийского орудия; б — из автомата АК-74; в — из пистолета ПМ

Результаты расчета отношения сигнал/помеха на выходе оптимальных устройств обработки представлены на рис. 7.

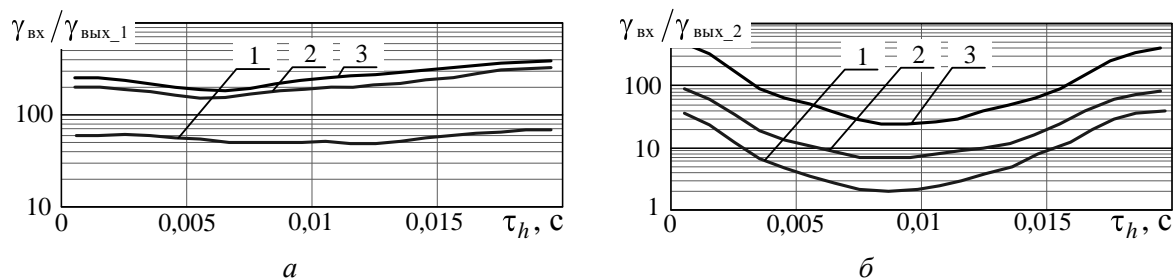


Рис. 7. Увеличение отношения сигнал/помеха на выходе оптимальных устройств обработки в зависимости от времени корреляции помехи для устройств, представленных: а) на рис. 3; б) на рис. 5. 1 — оптимальная обработка АС выстрела из артиллерийского орудия; 2 — оптимальная обработка выстрела из автомата; 3 — оптимальная обработка выстрела из пистолета

### Заключение

Разработаны оптимальные устройства обнаружения акустических сигналов выстрелов. Использование этих устройств позволит увеличить дальность автоматического обнаружения выстрелов из артиллерийского вооружения на 30–60 % и обнаруживать акустические сигналы выстрелов из стрелкового оружия, что является одним из перспективных направлений в создании систем и комплексов звукометрической разведки.

## ARTILLERY GUN FIRE ACOUSTIC SIGNALS DETECTION

S.R. GEYSTER, R.V. BYKAU, A.V. KURENEV

### Abstract

The statistical synthesis of algorithm for detection of acoustic firing signals that spread above surface is carried out. As a result of the synthesis two optimal devices for the signal procession are developed. They are for two cases of correlative firing signal. A short analysis of procession devices is made.

### Литература

1. Гейстер С.Р., Быков Р.В. / Вестник ВА РБ. 2006. № 2 (11).
2. Охрименко А.Е. Основы радиолокации и РЭБ. Ч. 1. Основы радиолокации. М., 1983.
3. Голд Б., Рэйдер Ч. Цифровая обработка сигналов с приложением работы Д. Кайзера "Цифровые фильтры". Пер. с англ. под ред. А.М. Трахтмана. М., 1973.