

УДК 621.396.96

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ АНАЛИЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕЛЕКЦИИ И ОБНАРУЖЕНИЯ ДВИЖУЩИХСЯ ЦЕЛЕЙ

**В. Е. Драч**, к.т.н., доцент кафедры ИТИМ СГУ, Сочи, Россия;  
orcid.org/0009-0009-6280-3160, e-mail: rpd-admin@inbox.ru

**Н. В. Самбуров**, начальник лаборатории СВЧ Калужского приборостроительного завода «Тайфун», Калуга, Россия;

orcid.org/0009-0008-2505-6015, e-mail: samburov.n.v@yandex.ru

**И. В. Чухраев**, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой ИУК2 КФ МГТУ им. Баумана, Калуга, Россия;  
orcid.org/0000-0002-9293-4825, e-mail: chukhraev@bmstu.ru

*Предложена математическая модель, использующая общий подход к оценке качества обнаружения в широком диапазоне доплеровских скоростей цели. На основе модели рассмотрена комплексная эффективность использования обработки МТИ и МТД в корабельных обзорных РЛС при обнаружении аэродинамических целей, находящихся в условиях естественных пассивных помех с учетом внутренних дестабилизирующих факторов станции. Целью статьи является разработка математической модели, использующей общий подход к оценке качества обнаружения в широком диапазоне доплеровских скоростей цели, и на ее основе комплексная оценка эффективности использования МТД и МТИ для защиты от гидрометеоров в корабельных РЛС обзора воздушного пространства. При рассмотрении ограничили типовыми диапазонами рабочих частот и распространенными методами частотной селекции. В качестве пассивных помех принято дождевое облако гидрометеоров средней интенсивности.*

**Ключевые слова:** математическая модель, радиолокационная станция, пассивные помехи, подавитель пассивных помех, гидрометеоры, частотная селекция, селекция движущихся целей, режекторный фильтр, доплеровский фильтр.

**DOI:** 10.21667/1995-4565-2023-86-22-31

### Введение

Работа обзорной радиолокационной станции (РЛС) в условиях воздействия естественных помех является нормальным (типичным) режимом работы станции. Увеличение энергетического потенциала слабо сказывается на вероятности обнаружения целей, расположенных в облаке гидрометеоров, поэтому вопросы обработки являются первоопределяющими в процессе проектирования станции.

Различают способы защиты от пассивных помех, основанные на частотной, пространственной и поляризационной селекции. В [1] рассмотрена эффективность различных видов селекции для защиты наземных обзорных РЛС от помех, образованных наличием гидрометеоров в разрешающем объеме. В качестве объектов для анализа принят гипотетический ряд РЛС управления воздушным движением (РЛС УВД), работающих в различных диапазонах волн. Численной оценке подвергался показатель качества, характеризующий эффективность обнаружения крупного пассажирского самолета в облаке гидрометеоров, выраженный через коэффициент улучшения аппаратуры обработки и сравниваемый с пороговым (требуемым) значением.

В отличие от РЛС УВД корабельные РЛС имеют свои особенности, которые в процессе исследования следует учитывать, а именно:

1) габаритные размеры апертуры антенны строго ограничены возможностями размещения на носителе;

2) период обзора, а также тип обнаруживаемой цели должны быть согласованны с типовыми задачами корабельных станций.

В дополнение к этому в процессе исследований следует уточнить методологию оценки эффективности и диапазон работы исследуемых РЛС, расширить номенклатуру методов квазиоптимальной обработки, дополнить ряд дестабилизирующих факторов, актуализировать параметры излучаемых сигналов и достижимые характеристики приемника-обнаружителя.

Результатом выполнения настоящей работы является разработка математической модели, использующей общий подход к оценке качества обнаружения в широком диапазоне доплеровских скоростей цели, и на ее основе комплексная оценка эффективности использования МТД и МТИ для защиты от гидрометеоров в корабельных РЛС обзора воздушного пространства.

### Теоретическая часть

Корабельные обзорные РЛС предназначены для обнаружения и сопровождения воздушных и надводных целей [2]. Следовательно, эти станции должны характеризоваться высокой информативностью в плане задачи обзора пространства, а именно – круговой зоной обзора и высоким разрешением с однозначностью по дальности. Поэтому большинство таких РЛС относятся к классу когерентно-импульсных станций (когерентно-импульсные РЛС большой скважности). С учетом ряда технико-экономических причин круговой обзор пространства обеспечивается механическим способом сканирования лучом (вращением полотна антенны). Методы и способы сканирования (а также канальность станции) в вертикальной плоскости могут быть любыми при условии формирования пачки отраженных импульсов с длиной, достаточной для оптимальной обработки. Таким образом, объектами исследования являются когерентно-импульсные РЛС с последовательным обзором в горизонтальной плоскости.

Рассмотрим наиболее характерный случай – обнаружение аэродинамической цели среднего размера, движущейся равномерно и прямолинейно в облаке гидрометеоров. За основу методики исследования примем методику, изложенную в [1], дополненную и измененную следующим образом.

1. Анализу подвергается гипотетический ряд РЛС, работающих в диапазонах длин волн 3...25 см, что соответствует рабочим диапазонам корабельных станций [3-5].

2. Размер апертуры антенн для всего ряда рассматриваемых РЛС принимаем постоянным. Данное условие имеет практический смысл в связи с фактическим дефицитом места для расположения антенн РЛС на кораблях современной постройки и соответствующими ограничениями на размеры апертуры [6-8]. При этом актуальность этой проблемы растет в связи с широким внедрением Stealth-технологий в кораблестроении.

3. Полагаем, что в рассматриваемых РЛС имеет место квазиоптимальная обработка сигнала на видеочастоте на основе технологий МТИ (Moving Target Indication) и МТД (Moving Target Detector); причём, что МТИ-обработка организована с помощью простейших режекторных фильтров на базе устройств череспериодных компенсаторов (ЧПК), а МТД-обработка – набора доплеровских фильтров с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтров), реализованных с помощью БПФ [2]. Наличием ограничителя и других нелинейностей в тракте пренебрегаем.

4. Оценку качества обработки проведем с учетом ряда дестабилизирующих факторов, вызывающих как расширение спектра внешних помех, так и появление дополнительных помех. Оценку качества фильтрации будем проводить численным способом в спектральной области.

5. Для оценки качества обнаружения воспользуемся дифференциальным методом оценки в области доплеровских частот. Классический интегральный метод оценки качества, выражаемый через единый коэффициент улучшения отношения сигнал-шум или сигнал-помеха, имеет слабую практическую значимость, так как фильтры (в частности – режекторные) имеют изрезанную АЧХ (вплоть до нулей в областях режекции). Поэтому с целью актуализации показа-

теля качества для проведения сравнительных оценок следует дополнить оценку качества обработки исследованием эффективности для каждого поддиапазона доплеровских частот.

Таким образом, актуальной является задача разработки математической модели, использующей дифференциальный подход к оценке качества обнаружения в широком диапазоне доплеровских скоростей цели, и на ее основе комплексная оценка эффективности использования МТД и МТІ для защиты от гидрометеоров в корабельных РЛС обзора воздушного пространства.

### Математическая модель

Рассмотрим математическую модель, характеризующую факт обнаружения цели. Условием обнаружения цели на фоне гидрометеоров для  $i$ -го поддиапазона доплеровского смещения сигнала [где  $i = 0, 1, \dots, (N - 1)$ ,  $N$  - количество поддиапазонов] на выходе фазового детектора примем:

$$\bar{I}_i > \bar{K}_r, \quad (1)$$

где  $\bar{I}_i$  – значение коэффициента улучшения соотношения сигнал-помеха для  $i$ -го поддиапазона;  $\bar{K}_r = \frac{\gamma_{\Sigma} \bar{\sigma}_h}{\sigma}$  – требуемое значение соотношения сигнал-помеха, при котором цель обнаруживается на фоне гидрометеоров;  $\gamma_{\Sigma}$  – коэффициент различимости;  $\bar{\sigma}_h$  – средняя ЭПР гидрометеоров, находящихся в разрешаемом объеме РЛС;  $\bar{\sigma}$  – средняя эффективная площадь рассеивания (ЭПР) цели.

Величины  $\bar{I}_i$  и  $\bar{K}_r$  необходимо оценить для цели, находящейся на дальности  $D$  в условиях среднего дождя (по аналогии с [1] интенсивность осадков  $w = 10$  мм/ч, скорость ветра  $\sigma_v = 4$  м/с). Для этого предварительно найдем множитель отражаемости  $Z$  и удельную ЭПР гидрометеоров  $\bar{\sigma}_{oo}$  согласно следующим выражениям [9]:

$$Z = 200 w^{1.6} \text{ (мм}^6/\text{м}^3\text{)}, \quad (2)$$

$$\bar{\sigma}_{oo} = \frac{0,93\pi^5}{\lambda^4} Z \text{ (мм}^2/\text{м}^3\text{)}, \quad (3)$$

где  $\lambda$  – длина волны несущей частоты РЛС  $f_R$  (в данном выражении – в мм).

Средняя ЭПР гидрометеоров в разрешаемом объеме РЛС:

$$\bar{\sigma}_h = \bar{\sigma}_{oo} \frac{c\tau}{2B} \frac{\pi D^2}{4} \theta_1 \theta_2, \quad (4)$$

где  $\tau$  – длительность импульса;  $B$  – база сжатого сигнала;  $\theta_1, \theta_2$  – ширина диаграммы направленности (ДН) в горизонтальной и вертикальной плоскостях соответственно. Для фиксированного размера апертуры  $d_1 \times d_2$  ширина ДН находится согласно выражениям:  $\theta_1 = 1,25\lambda / d_1$ ,  $\theta_2 = 1,25\lambda / d_2$ , где  $d_1$  и  $d_2$  – максимальные размеры апертуры в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Проведем оценку предельной величины коэффициента улучшения спектральной обработки  $\bar{K}_{SCi}$ . Ширина спектра помехи на входе определяется флуктуацией отражающей поверхности метеобразований, модуляцией сигналов при обзоре пространства лучом и внутренними нестабильностями станции. В этом случае энергетический спектр пассивной помехи  $S_C(f)$  вблизи нулевой спектральной линии может быть аппроксимирован колоколообразной (гауссовой) функцией вида:

$$S_C(f) = S_{C0} \exp\left(-\frac{f^2}{2(\sigma_c^2 + \sigma_a^2 + \Delta F_{sys}^2 + \Delta F_{mov}^2)}\right), \quad \text{для } -\frac{F}{2} \leq f \leq \frac{F}{2}. \quad (5)$$

В выражении (5):  $S_{c0}$  – плотность мощности сигнала на нулевой частоте (нормирующий коэффициент) энергетического спектра;  $f$  – частота;  $\sigma_c = \frac{2\sigma_v}{\lambda}$  – ширина спектра сигналов, отраженных от метеобразований;  $\sigma_a = \frac{\Omega_A}{3.78\theta_1}$  – величина расширения спектра, вызванного вращением антенны с угловой скоростью  $\Omega_A$ ;  $\Delta F_{sys}$  – абсолютное значение частотной нестабильности приемо-передающих устройств РЛС;  $\Delta F_{mov} = \frac{v_{mov}}{\lambda\sqrt{2}}\theta_1$  – характеризует максимальное расширение спектра (т.е. для траверзных направлений ДН), вызванное движением носителя РЛС (фазового центра антенны) со скоростью  $v_{mov}$ .

Тогда для нахождения коэффициента улучшения  $\overline{K}_{SCi}$  устройств обработки необходимо найти коэффициенты подавления пассивной помехи  $k_C$  и усиления мощности полезного сигнала  $\overline{K}_i$  для  $i$ -го поддиапазона частот:

$$k_C = \frac{\int_{-\frac{F}{2}}^{\frac{F}{2}} S_C(f) df}{\int_{-\frac{F}{2}}^{\frac{F}{2}} S_C(f) K^2(f) df}, \quad (6)$$

$$\overline{K}_i = \frac{\int_{f_i}^{f_i+\Delta f} S_S(f) K^2(f) df}{\int_{f_i}^{f_i+\Delta f} S_S(f) df}, \quad (7)$$

где  $i = 0, 1, \dots, (N-1)$ ;  $K(f)$  – АЧХ устройства обработки;  $f_i$  и  $\Delta f$  – начальная частота и ширина  $i$ -го поддиапазона:  $f_i = f_0 + i \cdot \Delta f$ ,  $f_0 = -\frac{F}{2}$ ,  $\Delta f = \frac{F}{N}$ ;  $S_S(f)$  – спектральная плотность распределения радиальной скорости цели. Обычно величину доплеровского смещения частоты сигнала принимают равномерной в диапазоне  $\Delta f$ , тогда  $S_S(f) = N_0$ , где  $N_0$  – спектральная плотность белого шума.

АЧХ устройств обработки  $K(f)$  при использовании МТИ-обработки на базе ЧПК  $n$ -й кратности соответствует выражению [10]:

$$K_{MTI}(f) = 2^n \left( \left| \sin \left( \frac{\pi f}{F} \right) \right| \right)^n. \quad (8)$$

Для случая МТД-обработки используется набор из  $N_{DF}$  фильтров, частотные характеристики которых перекрывают полосу частот сигналов, что позволяет не только разделять сигналы по доплеровскому приращению частоты, но и за счет согласованной фильтрации в доплеровских фильтрах улучшить соотношение полезного сигнала к шуму. АЧХ  $k$ -го фильтра описывается выражением [2]:

$$K_{DFk}(f) = \left| \frac{\sin \left( N_{DF} \pi \left( \frac{f}{F} - \frac{k}{N_{DF}} \right) \right)}{\sin \left( \pi \left( \frac{f}{F} - \frac{k}{N_{DF}} \right) \right)} \right|, \quad (9)$$

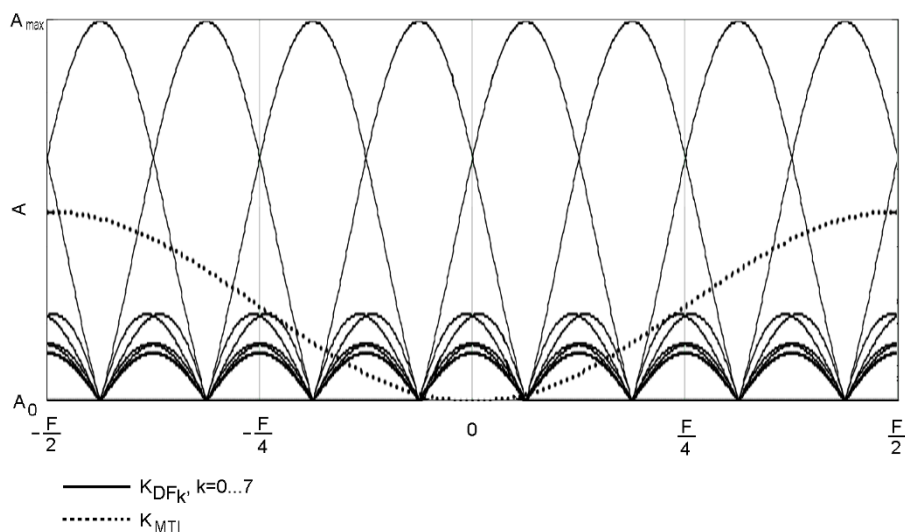
где  $k = 0, 1, \dots, (N_{DF} - 1)$ .

Согласно (8), центральный ( $k = 0$ ) доплеровский фильтр соответствует нулевому доплеровскому смещению сигналов, что может иметь практический смысл, например, при формировании карты помех, либо – для обнаружения малоскоростных целей. Вопросы построения обнаружителя РЛС, а также вопросы селекции малоскоростных и малоподвижных целей здесь не рассматриваются. С учетом того, что значение  $N_{DF}$  целесообразно выбирать равным целой степени 2 (а значит четным), полосы пропускания набора фильтров имеет смысл расположить симметрично относительно точки нулевого доплеровского смещения (точки  $f = 0$ ). В дополнение к этому с целью сохранения общности исследований приведем выражение (8) к принятой выше полосе частот исследования:

$$K_{DFk}(f) = \left| \frac{\sin \left( N_{DF} \pi \left( \frac{2f - \frac{F}{N_{DF}}}{2F} + \frac{1}{2} - \frac{k}{N_{DF}} \right) \right)}{\sin \left( \pi \left( \frac{2f - \frac{F}{N_{DF}}}{2F} + \frac{1}{2} - \frac{k}{N_{DF}} \right) \right)} \right|. \quad (10)$$

АЧХ фильтров  $K_{DFk}(f)$  и  $K_{MTI}(f)$  условно показаны на рисунке 1. Непосредственно значение коэффициента улучшения при спектральной обработке сигнала для  $i$ -го поддиапазона можем найти, используя (6) и (7), принимая во внимание:

$$\overline{K_{Sci}} = k_c \overline{K_i}. \quad (11)$$



**Рисунок 1 – АЧХ фильтров, а также энергетический спектр пассивной помехи**  
**Figure 1 – Frequency response of filters, as well as energy spectrum of passive interference**

Значение коэффициента улучшения с учетом всех ограничивающих факторов определяется выражением:

$$\bar{I}_i = \left( \frac{1}{K_{Sci}} + \sum_{j=1}^5 \frac{1}{I_j} \right)^{-1}, \quad (12)$$

где  $I_j$  – предельное значение коэффициента улучшения (КУ), ограниченное различными факторами нестабильности и особенностями аппаратуры обработки.

Частотная нестабильность приемопередающей аппаратуры (частоты и фазы передатчика, местного и когерентного гетеродинов) была учтена выше введением параметра  $\Delta F_{sys}$  [выражение для  $S_c(f)$ ]. Другие дестабилизирующие факторы выражаются через ряд величин  $I_j$ , а именно:

1) *флуктуации временного положения зондирующих импульсов* – временной джиттер, характеризуемый величиной  $\Delta t$ , приводит к ухудшению подавления передних и задних фронтов импульса и соответствующему ограничению на КУ:  $I_1 = \frac{\tau}{2B(\Delta t)^2}$  или  $I_1 = \frac{\tau}{2B^2(\Delta t)^2}$  - для ЛЧМ и ФКМ сигнала соответственно;

2) *флуктуации длительности импульсов*  $\Delta \tau$  приводят к остаткам, составляющим половину остатка от временного джиттера при равной величине флуктуации. Таким образом для вычисления соответствующего ограничения на коэффициент улучшения  $I_2$  можно использовать выражение для  $I_1$ , причем  $\Delta t = \frac{\Delta \tau}{\sqrt{2}}$ ;

3) *амплитудный джиттер* вызывает ограничение коэффициента улучшения до уровня  $I_3 = \left( \frac{\Delta A}{A} \right)^{-2}$ , где  $\frac{\Delta A}{A}$  – относительное изменение амплитуды в результате флуктуаций;

4) *джиттер АЦП* для цифровой системы сжатия приводит к следующему ограничению:  $I_4 = \frac{\tau}{(JB)^2}$ , где  $J$  – величина флуктуации интервала дискретизации АЦП;

5) *шум квантования*, вызванный ограниченной величиной разрядности  $N$  АЦП. Для случая двух независимо флуктуирующих квадратурных каналов I и Q (рисунок 1) шум приводит к следующему значению максимального КУ:  $I_5 = 0,75(2^N - 1)^2$ .

Влияние вобуляции периода следования импульсов (соответственно и частоты  $F$ ), проявляющееся в дополнительном расширении спектра помех при сканировании и случайных (некоррелированных) перемещений гидрометеоров, здесь не рассматривается. Качество обнаружителя и статистика обнаружения учитываются через величину  $\gamma_\Sigma$ .

### Результаты моделирования

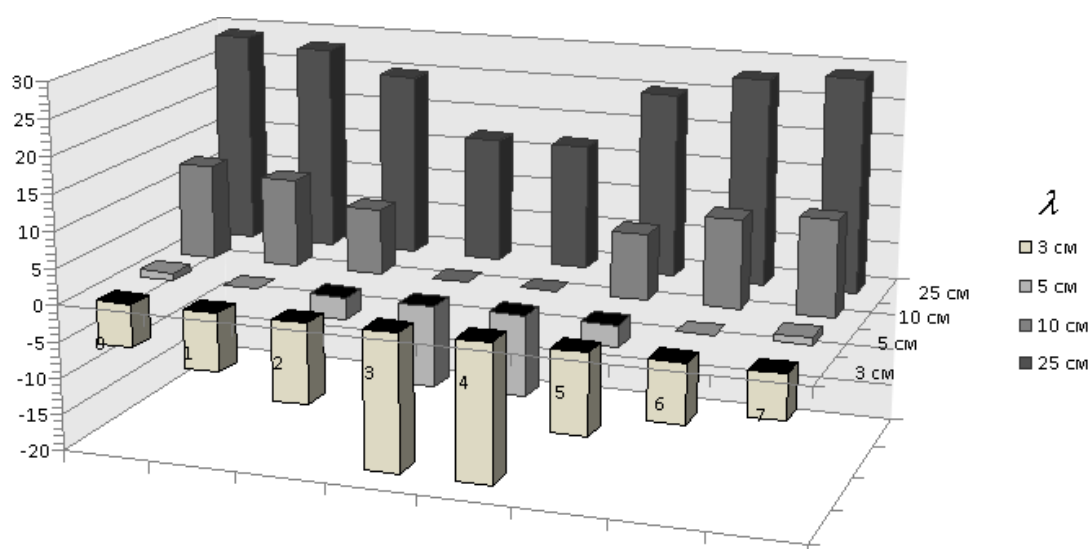
Полагаем, что цель с величиной ЭПР  $\bar{\sigma} = 10 \text{ м}^2$  находится на дальности  $D = 50 \text{ км}$  от РЛС в облаке гидрометеоров с вышеприведенными параметрами, соответствующими дождевым условиям средней интенсивности.

Примем сформированные на основе [3, 4, 5, 11] следующие значения параметров станции: размеры апертуры антенны РЛС  $d_1 \times d_2 = 2 \times 2 \text{ м}$ , относительная нестабильность частоты  $\frac{\Delta F_{sys}}{f_R} = 10^{-8}$  (где  $f_R$  – несущая частота сигнала), коэффициент различимости  $\gamma_\Sigma = 8$ . Зондирование цели осуществляется когерентной последовательностью сложных ( $B = 10$ ) импульсных сигналов длительностью  $\tau = 1 \text{ мкс}$ , с частотой следования  $F = 2 \text{ кГц}$ . Для технически грамотно спроектированной системы можно считать, что для любых значений  $i$  и  $j$  справедливо:  $I_j \ll K_{Sci}$ . Скорость вращения антенны  $\Omega_A = 12 \text{ мин}^{-1}$ . Скорость корабля  $v_{mov} = 30 \text{ уз}$  (качкой пренебрегаем).

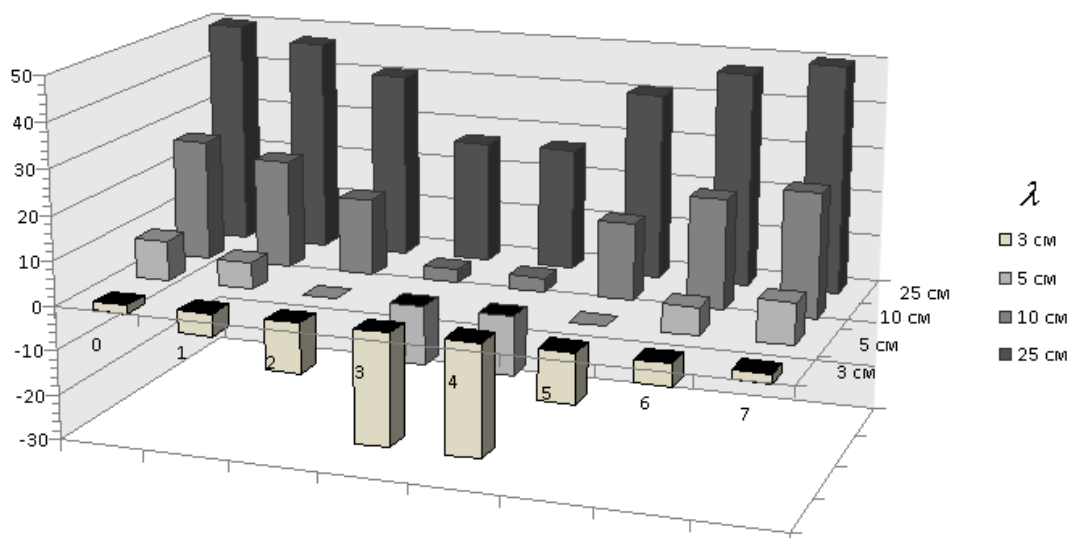
При рассмотрении устройств ЧПК (для МТИ-обработки) ограничимся устройствами с кратностью  $n$ , не превышающей 2. Применение более высокой кратности приводит к значительному сужению АЧХ фильтра и ухудшению скоростной характеристики.

Для МТД-обработки размерность доплеровской фильтрации примем равной количеству поддиапазонов частотного анализа:  $N_{DF} = 8$ ,  $N = 8$ . В этом случае нулевое значение доплеровского смещения частоты располагается на границе поддиапазонов с номерами  $i$ , равными 3 и 4.

Результаты математического моделирования (величина  $\frac{\bar{I}_i}{\bar{K}_r}$ , в дБ, округленная до единиц) для различных несущих частот и способов обработки представлены на рисунке 2 (для МТИ-обработки) и рисунке 3 (для МТД-обработки). Положительные величины (в дБ) характеризуют возможность обнаружения цели на фоне гидрометеоров.



а (а)



б (b)

Рисунок 2 – Результаты моделирования (величина  $\frac{\bar{I}_i}{\bar{K}_r}$ , в дБ, округленная до единиц) при МТИ-обработке для различных длин волн, по оси абсцисс перечислен номер поддиапазона; а – для  $n = 1$ , б – для  $n = 2$

Figure 2 – Simulation results (value of  $\frac{\bar{I}_i}{\bar{K}_r}$ , in dB, rounded to units)

for MTI processing for different wavelengths, the number of sub-band is listed along abscissa axis;  
a – for  $n = 1$ , b – for  $n = 2$

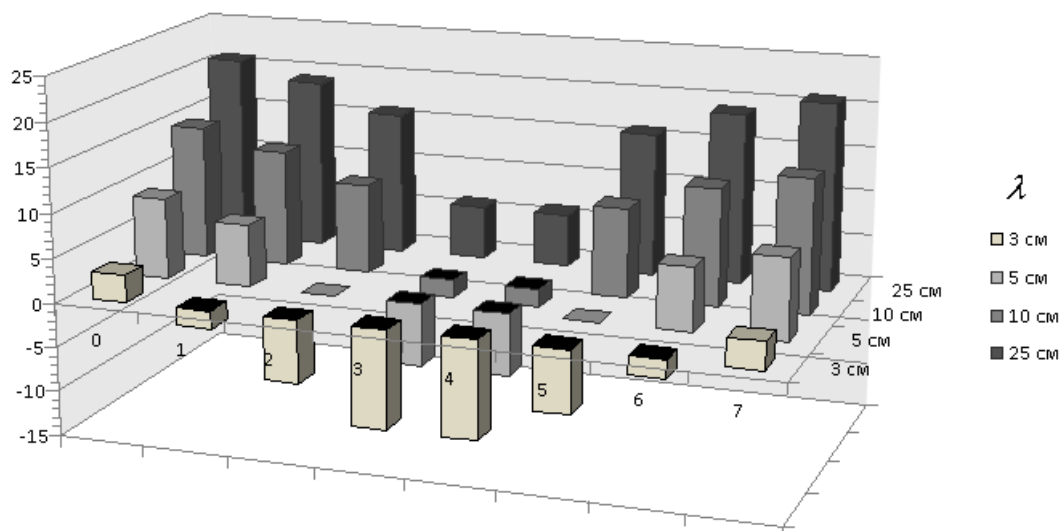


Рисунок 3 – Результаты моделирования (величина  $\frac{\bar{I}_i}{K_r}$ , в дБ, округленная до единиц)

при MTD-обработке для различных длин волн, по оси абсцисс перечислен номер поддиапазона

Figure 3 – Simulation results (value of  $\frac{\bar{I}_i}{K_r}$ , in dB, rounded to units) for MTD processing

for different wavelengths, the number of sub-band is listed along abscissa axis

Анализ результатов моделирования показал, что применение MTD-обработки по сравнению с МТИ-обработкой в большинстве рассмотренных случаев дает лучший результат. Исключением является случай, когда длина волны более 10 см. В этом случае ширина полосы помеховых отражений значительно сужается и на первое место по эффективности выходит обеспечение высокого уровня подавления сигналов с доплеровским смещением, близких к нулю (что лучше обеспечивается аппаратурой ЧПК).

Целесообразно исследовать возможности дополнения режекторного фильтра МТИ набором доплеровских фильтров МTD. Анализ результатов моделирования указывает на то, что данное построение для приведенных условий имеет смысл (в плане повышения соотношения сигнал-помеха) только в ДМ-диапазоне частот ( $\lambda = 10 \dots 25$  см).

### Заключение

В настоящей работе представлены математическая модель и комплексная методика оценки качества обнаружения целей на ее основе, учитывающая энергетические и спектральные характеристики пассивных помех, а также характеристики диаграммообразования, аппаратуры обработки, сигналообразования и обзора РЛС. Из всех рассматриваемых факторов, являющихся причиной расширения спектра помех, наиболее значимым оказывается флуктуация, вызванная движением гидрометеоров; в связи с чем наблюдается сильная зависимость качества частотной селекции от длины волны. Для борьбы с данным эффектом следует использовать адаптивные многоканальные режекторные фильтры [12].

### Библиографический список

1. Томило О.Г. Оценка эффективности различных видов селекции для защиты от гидрометеоров в обзорных РЛС // Радиотехника. 2001. № 11. С. 54-55.
2. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория: справочник / Под ред. Я.Д. Ширмана. М.: Радиотехника, 2007. 512 с.
3. Melvin W. L., Scheer J. A. Principles of Modern Radar / Scitech Publishing. Edison, NJ. 2014. Vol. III. 778 p.



4. **Briggs J. N.** Target Detection by Marine Radar / The Institution of Engineering and Technology. London, UK. 2004. 670 p.
5. **Перунов Ю.М., Мацукевич В.В., Васильев А.А.** Зарубежные радиоэлектронные средства. В 4-х книгах. Кн. 1: Радиолокационные системы. М.: Радиотехника, 2010. 336 с.
6. **Шляхтенко А.В., Захаров И.Г., Лысенко Э.Л.** Развитие антенных устройств и тенденции формирования проектно-архитектурных решений перспективных надводных кораблей // Морская радиоэлектроника. 2016. № 1(55). С. 4-8.
7. **Tupper E.C.** Introduction to Naval Architecture. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2013. 496 p.
8. **Pemberton R., Stokoe E. A.** Naval Architecture for Marine Engineers / Bloomsbury Publishing. London, UK. 2018. Vol. 4. 400 p.
9. **Финкельштейн М. И.** Основы радиолокации: учебник для вузов. М.: Радио и связь, 1983. 536 с.
10. **Бакулев П.А.** Методы и устройства селекции движущихся целей. М.: Радио и связь, 1986. 288 с.
11. Морская радиоэлектроника: справочник / **И.В. Соловьев, Г.Н. Корольков, А.А. Бабенко и др.**; под ред. В.А. Кравченко. – СПб.: Политехника, 2003. 246 с.
12. **Кошелев В.И., Ву Туан Ань.** Адаптация многоканального режекторного фильтра к параметрам помех // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2007. № 21. С. 94-96.

UDC 621.396.96

## A MATHEMATICAL MODEL TO ANALYZE THE EFFICIENCY OF MOVING TARGETS INDICATION AND DETECTION

**V. E. Drach**, Ph.D. (in technical sciences), associate professor, IT Department, SGU, Sochi, Russia;  
orcid.org/0009-0009-6280-3160, e-mail: rpd-admin@inbox.ru

**N. V. Samburov**, UHF laboratory, JSC Taifun, Kaluga, Russia;  
orcid.org/0009-0008-2505-6015, e-mail: samburov.n.v@yandex.ru

**I. V. Chukhraev**, PhD (in technical sciences), associate professor, Head of the Department, Bauman MSTU (Kaluga branch), Kaluga, Russia;  
orcid.org/0000-0002-9293-4825, e-mail: chukhraev@bmstu.ru

*A mathematical model that uses a differential approach to assess detection quality in a wide range of target Doppler velocities is proposed. Based on the model, the authors consider complex efficiency of MTI and MTD application in processing ship survey radars when detecting aerodynamic targets in the conditions of natural passive interference, taking into account internal destabilizing factors of station. **The aim of the article** is to develop a mathematical model that uses a differential approach to assess detection quality in a wide range of Doppler target speeds, and based on it, to comprehensively assess the efficiency of MTD and MTI application for the protection against hydrometeors in ship-based airspace survey radars. When considering, we limited ourselves to typical operating frequency ranges and common methods of frequency selection. A rain cloud of hydrometeors of medium intensity is accepted as passive clutter.*

**Keywords:** mathematical model, MTI, MTD, radar station, passive interference, passive interference suppressor, hydrometeors, frequency selection, selection of moving targets, vector filter, doppler filter.

**DOI:** 10.21667/1995-4565-2023-86-22-31

### References

1. **Tomilo O. G.** Otsenka effektivnosti razlichnyh vidov selektsii dlya zashity ot gidrometeorov v obzornyh RLS. *Radiotekhnika*. 2001, no. 11, pp. 54-55 (in Russian).
2. *Radioelektronnye systemy. Osnovy postroeniya i teoriya: spravochnik* (Radioelectronic systems. Basics of development and theory) / Edited by **Ya. D. Shirman**, Moscow: Radiotekhnika, 2007, 512 p. (in Russian).

3. **Melvin W. L., Scheer J. A.** *Principles of Modern Radar*. Scitech Publishing. Edison, NJ. 2014, vol. III. 778 p.
4. **Briggs J. N.** *Target Detection by Marine Radar*. The Institution of Engineering and Technology. London, UK. 2004. 670 p.
5. **Perunov Yu.M., Matsukevich V.V., Vasilyev A.A.** *Zarubezhnye radioelektronnye sredstva* (Foreign radio electronic devices). In 4 volumes. Vol. 1: Radiolokatsionnye systemy. Moscow: Radiotekhnika. 2010. 336 p. (in Russian).
6. **Shlyahenko A. V., Zaharov I. G., Lysenko E. L.** Razvitie antennyh ustoychiv i tendentsii formirovaniya proektno-arhitekturnykh reshenij perspektivnykh havodnykh korablye. *Morskaya radioelektronika*. 2016, no. 1 (55), pp. 4-8. (in Russian).
7. **Tupper E.C.** *Introduction to Naval Architecture*. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2013. 496 p.
8. **Pemberton R., Stokoe E.A.** *Naval Architecture for Marine Engineers*. Bloomsbury Publishing. London, UK. 2018, vol. 4, 400 p.
9. **Finkelshtein M. I.** *Osnovy radiolokatsii* (Basics of Radio Location). Moscow: Radio i svyaz, 1983, 536 p. (in Russian).
10. **Bakulev P. A.** *Metody i ustroystva selekcii dvizhuschihsya tseley* (Methods and devices to select moving targets). Moscow: Radio i svyaz, 1986, 288 p. (in Russian).
11. *Morskaya radioelektronika* / **I.V. Solov'ev, G.N. Korol'kov, A.A. Babenko et al.** Sankt-Petersburg: Politehnika. 2003, 246 p. (in Russian).
12. **Koshelev V.I., Vu Tuan Anh.** Adaptatsiya mnogokanal'nogo rezhektornogo filtra k parametram pomeh. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2007, no. 21, pp. 94-96. (in Russian).