

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный конструктор –
заместитель генерального директора
АО «Концерн ВКО «Алмаз-Антей»

П.А.Созинов

«___» декабря 2017 г.

СОГЛАСОВАНО

От МФТИ

«___» декабря 2017 г.

СОГЛАСОВАНО
заместитель начальника НТЦ ВКО
по специальным проектам – главный
конструктор ОКР «САПР-РЛС»

А.П.Коновальчик

«___» декабря 2017 г.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ
на разработку модуля предварительной оценки параметров РЛС

СОДЕРЖАНИЕ

1	НАЗНАЧЕНИЕ МОДУЛЯ.....	3
1.1	Оцениваемые тактические характеристики РЛС.....	3
1.2	Оцениваемые технические характеристики РЛС	4
2	ПОРЯДОК ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ТТХ РЛС	5
3	ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ.....	28
3.1	Таблица «Основные характеристики РЛС»	28
3.2	Таблица «Алгоритмы обработки РЛИ»	28
3.3	Таблица «ТТХ антенны РЛС».....	30
3.4	Таблица «Вид сигнала РЛС».....	32
3.5	Таблица «Режимы работы РЛС»	33
3.6	Таблица «Дислокация РЛС»	34
3.7	Таблица «Дислокация антенны РЛС».....	34
3.8	Таблица «Зоны обзора пространства»	35
3.9	Таблица «Задаваемые цели»	36
4	ВЫХОДНЫЕ ДАННЫЕ	38

1 НАЗНАЧЕНИЕ МОДУЛЯ

Модуль предварительной оценки параметров РЛС (далее – МПОП РЛС) предназначен для расчета и оценки основных тактико-технических характеристик (ТТХ) проектируемой РЛС на этапе эскизного (эскизно-технического) проектирования. Большинство характеристик РЛС взаимосвязаны, улучшение одних может привести к ухудшению других. МПОП РЛС должен позволять конструктору:

- находить оптимальный компромисс между значениями искомых ТТХ, чтобы удовлетворять предъявляемым к РЛС требованиям;
- осуществлять проверку корректности и непротиворечивости вводимых значений при оценке параметров РЛС.

1.1 Оцениваемые тактические характеристики РЛС

1) Зона обзора пространства:

- размер сектора по азимуту;
- пределы по углу места;
- пределы по дальности.

2) Период обзора пространства.

3) Максимальная дальность обнаружения цели с заданной ЭПР при заданных вероятностях правильного обнаружения и ложной тревоги.

4) Вероятность обнаружения цели с заданной ЭПР на заданном рубеже.

5) Потенциальные точности (СКО) измерения координат цели с заданной ЭПР на заданной дальности:

- по дальности;
- по радиальной скорости;
- по азимуту;
- по углу места;
- по плоскостным координатам;
- по высоте.

6) Потенциальные разрешающие способности:

- по дальности;
- по радиальной скорости;
- по азимуту;
- по углу места;
- по высоте.

7) Количество одновременно сопровождаемых целей.

1.2 Оцениваемые технические характеристики РЛС

1) Раскрыв антенны:

- по азимуту;
- по углу места.

2) Коэффициент усиления антенны.

3) Ширина диаграммы направленности антенны (ДНА), желательно по половинной мощности, с учетом отклонения максимума излучения от нормали к полотну антенны:

- по азимуту;
- по углу места.

4) Значения нормированной ДНА:

- по азимуту;
- по углу места.

5) Коэффициент шума приемной системы.

6) Суммарный коэффициент потерь на прием и передачу.

7) Суммарная мощность РЛС:

- импульсная;
- средняя.

8) Длительность зондирующего сигнала:

- максимальная;
- минимальная.

9) Ширина спектра зондирующего сигнала.

- 10) Период повторения зондирующих сигналов.
- 11) Время когерентного накопления.
- 12) Измеряемая (инструментальная) дальность:
 - максимальная;
 - минимальная.
- 13) Дискретизация по дальности.
- 14) Измеряемая радиальная скорость:
 - максимальная;
 - минимальная.
- 15) Дискретизация по скорости.
- 16) Потенциал РЛС.

2 ПОРЯДОК ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ТТХ РЛС

Тактические характеристики, как правило, задаются в виде требований к проектируемой РЛС. В частности такие требования могут предъявляться к размерам сектора обзора по азимуту ($\Delta\beta$), к пределам по углу места ($\varepsilon_{\min}, \varepsilon_{\max}$) и по дальности (D_{\min}, D_{\max}).

При отклонении максимума диаграммы направленности фазированной антенной решетки (ФАР) от нормали к полотну антенны ухудшается точность и разрешающая способность по угловым координатам. Этим могут накладываться ограничения на $\Delta\beta$, ε_{\min} и ε_{\max} . Ограничения на D_{\min} могут накладываться длительностью используемых зондирующих сигналов, а на D_{\max} частотой их повторения (но не всегда). Могут быть и другие ограничения к области обзора пространства РЛС, которые было бы полезно учитывать в САПР-РЛС.

Период обзора пространства РЛС кругового обзора, как правило, задается. В РЛС обнаружения и наведения ПВО и ВВС он чаще всего равен 10 с. По маловысотным целям в некоторых РЛС период обзора может задаваться равным 5 с. В РЛС управления оружием могут быть другие значения периодов обзора.

Период обзора пространства секторной РЛС (РЛС с неподвижной ФАР) рассчитывается по формуле:

$$T_{\text{обз}} = \left(\frac{\Delta\beta}{\Delta\theta_\beta} + 1 \right) \cdot \left(\frac{\varepsilon_{\text{макс}} - \varepsilon_{\text{мин}}}{\Delta\theta_\varepsilon} + 1 \right) \cdot M \cdot T_0 \quad (1)$$

где $\Delta\theta_\beta, \Delta\theta_\varepsilon$ – шаги перемещения луча по азимуту и углу места.

M – количество зондирующих сигналов, посылаемых в одном направлении;

T_0 – период повторения зондирующих сигналов.

Если у лоатора несколько зон обзора, рассчитывается время обзора каждой зоны и полученные времена суммируются. Если часть ресурса лоатора резервируется для сопровождения целей, период обзора пространства соответствующим образом увеличивается.

Пользователю должна предоставляться возможность задавать размеры шагов перемещения луча секторной РЛС при обзоре пространства. По умолчанию их можно принять равными ширине ДНА по половинной мощности:

$$\Delta\theta_\beta = \theta_{0,5\beta}, \quad \Delta\theta_\varepsilon = \theta_{0,5\varepsilon}$$

Период повторения зондирующих сигналов, как правило, устанавливается, исходя из требуемой максимальной дальности обнаружения:

$$T_0 \geq \frac{2 \cdot D_{\text{макс}}^{\text{тр}}}{c} \quad (2)$$

где $D_{\text{макс}}^{\text{тр}}$ – требуемая максимальная дальность обнаружения;

c – скорость света.

Требуемая максимальная дальность обнаружения ($D_{\text{макс}}^{\text{тр}}$) заданного типа цели, которая характеризуется некоторой эффективной поверхностью рассеяния (ЭПР) – это один из параметров РЛС, который должен задаваться при проектировании РЛС.

Максимальная реализуемая дальность обнаружения цели ($D_{\text{макс}}$) с заданной ЭПР ($\sigma_{\text{ц}}$) при заданных вероятностях правильного обнаружения (P_0) и ложной тревоги ($P_{\text{лт}}$) по выбору пользователя может рассчитываться с использованием функции **radareqrangle** либо следующим образом:

$$D_{\text{макс}} = \sqrt[4]{P_{\text{рлс}} \cdot \frac{\sigma_{\text{ц}}}{\rho_0}}, \quad (3)$$

где $P_{\text{рлс}}$ – потенциал РЛС;

$\sigma_{\text{ц}}$ – ЭПР цели, характеризующая отражающие свойства цели, м^2 ;

ρ_0 – значение фиксированного порога обнаружения.

Фиксированный порог рассчитывается по формуле:

$$\rho_0 = \sqrt{\frac{1}{M^{k_{\text{кг}}}} \cdot \left[\frac{\lg(P_{\text{лт}})}{\lg(P_0)} - 1 \right]} \quad (4)$$

где $P_{\text{лт}}$ – заданная вероятность ложной тревоги;

P_0 – заданная вероятность правильного обнаружения.

M – количество импульсов в пачке;

$k_{\text{кг}}$ – коэффициент когерентности, принимает значение равное 1 при когерентном накоплении и 0,5 при некогерентном суммировании.

Примечание. Формула (4) приведена для квадратичного детектора (по мощности). Для линейного детектора необходимо убрать корень.

Пользователю должна также предоставляться возможность выбора варианта расчета порога с использованием функций Python: по критерию Неймана-Пирсона (**gauss_threshold_snr**), по уравнению Альберсгейма (**albersheim_snr**), по уравнению Шнидмана (**shnidman_snr**) или др.

В РЛС кругового обзора при заданном периоде повторения импульсов T_0 (сек) и скорости кругового вращения антенны w_a ($\frac{\text{рад}}{\text{сек}}$), по каждой цели может быть получена пачка импульсов равная:

$$M \approx 1 + \text{ent} \left[\frac{\theta_{0,5\beta}}{w_a} \cdot T_0 \right]$$

где $\theta_{0,5\beta}$ – ширина ДНА в горизонтальной плоскости по половинной мощности.

$\text{ent}[\cdot]$ – целая часть числа.

Значения $P_{\text{лт}}$ и P_0 зависят от класса (типа) проектируемого лоатора и задаются в исходных данных.

При заданном значении $D_{\text{макс}}^{\text{тр}}$ требуемый потенциал РЛС рассчитывается по формуле:

$$P_{\text{рлс}}^{\text{тр}} = (D_{\text{макс}}^{\text{тр}})^4 \cdot \frac{\rho_0}{\sigma_{\text{ц}}}, \quad (5)$$

Реально достижимый потенциал РЛС может задаваться пользователем или рассчитывается при определении технических характеристик по формуле:

$$P_{\text{рлс}} = \frac{P_{\text{имп}} \cdot G_{\text{пер}} \cdot G_{\text{пр}} \cdot \lambda^2 \cdot L_{\text{пр}}}{(4\pi)^3 \cdot P_{\text{пр min}}} \cdot F_{\text{пер}} \cdot F_{\text{пр}} \quad (6)$$

где $P_{\text{имп}}$ – импульсная мощность передатчика;

$G_{\text{пер}}, G_{\text{пр}}$ – коэффициенты усиления соответственно передающей и приемной антенн;

λ – длина волны;

$L_{\text{пр}}$ – суммарный коэффициент потерь в приемном тракте антенны ($L_{\text{пр}} < 1$);

$P_{\text{пр min}}$ – чувствительность приемника;

$F_{\text{пер}} \cdot F_{\text{пр}}$ – значения нормированных диаграмм направленности передающей и приемной антенн РЛС.

Чувствительность приемника может задаваться либо рассчитываться:

$$P_{\text{пр min}} = K \cdot k_{\text{ш}} \cdot T_0 \cdot \Delta f_{\text{пр}} \quad (7)$$

где K – постоянная Больцмана ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт с/град);

$k_{\text{ш}}$ – коэффициент шума приемника;

$T_{\text{ш}}$ – шумовая температура ($T_{\text{ш}} \approx 290^{\circ}\text{K}$);

$\Delta f_{\text{пр}}$ – полоса пропускания приемного устройства.

Коэффициент усиления антенны может быть рассчитан с использованием класса **ArrayGain** либо по формуле:

$$G = \frac{4\pi \cdot S_{\text{эф}}}{\lambda^2} \quad (8)$$

где $S_{\text{эф}}$ – эффективная площадь раскрыва антенны, м^2 .

Для прямоугольных импульсов можно принять:

$$\Delta f_{\text{пр}} \approx \frac{1}{\tau_{\text{и}}} \quad (9)$$

где $\tau_{\text{и}}$ – длительность импульса.

С учетом (8) и (9) потенциал РЛС может рассчитываться по формуле:

$$P_{\text{рлс}} = \frac{P_{\text{имп}} \cdot \tau_{\text{и}} \cdot S_{\text{пер}} \cdot S_{\text{пр}} \cdot L_{\text{пр}}}{4\pi \cdot \lambda^2 \cdot K \cdot k_{\text{ш}} \cdot T_0} \cdot F_{\text{пер}} \cdot F_{\text{пр}} \quad (10)$$

$S_{\text{пер}}, S_{\text{пр}}$ – эффективные площади раскрыва соответственно передающей и приемной антенн, м^2 .

Пользователю должна предоставляться возможность расчета потенциала РЛС, исходя из имеющихся данных, по формулам (6) или (10).

В свою очередь эффективные площади $S_{\text{пер}}$ и $S_{\text{пр}}$ зависят от геометрических размеров передающей и приемной антенн:

$$S_{\text{пер}} = L_{\text{пер}\beta} \cdot L_{\text{пер}\varepsilon} \cdot v, \quad (11)$$

$$S_{\text{пр}} = L_{\text{пр}\beta} \cdot L_{\text{пр}\varepsilon} \cdot v, \quad (12)$$

где $L_{\text{пер}\beta}, L_{\text{пер}\varepsilon}, L_{\text{пр}\beta}, L_{\text{пр}\varepsilon}$ – апертура передающей и приемной антенны РЛС в горизонтальной и вертикальной плоскостях соответственно;

v – коэффициент использования геометрической площади антенны (для различных типов зеркальных антенн $v = 0,5 \dots 0,7$, для ФАР значение v определяется амплитудным распределением, при равномерном амплитудном распределении $v \approx 0,9$).

Апертура антенны по углу α рассчитывается по формуле:

$$L_{\alpha} = (n_{\alpha} - 1) \cdot b_{\alpha} \quad (13)$$

где $\alpha = \beta, \varepsilon$;

n_{α} – количество излучателей в линии по углу α ;

b_{α} – расстояние облучателей друг от друга.

Суммарная импульсная мощность РЛС равна:

$$P_{\text{имп}} = P_{\text{кан}} \cdot N_{\text{опер}}, \quad (14)$$

где $P_{\text{кан}}$ – импульсная мощность одного канала ФАР;

$N_{\text{опер}}$ – общее количество передающих каналов ФАР.

В случае плоской апертуры ДНА полагается функцией с разделяющимися переменными, т.е. представляется произведением двух функций:

$$F_{\text{пер(пр)}} = F_{\text{пер(пр)}}(\Delta\beta) \cdot F_{\text{пер(пр)}}(\Delta\varepsilon) \cdot K_g^{\text{пер}} \cdot K_g^{\text{пр}}, \quad (15)$$

где $K_g^{\text{пер}}, K_g^{\text{пр}}$ – коэффициенты дробления передающего и приемного полотна антенн РЛС.

$$K_g^{\text{пер}} = \frac{N_{\text{пер}}}{N_{\text{опер}}}; \quad K_g^{\text{пр}} = \frac{N_{\text{пр}}}{N_{\text{опр}}}, \quad (16)$$

где $N_{\text{пер}}, N_{\text{опер}}, N_{\text{пр}}, N_{\text{опр}}$ – работающее и номинальное количество соответственно передающих и приемных СВЧ каналов (предполагается равномерное распределение неработающих каналов по раскрыву АФАР).

Для моделирования ДНА можно воспользоваться библиотекой базовых алгоритмов (PyPhased) для программного моделирования РЛС с АФАР на языке Python, представленной в отчете о НИР "Макет-ФРТК". Кроме того, пользователю необходимо предоставить возможность выбора аналитического выражения для описания ДНА из предлагаемого набора различных математических аппроксимаций. В частности, на этапе предварительной оценки параметров РЛС для расчета нормированной ДНА на передачу и на прием можно воспользоваться простым аналитическим выражением¹:

$$F_{\alpha}(\alpha_{\text{ц}} - \alpha_{\text{ц}}) = \exp \left[-\pi \left(\frac{\alpha_{\text{ц}} - \alpha_{\text{ц}}}{\theta_{0,5\alpha}} \right)^2 \right], \quad (17)$$

где $\theta_{0,5\alpha} = \theta_{0,5\beta}, \theta_{0,5\varepsilon}$ – ширина ДНА по половинной мощности;

¹ Теоретические основы радиолокации. Под ред. Ширмана Я.Д., Учебное пособие для вузов. М., издательство «Советское радио», 1970

$\alpha_{\text{ц}} = \beta_{\text{ц}}, \varepsilon_{\text{ц}}$ – азимут или угол места выставления луча ДНА (направление максимума главного лепестка);

$\alpha_{\text{ц}} = \beta_{\text{ц}}, \varepsilon_{\text{ц}}$ – угловые координаты цели.

При этом ширина луча по точкам половинной мощности ($\theta_{0,5\alpha}$) будет равна:

$$\theta_{0,5\alpha} \approx K_{\theta} \cdot \frac{\lambda}{L_{\alpha} \cdot \cos(\alpha_{\text{рлс}} - \alpha_{\text{ц}})}, \quad (18)$$

где $\alpha_{\text{рлс}} = \beta_{\text{рлс}}, \varepsilon_{\text{рлс}}$ – азимут или угол места нормали к полотну антенны РЛС.

K_{θ} – коэффициент пропорциональности.

Ширина главного лепестка ДНА (по половине амплитуды) может быть рассчитана также с использованием функции **coarse_beamwidth_fwhm**.

Филькенштейн М.И. приводит следующее описание ДНА плоской ФАР²:

$$F_{\text{пер(пр)}}(\alpha_{\text{ц}} - \alpha) = \frac{\sin^2 \cdot \{n_{\alpha} \cdot \pi \cdot (b_{\alpha}/\lambda) \cdot [\sin(\alpha_{\text{ц}} - \alpha) - \sin(\alpha_{\text{рлс}} - \alpha_{\text{ц}})]\}}{n_{\alpha}^2 \cdot \sin^2 \cdot \{\pi \cdot (b_{\alpha}/\lambda) \cdot [\sin(\alpha_{\text{ц}} - \alpha) - \sin(\alpha_{\text{рлс}} - \alpha_{\text{ц}})]\}} \quad (19)$$

Если задан требуемый рубеж обнаружения ($D_{\text{тр}}$), рассчитывается отношение сигнал/шум для этого рубежа с помощью функции **radareqsnr** или по формуле:

$$\rho_{\text{ц}} = \Pi_{\text{рлс}} \cdot \frac{\sigma_{\text{ц}}}{D_{\text{тр}}^4} \quad (20)$$

Если $\rho_{\text{ц}} \geq \rho_0$, считается, что цель на заданном рубеже обнаруживается с заданным качеством.

Пользователю должна предоставляться возможность выбора варианта расчета вероятности обнаружения цели на заданном рубеже: с использованием функций **local_nonfluctuating_noncoherent_roc**, **local_noncoherent_swerling_roc**, а также по формулам:

$$P_{\text{обн}} = \exp \left[\frac{\lg(P_{\text{лт}})}{(\rho_{\text{ц}})^2 + 1} \right] \quad (21)$$

или

² Финкельштейн М.И. Основы радиолокации: Учебник для вузов. М.: Радио и связь, 1983

$$P_{\text{обн}} = \exp \left[- \left(\frac{D_{\text{тр}}}{D_{\text{макс}}} \right)^4 \right] \quad (22)$$

Пользователю должна предоставляться возможность выбора варианта расчета потенциальных СКО определения угловых координат: с использованием функций **potential_angle_std_amp_method**, **potential_angle_std_phase_method** или по формулам:

$$\sigma_{\beta} \approx K_{\sigma} \cdot \frac{\lambda}{L_{\text{пр}\beta} \cdot \sqrt{\rho_{\text{ц}} \cdot \cos(\beta_{\text{рлс}} - \beta_{\text{пр}}^{\text{цу}})}}, \quad (23)$$

$$\sigma_{\varepsilon} \approx K_{\sigma} \cdot \frac{\lambda}{L_{\text{пр}\varepsilon} \cdot \sqrt{\rho_{\text{ц}} \cdot \cos(\varepsilon_{\text{рлс}} - \varepsilon_{\text{пр}}^{\text{цу}})}}, \quad (24)$$

где $L_{\text{пр}\beta}$, $L_{\text{пр}\varepsilon}$ – апертура приемной антенной решетки соответственно по азимуту и углу места;

$\rho_{\text{ц}}$ – отношение сигнал/шум по мощности;

λ – длина излучаемой волны РЛС;

$\beta_{\text{рлс}}$, $\varepsilon_{\text{рлс}}$ – ориентация нормали к полотну приемной антенны РЛС;

$\beta_{\text{пр}}^{\text{цу}}$, $\varepsilon_{\text{пр}}^{\text{цу}}$ – ориентация максимума диаграммы направленности приемного луча,

который обнаружил цель;

K_{σ} – коэффициент пропорциональности.

При измерении угловых координат коэффициент K_{σ} определяется характером облучения апертуры антенны. При описании главного лепестка результирующей ДНА выражением (17) числовой коэффициент K_{σ} равен:

$$K_{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \approx 0,564 \quad (25)$$

При других аппроксимациях ДНА числовой коэффициент K_{σ} может отличаться от приведенного значения. Филькенштейн М.И., например, для гауссовой огибающей радиоимпульса показывает $K_{\sigma} \approx 0,6$, а для огибающей с равномерным частотным спектром:

$$K_{\sigma} = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \approx 0,55 \quad (26)$$

СКО измерения дальности и радиальной скорости зависят от вида сигнала и рассчитываются по следующим формулам:

1) немодулированный сигнал:

$$\sigma_D = K_{\sigma} \cdot \frac{\tau_{\text{им}} \cdot c}{\sqrt{\rho_{\text{ц}}}} = K_{\sigma} \cdot \frac{c}{\Delta f \cdot \sqrt{\rho_{\text{ц}}}}, \quad \sigma_{V_D} = K_{\sigma} \cdot \frac{\lambda}{\tau_{\text{им}} \cdot \sqrt{\rho_{\text{ц}}}}, \quad (27)$$

где $\tau_{\text{им}}$ – длительность импульса;

c – скорость света;

Δf – ширина спектра сигнала.

2) ЛЧМ сигнал:

$$\sigma_D = K_{\sigma} \cdot \frac{c}{\Delta f \cdot \sqrt{\rho_{\text{ц}}}}, \quad \sigma_{V_D} = \frac{\sqrt{2} \cdot \sigma_D}{T_0}, \quad (28)$$

где T_0 – периодичность излучения ЛЧМ сигнала.

3) ФКМ сигнал:

$$\sigma_D = K_{\sigma} \cdot \frac{\tau_{\text{д}} \cdot c}{\sqrt{\rho_{\text{ц}}}}, \quad \sigma_{V_D} = K_{\sigma} \cdot \frac{\lambda}{\tau_{\text{им}} \cdot \sqrt{\rho_{\text{ц}}}}, \quad (29)$$

где $\tau_{\text{д}}$ – длительность дискрета ФКМ сигнала.

Примечания:

1. Приведенные формулы расчета СКО могут быть уточнены с учетом вида используемых в САПР зондирующих сигналов.

2. Для определения СКО измерения дальности пользователь может воспользоваться функцией **potential_range_std**.

При измерении временной задержки коэффициент K_{σ} определяется формой частотного спектра излучаемого импульса. При измерении доплеровского сдвига частот коэффициент K_{σ} зависит от формы импульса во временной области.

Современные РЛС с трассовым выходом выдают радиолокационную информацию (РЛИ), как правило, в декартовых координатах. Чаще всего (по крайней мере, в ПВО и ВВС) используется местная прямоугольная

топоцентрическая система координат (X, Y, Z) с началом отсчета значений, совпадающим с фазовым центром антенны РЛС. При этом оси координат направлены следующим образом:

- ось Z – в Зенит перпендикулярно поверхности Земли;
- ось X – на Север по касательной к истинному меридиану, проходящему через начало отсчета;
- ось Y – лежит в горизонтальной плоскости и направлена на Восток перпендикулярно оси X .

Вместо координаты Z выдается высота цели, которая рассчитывается относительно уровня моря по формуле:

$$H_{ц} = D_{ц} \cdot \sin \varepsilon_{ц} + \frac{D_{ц}^2}{2 \cdot R_{зэ}} + H_{поз} + h_a \quad (30)$$

где $D_{ц}$ – наклонная дальность до цели;

$\varepsilon_{ц}$ – угол места цели;

$R_{зэ}$ – эквивалентный радиус Земли;

$H_{поз}$ – высота позиции РЛС над уровнем моря;

h_a – высота фазового центра антенны.

В этой связи представляет интерес оценка ошибок определения локатором высоты и плоскостных координат.

Дисперсия оценки высоты рассчитывается по формуле:

$$\sigma_h^2 = \left(\sin \varepsilon_{ц} + \frac{D_{ц}}{R_{зэ}} \right)^2 \cdot \sigma_D^2 + (D_{ц} \cdot \cos \varepsilon_{ц})^2 \cdot \sigma_\varepsilon^2 \quad (31)$$

Дисперсии оценки прямоугольных координат равны:

$$\begin{aligned} (\sigma_{X_{тц}})^2 &= (\sigma_D \cdot \cos \varepsilon_{ц} \cdot \cos \beta_{ц})^2 + (\sigma_\beta \cdot D_{ц} \cdot \cos \varepsilon_{ц} \cdot \sin \beta_{ц})^2 + \\ &+ (\sigma_\varepsilon \cdot D_{ц} \cdot \sin \varepsilon_{ц} \cdot \cos \beta_{ц})^2 \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} (\sigma_{Y_{тц}})^2 &= (\sigma_D \cdot \cos \varepsilon_{ц} \cdot \sin \beta_{ц})^2 + (\sigma_\beta \cdot D_{ц} \cdot \cos \varepsilon_{ц} \cdot \cos \beta_{ц})^2 + \\ &+ (\sigma_\varepsilon \cdot D_{ц} \cdot \sin \varepsilon_{ц} \cdot \sin \beta_{ц})^2 \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned}
(\sigma_{XY_{\text{тц}}})^2 &= (\sigma_{X_{\text{тц}}})^2 + (\sigma_{Y_{\text{тц}}})^2 = \\
&= \left[(\sigma_D)^2 + (\sigma_\beta \cdot D_{\text{ц}})^2 \right] \cdot (\cos \varepsilon_{\text{ц}})^2 + (\sigma_\varepsilon \cdot D_{\text{ц}} \cdot \sin \varepsilon_{\text{ц}})^2
\end{aligned} \tag{34}$$

В РЛС с трассовым выходом осуществляется фильтрация и экстраполяция координат на момент выдачи. Ошибки сглаженных и экстраполированных координат зависят от применяемых фильтров. Они также должны учитываться на этапе предварительной оценки параметров РЛС.

При использовании линейного фильтра Калмана по не маневрирующим целям дисперсия оценки экстраполированных сглаженных координат при равнооточных равношаговых измерениях равна:

$$\sigma_{xэ}^2 = \frac{4 \cdot \sigma_x^2}{k} \cdot \left(1 + \frac{3}{T} \cdot t_э + \frac{3}{T^2} \cdot t_э^2 \right) \tag{35}$$

где $x = X, Y, H$;

$$\sigma_x^2 = (\sigma_{X_{\text{тц}}})^2, (\sigma_{Y_{\text{тц}}})^2, \sigma_h^2;$$

k – количество измерений координат;

T – величина мерного интервала при фильтрации, с;

$t_э$ – время экстраполяции координат.

При цикле выдачи информации $T_{\text{ц}}$ среднее время экстраполяции координат можно принять равным половине цикла выдачи.

При использовании расширенного фильтра Калмана по маневрирующим целям (учитываются ускорения) дисперсия равна:

$$\sigma_{xэ}^2 = \frac{9 \cdot \sigma_x^2}{k} \cdot \left(1 + 18 \cdot \frac{t_э^2}{T^2} + 20 \cdot \frac{t_э^4}{T^4} \right) \tag{36}$$

Разрешающая способность по дальности (δ_D) зависит от длительности импульса ($\tau_{\text{и}}$) или ширины спектра сигнала (Δf), по углам (δ_α , где $\alpha = \beta, \varepsilon$) – от ширины ДНА приемной антенны ($\theta_{0,5\alpha}$), по радиальной скорости (δ_V) – от спектра сигнала (Δf), по высоте (δ_h) – от ширины ДНА в угломестной плоскости ($\theta_{0,5\varepsilon}$),

наклонной дальности до цели ($D_{ц}$) и угла места цели ($\varepsilon_{ц}$). Разрешающие способности рассчитываются по известным соотношениям.

$$\delta_D = \frac{c \cdot \tau_{и}}{2 \cdot K_{сж}} = \frac{c}{2 \cdot \Delta f}, \quad \delta_{\alpha} = \theta_{0,5\alpha}, \quad \delta_V = \frac{\lambda \cdot \Delta f}{2}, \quad \delta_h = \frac{\theta_{0,5\varepsilon} \cdot D_{ц}}{\cos \varepsilon_{ц}} \quad (37)$$

где $K_{сж}$ – коэффициент сжатия импульса.

Кроме аналитических оценок параметров РЛС пользователю необходимо предоставить возможность статистической оценки параметров с использованием комплексных амплитуд на выходе каналов дальности (i) и скорости (j). Для моделирования матрицы дальность-скорость можно воспользоваться библиотеками Python, а также должен быть реализован подход, изложенный ниже.

Необходимо принять во внимание, что каждый приемный луч парциальной ДНА может иметь до четырех поляризационных каналов:

- 1) вертикальная поляризация на передачу и прием ($P_{ВВ}$);
- 2) горизонтальная поляризация на передачу и прием ($P_{ГГ}$);
- 3) вертикальная на передачу – горизонтальная на прием ($P_{ВГ}$).
- 4) горизонтальная на передачу – вертикальная на прием ($P_{ГВ}$).

Для каждого k -го поляризационного канала k -го приемного луча парциальной ДН приемной антенны РЛС, направление которого задано азимутом и углом места ($\beta_{пр\ k}^{цу}, \varepsilon_{пр\ k}^{цу}$), формируются комплексные амплитуды $\dot{A}_{ij\ kl}$ по заданной цели (нескольким целям), где i – номер дискретности по дальности, j – номер дискретности по скорости, k – номер приемного канала, l – номер поляризационного канала.

Примечания:

1. Пользователь задает положение оси пучка парциальных лучей ДН приемной антенны, а положение каждого луча должно рассчитываться с учетом заданной расстановки лучей.
2. Для ЛЧМ сигнала массив будет трехмерным, поскольку формирование комплексных амплитуд производится только в каналах дальности.
3. В дальнейшем для упрощения индексы k и l будем опускать.

Комплексные амплитуды отраженного сигнала на выходе i -ого канала дальности и j -ого канала скорости (\dot{A}_{ij}) процессора сигналов носят случайный

характер и зависят как от параметров и режима работы РЛС, так и от сложившейся фоно-целевой обстановки (ФЦПО). В общем случае комплексная амплитуда (\dot{A}_{ij}) включает слагаемые, соответствующие сигналам целей ($\dot{A}_{ij}^{\text{ц}}$), собственным шумам приемного канала ($\dot{A}_{ij}^{\text{ш}}$), активным шумовым ($\dot{A}_{ij}^{\text{ашп}}$) и пассивным помехам ($\dot{A}_{ij}^{\text{пп}}$):

$$\dot{A}_{ij} = \dot{A}_{ij}^{\text{ц}} + \dot{A}_{ij}^{\text{ш}} + \dot{A}_{ij}^{\text{ашп}} + \dot{A}_{ij}^{\text{пп}}. \quad (38)$$

Будем представлять комплексные амплитуды в виде квадратурных составляющих x и y ($\dot{A} = x + jy$). В случае одиночной цели квадратуры $x_{ij}^{\text{ц}}$ и $y_{ij}^{\text{ц}}$ комплексной амплитуды $\dot{A}_{ij}^{\text{ц}}$ имеют вид:

$$x_{ij}^{\text{ц}} = \sqrt{2 \cdot q} \cdot |\dot{B}(\tau_i - \tau^*, \omega_j - \omega^*)| \cdot \cos \varphi, \quad (39)$$

$$y_{ij}^{\text{ц}} = \sqrt{2 \cdot q} \cdot |\dot{B}(\tau_i - \tau^*, \omega_j - \omega^*)| \cdot \sin \varphi, \quad (40)$$

где $\sqrt{2 \cdot q}$ – амплитуда сигнала от цели, нормированная к средней мощности собственных шумов, распределенная по закону Релея, либо по любому другому закону, заданному для данной цели до моделирования;

q – мгновенное (случайное) значение отношения сигнал/шум по мощности;

φ – фаза сигнала от цели (считается случайной величиной распределенной по равномерному закону на интервале $[0, 2\pi]$);

$\dot{B}(\tau, \omega)$ – нормированная взаимная корреляционная функция зондирующего и опорного сигналов;

τ_i – задержка, соответствующая i -ому каналу дальности;

$\omega_j = 2\pi f_j$ – частота, соответствующая j -ому каналу скорости;

В случае N целей выражения для квадратур $x_{ij}^{\text{ц}}$, $y_{ij}^{\text{ц}}$ комплексной амплитуды $\dot{A}_{ij}^{\text{ц}}$ обобщаются и имеют вид:

$$x_{ij}^{\text{ц}} = \sum_{n=1}^N \sqrt{2 \cdot q_n} \cdot |\dot{B}(\tau_i - \tau_n^*, \omega_j - \omega_n^*)| \cdot \cos \varphi_n, \quad (41)$$

$$y_{ij}^n = \sum_{n=1}^N \sqrt{2 \cdot q_n} \cdot |\dot{B}(\tau_i - \tau_n^*, \omega_j - \omega_n^*)| \cdot \sin \varphi_n, \quad (42)$$

где $n = 1 \dots N$ – номер цели.

Мгновенное (случайное) значение превышения сигнала над шумом по мощности (q) равно:

$$q = \rho_{\text{ц}} \cdot w(t), \quad (43)$$

где $\rho_{\text{ц}}$ – среднее значение сигнал/шум, рассчитанное по формуле (20);

$w(t)$ – значение функции случайной флуктуации амплитуды сигнала в момент времени t , соответствующий времени зондирования.

Флуктуации амплитуды отраженного сигнала необходимо реализовать двумя способами:

Первый способ (основной) реализуется в предположении, что на интервале когерентного накопления ориентация объекта относительно РЛС практически не изменяется. Амплитуда сигнала считается детерминированной величиной и определяется соответственно текущей ориентации объекта для данного момента времени (ЭОП задается таблично для каждого поляризационного канала в функции от угловой ориентации объекта). Тогда $w(t) = 1$.

Второй способ (для исследования влияния корреляционной функции флуктуации на характеристики РЛС) реализуется в предположении, что значения поляризационной матрицы рассеяния цели неизвестны. Известны только ориентировочные значения средней ЭПР в функции секторов ориентации. Флуктуации амплитуды сигналов $w(t)$ задаются в виде:

$$w_l(t) = \sqrt{\frac{u^2(t) + v^2(t)}{2}} \quad (44)$$

где $u(t), v(t)$ – независимые Марковские гауссовские процессы с нулевым средним, единичной дисперсией и заданной для каждой цели функцией корреляции, равной:

$$r(\tau) = \exp \left(-\frac{|\tau| \cdot \ln 2}{2 \cdot \tau_0} \cdot \sqrt{\frac{\overline{\sigma_{\text{ц}l}}}{\sigma_0}} \right) \quad (45)$$

где $\overline{\sigma_{\text{ц}l}}$ – среднее значение ЭПР цели для l – го поляризационного канала ($\sigma_0 = 0,25 \text{ м}^2, \tau_0 = 0,1 \text{ с}$).

Интервал корреляции флуктуации τ_0 зависит от формы и размеров цели, диапазона волн и вращения цели. Значения τ_0 необходимо будет уточнять экспериментально для конкретного лоатора.

Формирование случайных значений $u(t)$ и $v(t)$ сводится к задаче формирования с помощью датчика случайных чисел двух гауссовских независимых случайных величин y_1, y_2 с нулевым средним и единичной дисперсией:

$$u(t) = y_1, \quad (46)$$

$$v(t) = r(\tau) \cdot y_1 + \sqrt{1 - [r(\tau)]^2} \cdot y_2. \quad (47)$$

Соответствующие квадратуры формируются для каждой парциальной ДНА и каждого поляризационного канала.

При генерации случайных фаз необходимо иметь в виду, что по одной цели они одинаковы для всех парциальных приемных каналов, т.к. ДНА формируется в цифровом виде из совокупности одних и тех же сигналов на выходе элементов приемной ФАР, а в разных поляризационных каналах считаем их независимыми. То же самое относится к случайной функции $w(t)$, если она используется для имитации флуктуации амплитуды.

Квадратуры $x_{ij}^{\text{III}}, y_{ij}^{\text{III}}$ комплексной амплитуды $\dot{A}_{ij}^{\text{III}}$ собственных шумов приемного канала имеют вид:

$$x_{ij}^{\text{III}} = \xi_{ij}, \quad y_{ij}^{\text{III}} = \eta_{ij}, \quad (48)$$

где ξ_{ij}, η_{ij} – случайные некоррелированные гауссовские величины с нулевым средним и единичной дисперсией.

Квадратуры комплексных амплитуд отражений от местных предметов можно рассчитать по методикам МФТИ, либо воспользоваться следующим подходом.

Местность в направлении цели разбивается на элементарные участки в диапазоне дальностей от D_{\min} до $D_{\text{отр}}$, где D_{\min} – минимальная инструментальная дальность действия РЛС, а $D_{\text{отр}}$ рассчитывается по формуле:

$$D_{\text{отр}} = \frac{4 \cdot h_a \cdot h}{\lambda} \quad (49)$$

где h_a – высота фазового центра антенны над землей;

h – средний размер неровностей.

Размер элементарного участка по дальности берется равным разрешающей способности РЛС по дальности. Для учета влияния отражений от земли на обнаружение цели необходимо получить квадратуры отраженных сигналов (пассивных помех) от всех участков в направлении цели:

$$x_{ij}^{\text{пп}} = \sum_{n=1}^N \sqrt{2 \cdot q_n} \cdot |\dot{B}(\tau_i - \tau_n^*, \omega_j - \omega_n^*)| \cdot \cos \varphi_n, \quad (50)$$

$$y_{ij}^{\text{пп}} = \sum_{n=1}^N \sqrt{2 \cdot q_n} \cdot |\dot{B}(\tau_i - \tau_n^*, \omega_j - \omega_n^*)| \cdot \sin \varphi_n, \quad (51)$$

где $n = 1 \dots N$ – номер участка земли.

$\sqrt{2 \cdot q_n}$ – амплитуда сигнала от участка земли, нормированная к средней мощности собственных шумов, распределенная по закону Релея, либо по любому другому закону, заданному для данной цели до моделирования;

q_n – отношение отраженного от земли сигнала к собственным шумам приемника;

φ – фаза сигнала от земли (считается случайной величиной распределенной по равномерному закону на интервале $[0, 2\pi]$);

$\dot{B}(\tau, \omega)$ – нормированная взаимная корреляционная функция (ВКФ) зондирующего и опорного сигналов;

τ_i – задержка, соответствующая i -ому каналу дальности;

$\omega_j = 2\pi f_j$ – частота, соответствующая j -ому каналу скорости;

τ^*, ω^* – значения задержки и частоты сигнала от земли.

$$\omega_n^* = 0 \quad (52)$$

$$N = 1 + \text{ent} \left(2 \cdot \frac{D_{\text{отр}} - D_{\text{мин}}}{c \cdot \tau_{\text{и}}} \right) \quad (53)$$

Из рассмотрения исключаются участки, которые попадают в область радиотени. Если участок частично находится в радиотени, его ЭПР уменьшается пропорционально той части, которая попала в радиотень.

Превышение сигнала от земли над шумом по мощности (q_n) равно:

$$q_n = P_{\text{рлс}} \cdot \frac{\sigma_{\text{уд}n} \cdot \theta_{0,5\beta} \cdot c \cdot \tau_{\text{и}}}{2 \cdot D_{3n}^3 \cdot \cos \varepsilon_{3n}} \quad (54)$$

где $P_{\text{рлс}}$ – потенциал РЛС;

$\sigma_{\text{уд}n}$ – удельная ЭПР n -го участка земли;

$\theta_{0,5\beta}$ – ширина ДНА по половинной мощности по азимуту;

c – скорость света;

$\tau_{\text{и}}$ – длительность импульса;

D_{3n} – удаление n -го участка земли от РЛС;

ε_{3n} – угол места, под которым наблюдается n -ый участок земли.

Удельная ЭПР ($\sigma_{\text{уд}}$) участков местности, от которых переотражается зондирующий сигнал может быть рассчитана по эмпирической формуле:

$$\sigma_{\text{уд}} = 3,2 \cdot 10^{-\frac{n}{\lambda}} \quad (55)$$

где $n = 5$ для гладкой земной поверхности, $n = 4$ для лесистой неровной поверхности, $n = 3$ для горной местности.

Удельная ЭПР морской поверхности для малых углов места рассчитывается по эмпирической формуле:

$$\sigma_{\text{уд}} = -64 + 6 \cdot K_6 + 10 \cdot \lg(\sin \varepsilon_3) - 10 \cdot \lg \lambda \quad (56)$$

где K_6 – баллы по шкале Бофорта;

ε_3 – угол места, под которым наблюдается участок земли (морской поверхности).

Следует заметить, что при определении возможностей обнаружения маловысотных целей необходимо дополнительно учитывать множитель Земли:

$$\rho_{\text{ц}} = 16 \cdot \sin^4 \left(2\pi \cdot \frac{h_a}{\lambda} \cdot \sin \varepsilon_{\text{ц}} \right) \cdot \Pi_{\text{рлс}} \cdot \frac{\sigma_{\text{ц}}}{D_{\text{ц}}^4} \quad (57)$$

Квадратуры $x_{ij}^{\text{ашп}}, y_{ij}^{\text{ашп}}$ комплексной амплитуды $\dot{A}_{ij}^{\text{ашп}}$ активных шумовых помех и квадратуры $x_{ij}^{\text{пп}}, y_{ij}^{\text{пп}}$ комплексной амплитуды $\dot{A}_{ij}^{\text{пп}}$ пассивных помех от дипольных отражателей на этапе предварительной оценки параметров РЛС рассчитывать пока не будем. Они потребуются в имитационной модели.

Ниже приводятся формулы для расчета взаимокорреляционной функции зондирующего и опорного сигнала $[\dot{B}(\tau, \omega)]$:

1) для ЛЧМ сигнала без весовой обработки:

$$|\dot{B}(\tau, \omega)| = \begin{cases} \left| \frac{\sin \left(x \cdot \frac{\tau_{\text{и}} - |\tau|}{2} \right)}{x \cdot \frac{\tau_{\text{и}}}{2}} \right| & \text{если } |\tau| \leq \tau_{\text{и}} \\ 0 & \text{если } |\tau| > \tau_{\text{и}} \end{cases} \quad (58)$$

где $\tau_{\text{и}}$ – длительность импульса ЛЧМ сигнала;

$$\tau = \tau_i - \tau^*, \quad \omega = \omega_j - \omega^* \quad (59)$$

$$x = \left(\omega - 2 \cdot \pi \cdot \frac{\Delta f}{\tau_{\text{и}}} \cdot \tau \right) \quad (60)$$

где Δf – девиация частоты.

2) для ЛЧМ сигнала с весовой обработкой:

$$|\dot{B}(\tau, \omega)| = \left| \sum_{m=-1}^1 d_m \cdot e^{-jm \frac{\omega}{\Delta f}} \cdot A \left(\tau - \frac{m}{\Delta f}, \omega \right) \right|$$

где

$$d_0 = \left[1 + \frac{2b}{\pi} \cdot \sin \left(\frac{\pi}{\tau_{\text{и}} \cdot \Delta f} \right) \right]^{-1} \quad (61)$$

$$d_{-1} = d_1 = b \cdot d_0 \quad (62)$$

$$A(\tau, \omega) = \begin{cases} \left| e^{-j\frac{\omega\tau}{2}} \cdot \frac{\sin\left(x \cdot \frac{\tau_{\text{и}} - |\tau|}{2}\right)}{x \cdot \frac{\tau_{\text{и}}}{2}} \right| & \text{если } |\tau| \leq \tau_{\text{и}} \\ 0 & \text{если } |\tau| > \tau_{\text{и}} \end{cases} \quad (63)$$

$$b = 0,426 \quad (64)$$

$$c_0 = \left[\sqrt{1 + 2 \cdot b^2 + \frac{4 \cdot b}{\pi} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{\tau_{\text{и}} \cdot \Delta f}\right) - \frac{b^2}{\pi} \cdot \sin\left(\frac{4\pi}{\tau_{\text{и}} \cdot \Delta f}\right)} \right]^{-1} \quad (65)$$

$$c_{-1} = c_1 = b \cdot c_0 \quad (66)$$

3) для ФКМ сигнала:

$$\dot{B}(\tau, \omega) = \begin{cases} A(\tau, \omega) & \text{если } (|\tau| \leq \tau_{\text{д}}) \cap (|\omega\tau_{\text{и}}| \leq 2\pi) \\ 1/\sqrt{N} & \text{если } (|\tau| > \tau_{\text{д}}) \cup (|\omega\tau_{\text{и}}| > 2\pi) \\ 0 & \text{если } |\tau| > \tau_{\text{и}} \end{cases} \quad (67)$$

где $N = \frac{\tau_{\text{и}}}{\tau_{\text{д}}}$ – число дискретов;

$$A(\tau, \omega) = \frac{\sin x}{x} \cdot \left(1 - \frac{|\tau|}{\tau_{\text{д}}}\right) \quad (68)$$

$$x = \frac{\omega \cdot \tau_{\text{и}}}{2} \quad (69)$$

Пользователю должна предоставляться возможность 3D отображения модулей смеси комплексных амплитуд отраженного сигнала и собственных шумов приемника до и после пороговой обработки.

Модули комплексных амплитуд $|\dot{A}_{ijkl}|$ сравниваются с порогами обнаружения. По каждому каналу в отдельности из элементов матрицы \dot{A}_{ijkl} этого канала, превысивших заданный порог, формируются «связные» области.

Примечание. Кроме фиксированных порогов, рассчитываемых по формуле (4), при пороговой обработке должна предоставляться возможность формирования адаптивных порогов, например, с использованием CFAR-детектора, представленного в отчете о НИР «Макет-ФРТК».

Для каждой связной области находятся средневзвешенные оценки времени задержки и частоты:

$$\widehat{\tau}_{kl} = \frac{\sum_i |\dot{A}_{ijkl}| \cdot \tau_i}{\sum_i |\dot{A}_{ijkl}|}, \quad \widehat{f}_{kl} = \frac{\sum_j |\dot{A}_{ijkl}| \cdot f_j}{\sum_j |\dot{A}_{ijkl}|} \quad (70)$$

где τ_i, f_j – задержка и частота, соответствующие i -ому каналу по дальности и j -ому каналу по скорости.

Под двумерной «связной» областью понимается множество элементов матрицы «дальность-скорость», в которых амплитуды превысили порог и которые обладают следующим свойством: от любого элемента этого множества можно проделать путь к любому другому элементу, не выходя за пределы множества и совершая на каждом шаге пути либо шаг по горизонтали, либо по вертикали (но не по диагонали).

П р и м е ч а н и е . Поскольку при использовании ЛЧМ сигнала формирование комплексных амплитуд производится только в каналах дальности, то для ЛЧМ сигналов рассматриваются одномерные «связные» области и \widehat{f}_{kl} не рассчитывается.

Под одномерной «связной» областью по дальности понимается множество соседних каналов по дальности (без пропусков), в которых амплитуды превысили порог. Наличие хотя бы одного пропуска является критерием начала новой «связной» области.

Для каждой «связной» области в таблицу записываются значения:

$\tau_{\min kl}, \tau_{\max kl}, f_{\min kl}, f_{\max kl}$ – минимальные и максимальные значения времени задержки и доплеровской частоты, соответствующие границам «связной» области;

$\widehat{\tau}_{kl}$ – оценка задержки времени (дальности);

\widehat{f}_{kl} – оценка частоты (радиальной скорости);

$A_{\max kl}$ – максимальная амплитуда в «связной» области;

$\beta_{\text{цук}}, \varepsilon_{\text{цук}}$ – положение приемного луча.

Таблица «связных» областей

№	№	№	τ_{\min}	τ_{\max}	f_{\min}	f_{\max}	A_{\max}	$\hat{\tau}$	\hat{f}	$\beta_{\text{цук}}$	$\varepsilon_{\text{цук}}$
---	---	---	---------------	---------------	------------	------------	------------	--------------	-----------	----------------------	----------------------------

приемного канала (k)	поляриза- ционного канала (l)	связной области									

В результате проведения процедуры обнаружения на выходе корреляционного приемника получаем для каждого l -го поляризационного канала k -го приемного канала совокупность «связных» областей с оценкой по каждой области максимальной амплитуды ($A_{\max kl}$), задержки времени ($\widehat{\tau_{kl}}$) и частоты ($\widehat{f_{kl}}$).

Отражательные свойства цели (ЭПР) для каждой поляризации разные (задаются в исходных данных), поэтому значения комплексных амплитуд A_{ijkl} на выходе каждого поляризационного канала будут отличаться.

В общем случае в РЛС может использоваться два режима излучения:

1) на заданной одной поляризации (формируется когерентным сложением двух излучаемых ортогональных поляризаций с заданным фазовым сдвигом) и прием в двух поляризационных каналах независимо;

2) на двух независимых ортогональных поляризациях (сигналы в каждом канале разносятся по несущей частоте и параметрам модуляции) и прием в двух поляризационных каналах на двух несущих для двух модуляций сигналов в каждом, при этом получаем классическую матрицу $P_{ГГ}, P_{ВВ}, P_{ГВ}, P_{ВГ}$.

В первом случае интегральным критерием обнаружения является превышение соответствующего порога хотя бы в одном из двух поляризационных каналов приемного канала. Связные области двух поляризационных каналов k -го приемного канала сравниваются. Если есть пересечение областей, то они объединяются и формируются оценки максимальной амплитуды, средневзвешенных значений

задержки времени и частоты. Если «связная» область одного поляризационного канала не пересекается с областями другого поляризационного канала, в таблице остаются оценки этой «связной» области.

Во втором случае при использовании режима излучения на двух независимых ортогональных поляризациях логика работы лоатора будет немного отличаться. Связные области всех четырех поляризационных каналов, принадлежащих одному приемному каналу, сравниваются на предмет пересечения. Области, которые не пересекаются хотя бы с одной «связной» областью другого поляризационного канала, из дальнейшего рассмотрения исключаются. При этом, ложные отметки в большинстве случаев будут отбрасываться. Пересекающиеся области объединяются и для них формируются оценки максимальной амплитуды, задержки времени и частоты. Таким образом, цель считается обнаруженной, если превышение порога сигналом от этой цели произошло не менее, чем в двух из четырех поляризационных каналов.

По окончании обработки «связных» областей поляризационных каналов каждая строка таблицы «связных» областей, принадлежащая «связной» области k -го приемного канала, последовательно сравнивается с нижестоящими строками, принадлежащими «связным» областям соседних приемных каналов (угловые положения соседних каналов совпадают по одной из угловых координат с текущим каналом и отличаются не более чем на один шаг по другой угловой координате). Если «связная» область соседнего канала пересекается по дальности и скорости с текущей «связной» областью, ей присваивается номер текущей области.

По окончании просмотра всех строк выбираются строки с одинаковым номером «связной» области и производится оценка координат и скорости цели:

$$D_{\text{нц}}^* = \frac{c}{2} \cdot \frac{\sum_i A_{\text{max } i} \cdot \hat{\tau}_i}{\sum_i A_{\text{max } i}} \quad (71)$$

$$\beta_{\text{ц}}^* = \frac{\sum_i A_{\text{max } i} \cdot \beta_{\text{ц}i}}{\sum_i A_{\text{max } i}} \quad (72)$$

$$\varepsilon_{\text{ц}}^* = \frac{\sum_i A_{\text{max } i} \cdot \varepsilon_{\text{ц}y \text{ } i}}{\sum_i A_{\text{max } i}} \quad (73)$$

$$V_{D\text{ц}}^* = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{\sum_i A_{\text{max } i} \cdot \hat{f}_i}{\sum_i A_{\text{max } i}} \quad (74)$$

где c – скорость света;

λ – длина волны.

За амплитуду сигнала A принимается максимальное значение из $A_{\text{max } i}$.

Примечание. Для оценки углового положения цели могут применяться другие методы, отличные от приведенного выше. Пользователь должен иметь возможность выбирать метод определения угловых координат.

Разница между истинным положением цели (эталон) и полученными оценками дает оценку ошибок определения координат и радиальной скорости цели. Для получения статистически значимых результатов осуществляется многократное повторение расчетов комплексных амплитуд для заданного положения цели. При этом в качестве целеуказаний для передающей и приемных антенн выступают полученные оценки $\beta_{\text{ц}}^*$ и $\varepsilon_{\text{ц}}^*$.

Пользователю должна предоставляться возможность задания одновременно нескольких целей для оценки разрешающей способности РЛС.

Таким образом, задавая ЭПР целей и изменяя их положение относительно РЛС по углам и дальности пользователь получает возможность оценивать вероятность обнаружения, потенциальные СКО определения угловых координат, наклонной дальности и радиальной скорости, разрешающие способности.

3 ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ

3.1 Таблица «Основные характеристики РЛС»

№ п/п	Наименование атрибута	Тип	Обозначение	Способ получения
1.	Тип (идентификатор) РЛС	integer		Задается
2.	Наименование РЛС	char(30)		Задается
3.	Длина волны, м	float	λ	Задается
4.	Коэффициент шума приемника	float	$k_{ш}$	Задается или рассчитывается
5.	Коэффициент использования радиогоризонта	float	$K_{ирг}$	Задается или рассчитывается
6.	Шумовая температура, К	float	$T_{ш}$	Задается, по умолчанию $T_{ш} = 290^0 K$
7.	Чувствительность приемника, Вт	float	$P_{пр min}$	Задается или рассчитывается
8.	Полоса пропускания приемного устройства	integer	$\Delta f_{пр}$	Задается или рассчитывается
9.	Суммарный коэффициент потерь в приемном тракте РЛС ($L_{пр} < 1$)	float	$L_{пр}$	Задается или рассчитывается
10.	Суммарная импульсная мощность излучения, Вт	double	$P_{имп}$	Задается или рассчитывается
11.	Тип обзора пространства	smallint	0 - круговой 1 - секторный	Задается

Примечание. Полоса пропускания приемного устройства должна быть согласована с шириной спектра зондирующего сигнала.

3.2 Таблица «Алгоритмы обработки РЛИ»

№ п/п	Наименование атрибута	Тип	Обозначение	Способ получения
1.	Тип (идентификатор) РЛС	integer		Задается

2.	Вероятность правильного обнаружения	double	P_0	Задается
3.	Вероятность ложной тревоги	double	$P_{лт}$	Задается
4.	Тип порога обнаружения	smallint	0 – фиксированный 1 – адаптивный	
5.	Фиксированный порог	double	ρ_0	Рассчитывается
6.	Тип накопления	smallint	0 – без накопления 1 – когерентное 2 – не когерентное	
7.	Интервал накопления	double		Задается
8.	Тип фильтра вторичной обработки (ФВО)	Выбирается для трассовых РЛС из предлагаемого набора ФВО		
9.	Величина мерного интервала, с	float	T	Задается
10.	Цикл обработки и выдачи РЛИ, с	float	$T_{ц}$	Задается
11.	Количество измерений координат	integer	k	Задается
12.	Время экстраполяции координат, с	float	$t_{э}$	Задается или рассчитывается
13.	Признак моделирования матрицы «D-V»	smallint	0 – не моделировать 1 – моделировать	
14.	Минимальная радиальная скорость ВО, м/с	double	$V_{D \text{ мин}}$	Задается или рассчитывается
15.	Максимальная радиальная скорость ВО, м/с	double	$V_{D \text{ макс}}$	Задается или рассчитывается
16.	Метод определения угловых координат	Пользователю должна предоставляться возможность выбора одного из методов		
17.	Критерий обнаружения цели в поляризационных каналах	smallint	0 – нет поляризац. каналов 1 – хотя бы в одном 2 – не менее, чем в двух	
18.	Тип детектора	smallint	0 – линейный 1 – квадратичный	

3.3 Таблица «ТТХ антенны РЛС»

№ п/п	Наименование атрибута	Тип	Обозначение	Способ получения
1.	Код антенны	integer		Задается
2.	Идентификатор конструкции АР	integer		Задается
3.	Тип (идентификатор) РЛС	integer		Задается
4.	Наименование антенны	char(30)		Задается
5.	Тип антенны	smallint	0 – приемопередающая зеркало 1 – только передающая зеркало 2 – только приемная зеркало 3 – приемопередающая ФАР 4 – только передающая ФАР 5 – только приемная ФАР	
6.	Высота ЭЦА (штатная), м	double	h_a	Задается
7.	Длина полотна антенны, м	double	L_β	Задается или рассчитывается
8.	Высота полотна антенны, м	double	L_ε	Задается или рассчитывается
9.	Коэффициент использования геометрической площади антенны	double	ν	Задается или рассчитывается
10.	Эффективная площадь раскрыва полотна антенны, м ²	double	$S_{\text{эф}}$	Задается или рассчитывается
11.	Коэффициент усиления антенны	double	G	Задается или рассчитывается
12.	Ширина ДНА по половинной мощности по азимуту, рад.	double	$\theta_{0,5\beta}$	Задается или рассчитывается
13.	Ширина ДНА по половинной мощности по углу места, рад.	double	$\theta_{0,5\varepsilon}$	Задается или рассчитывается
14.	ДНА в горизонтальной плоскости	Пользователю должна предоставляться возможность задания аппроксимации ДНА путем выбора аналитической зависимости, таблично или графически		
15.	ДНА в вертикальной плоскости			
16.	Количество антенных элементов (АЭ) по горизонтали	integer	n_β	Задается

№ п/п	Наименование атрибута	Тип	Обозначение	Способ получения
17.	Количество АЭ по вертикали	integer	n_{ε}	Задается
18.	Расстояние между АЭ по горизонтали, м	double	b_{β}	Задается
19.	Расстояние между АЭ по вертикали, м	double	b_{ε}	Задается
20.	Импульсная мощность одного передающего АЭ ФАР, Вт	double	$P_{\text{кан}}$	Задается
21.	Коэффициенты дробления передающего и приемного полотна антенны	double	$K_g^{\text{пер}}$	Задаются, по умолчанию $K_g \approx 0,9$
22.		double	$K_g^{\text{пр}}$	
23.	Сектор обзора пространства по азимуту, рад.	double	$\Delta\beta$	Задается
24.	Максимальное отклонение ДНА вверх от нормали к полотну антенны, рад.	double	$\varepsilon_{\text{мин}}$	Задается
25.	Максимальное отклонение ДНА вниз от нормали к полотну антенны, рад.	double	$\varepsilon_{\text{макс}}$	Задается
26.	Скорость механического вращения луча ДНА, рад./сек	double	w_a	Задается
27.	Коэффициент пропорциональности для расчета СКО	double	K_{σ}	Задается, по умолчанию $K_{\sigma} \approx 0,564$

П р и м е ч а н и я :

1. Задается либо апертура антенны, либо количество излучателей и расстояние между ними. Если пользователь задал то и другое, должна осуществляться проверка корректности заданных значений.

2. Если задано количество каналов ФАР и импульсная мощность одного канала СВЧ, суммарная импульсная мощность РЛС рассчитывается. Суммарная импульсная мощность РЛС может быть задана пользователем, в этом случае количество каналов ФАР и импульсная мощность одного канала СВЧ не задаются.

3.4 Таблица «Вид сигнала РЛС»

№ п/п	Наименование атрибута	Тип	Обозначение	Способ получения
1.	Код вида сигнала	integer		Задается
2.	Наименование	char(30)		Задается
3.	Номер сигнала	integer		Задается
4.	Назначение сигнала	smallint	0 – обнаружение целей 1 – захват траекторий 2 – сопровождение траекторий 3 – общего назначения	
5.	Количество импульсов в пачке	smallint	M	Задается или рассчитывается
6.	Вид модуляции	smallint	0 – ФКМ 1 – ЛЧМ без весовой обработки 2 – ЛЧМ с весовой обработкой 3 – НЧМ 4 – гладкий	
7.	Ширина спектра сигнала, кГц	double	Δf	Задается или рассчитывается
8.	Длительность импульса, сек.	double	$\tau_{\text{и}}$	Задается или рассчитывается
9.	Длительность дискрета ФКМ сигнала, с		$\tau_{\text{д}}$	Задается или рассчитывается
10.	Период повторения, сек.	double	T_0	Задается или рассчитывается
11.	Дальность минимальная, м	integer	$D_{\text{мин}}$	Задаются или рассчитывается
12.	Дальность максимальная, м	integer	$D_{\text{макс}}$	
13.	Дискретизация по времени запаздывания (дальности), с	double	Δt	Задается или рассчитывается
14.	Дискретизация по доплеровской частоте (радиальной скорости), Гц	double	$\Delta \omega$	Задается или рассчитывается
15.	Потенциал РЛС	double	$P_{\text{рлс}}$	Рассчитывается
16.	Коэффициент	double	K_{θ}	Задается,

№ п/п	Наименование атрибута	Тип	Обозначение	Способ получения
	пропорциональности для расчета ДНА			по умолчанию $K_{\theta} \approx 0,88$

Примечания:

1. Кроме представленных в таблице, могут быть предложены и другие виды модуляции зондирующих сигналов.

2. Значение атрибута «Коэффициент пропорциональности ДНА» зависит от вида сигнала и используется при расчете ширины ДНА. Для прямоугольных импульсов атрибут принимает значение равно 1, для гауссовой огибающей значение атрибута равно 0,7. Этот коэффициент зависит также от типа антенны. Для зеркальных антенн его значение лежит в пределах от 0,6 до 0,8. Для ФАР можно принять равным 0,88.

3. Атрибуты «Дискрета по дальности ...» и «Дискрета по скорости ...» должны рассчитываться автоматически при наличии признака моделирования матрицы «D-V» в сущности «Алгоритмы обработки».

4. Для ЛЧМ сигналов атрибут «Дискрета по скорости ...» не задается.

5. Атрибут «Дальность минимальная» должен рассчитываться автоматически при задании длительности импульса. Атрибут «Дальность максимальная» рассчитывается автоматически при задании периода повторения.

6. Пользователю должна предоставляться возможность корректировать значения атрибутов, которые рассчитываются автоматически или определяются по умолчанию.

3.5 Таблица «Режимы работы РЛС»

№ п/п	Наименование атрибута	Тип	Обозначение	Способ получения
1.	Код режима работы	integer		Задается
2.	Тип РЛС	integer		Задается
3.	Название режима	char(30)		Задается
4.	Код вида сигнала захвата	integer		Задается
5.	Код вида сигнала сопровождения	integer		Задается
6.	Признак включения канала ВВ	smallint	0 – выключен 1 – включен	Задаются
7.	Признак включения канала ГГ	smallint		
8.	Признак включения канала ВГ	smallint		

№ п/п	Наименование атрибута	Тип	Обозначение	Способ получения
9.	Признак включения канала ГВ	smallint		
10.	Количество приемных лучей парциальной ДНА по азимуту	smallint	$K_{пл\beta}$	Задается
11.	Количество приемных лучей парциальной ДНА по углу места	smallint	$K_{пл\epsilon}$	Задается
12.	Расстановка приемных лучей по азимуту, рад.	smallint	$\Delta\theta_{пл\beta}$	Задается
13.	Расстановка приемных лучей по углу места, рад.	smallint	$\Delta\theta_{пл\epsilon}$	Задается

Примечание. У одного типа РЛС может быть несколько режимов с разным сочетанием сигналов захвата и сопровождения траекторий.

3.6 Таблица «Дислокация РЛС»

№ п/п	Наименование атрибута	Тип	Обозначение	Способ получения
1.	Код РЛС	integer		Задается
2.	Тип РЛС	integer		Задается
3.	Код режима работы	integer		Задается
4.	Широта, рад.	double		Задается
5.	Долгота, рад.	double		Задается
6.	Высота, м	integer		Задается

3.7 Таблица «Дислокация антенны РЛС»

№ п/п	Наименование атрибута	Тип	Обозначение	Способ получения
1.	Код дислокации	integer		Задается
2.	Код РЛС	integer		Задается
3.	Код антенны	integer		Задается

№ п/п	Наименование атрибута	Тип	Обозначение	Способ получения
4.	Широта, рад.	double	По умолчанию присваиваются координаты дислокации РЛС, но пользователь должен иметь возможность внести изменения	
5.	Долгота, рад.	double		
6.	Высота позиции, м	integer		
7.	Высота ЭЦА, м	double	По умолчанию присваивается значение ЭЦА из ТТХ антенны	
8.	Азимут нормали к полотну антенны, рад.	double	$\beta_{\text{рлс}}$	Задается
9.	Угол места нормали к полотну антенны, рад.	double	$\varepsilon_{\text{рлс}}$	Задается
10.	Углы закрытия	longblob	$\gamma_{\text{закр } i}$	Рассчитываются
11.	ДНА в вертикальной плоскости		По умолчанию берется из ТТХ, либо задается пользователем для конкретной позиции	

Примечание. По умолчанию атрибутам «Широта», «Долгота», «Высота», присваиваются значения аналогичных атрибутов сущности «Дислокация РЛС», атрибутам «Высота ЭЦА» и «ДНА в вертикальной плоскости» – значения аналогичных атрибутов сущности «ТТХ передающей антенны». Пользователю должна предоставляться возможность ввести значения указанных атрибутов самостоятельно, если они отличаются от присвоенных по умолчанию.

3.8 Таблица «Зоны обзора пространства»

№ п/п	Наименование атрибута	Тип	Обозначение	Способ получения
1.	Код зоны обзора	integer		Задается
2.	Код РЛС	integer		Задается
3.	Код вида сигнала	integer		Задается
4.	Номер по порядку	smallint		Задается
5.	Минимальный азимут, рад.	double	$\beta_{\text{мин}}$	Задается
6.	Максимальный азимут, рад.	double	$\beta_{\text{макс}}$	Задается

№ п/п	Наименование атрибута	Тип	Обозначение	Способ получения
7.	Шаг по азимуту, рад.	double	$\Delta\theta_\beta$	Задается
8.	Минимальный угол, рад.	double	ε_{\min}	Задается
9.	Максимальный угол, рад.	double	ε_{\max}	Задается
10.	Шаг по углу, рад.	double	$\Delta\theta_\varepsilon$	Задается

Примечания:

1. По умолчанию шагам по азимуту и углу места присваиваются значения ширины ДНА по соответствующим углам. Пользователю должна предоставляться возможность ввести другие значения.

2. При задании минимальных и максимальных значений азимута и угла места зон обзора должен осуществляться автоматический контроль того, чтобы максимальное отклонение главного луча ДНА от нормали к полотну антенны не выходило за ограничения, наложенные при задании ТТХ антенн.

3. В совокупность зон обзора пространства РЛС на конкретной позиции могут входить как барьерные зоны, так и сектора обзора в любом сочетании.

3.9 Таблица «Задаваемые цели»

№ п/п	Наименование атрибута	Тип	Обозначение	Способ получения
1.	Тип (идентификатор) цели	integer		Задается
2.	Наименование цели	char(30)		Задается
3.	Средняя ЭПР цели, м ²	double	$\bar{\sigma}_c$	Задается или рассчитывается
4.	ЭПР цели для канала ВВ, м ²	double	$\sigma_{c \text{ ВВ}}$	Задаются или рассчитываются
5.	ЭПР цели для канала ГГ, м ²	double	$\sigma_{c \text{ ГГ}}$	
6.	ЭПР цели для канала ВГ, м ²	double	$\sigma_{c \text{ ВГ}}$	
7.	ЭПР цели для канала ГВ, м ²	double	$\sigma_{c \text{ ГВ}}$	
8.	Азимут цели, рад.	double	β_c	Задаются
9.	Угол места цели, рад.	double	ε_c	
10.	Наклонная дальность до цели, м	double	D_c	

№ п/п	Наименование атрибута	Тип	Обозначение	Способ получения
11.	Требуемый рубеж обнаружения цели, м	double	$D_{\text{макс}}^{\text{тр}}$	Задается
12.	Радиальная скорость цели, м/с	double	V_D	Задается
13.	Целеуказание по азимуту, рад.	double	$\beta_{\text{цу}}$	Задаются или рассчитываются
14.	Целеуказание по углу места, рад.	double	$\varepsilon_{\text{цу}}$	

Примечания:

1. Пользователю должна предоставляться возможность одновременного задания нескольких целей.

2. ЭПР цели задается или рассчитывается для диапазона волн проектируемой РЛС в зависимости от углов визирования цели.

3. По умолчанию значения $\beta_{\text{рлс}}, \varepsilon_{\text{рлс}}, \beta_{\text{цу}}, \varepsilon_{\text{цу}}, \beta_{\text{ц}}, \varepsilon_{\text{ц}}$ принимаются равными 0. Пользователь должен иметь возможность задавать значения $\beta_{\text{ц}}, \varepsilon_{\text{ц}}$ в пределах зоны обзора пространства РЛС. При этом предполагается, что $\beta_{\text{цу}}, \varepsilon_{\text{цу}}$ автоматически принимают заданные значения $\beta_{\text{ц}}, \varepsilon_{\text{ц}}$. Пользователю должна предоставляться возможность изменения значений $\beta_{\text{цу}}, \varepsilon_{\text{цу}}$ по своему усмотрению.

4 ВЫХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Обозначение	Характеристика	Способ получения
$\Delta\beta$	Зона обзора пространства, в пределах которой обеспечиваются требуемые значения точности и разрешающей способности по заданному типу цели (заданной ЭПР)	Оценивается путем перебора различных сочетаний входных параметров
$\varepsilon_{\min}, \varepsilon_{\max}$		
D_{\min}, D_{\max}		
T_0	Период обзора пространства (для РЛС с ФАР)	Рассчитывается
D_{\max}	Максимальная дальность обнаружения цели с заданной ЭПР при заданных вероятностях правильного обнаружения и ложной тревоги	Рассчитывается
$P_{\text{обн}}$	Вероятность обнаружения цели с заданной ЭПР на заданном рубеже	Рассчитывается
$\sigma_D, \sigma_{V_D}, \sigma_\beta, \sigma_\varepsilon$	СКО определения дальности, радиальной скорости, угловых и плоскостных координат, высоты	Рассчитываются
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy}, \sigma_h$		
δ_D, δ_V	Разрешающие способности по дальности, радиальной скорости, азимуту, углу места и высоте	Рассчитываются
$\delta_\beta, \delta_\varepsilon$		
δ_h		

Примечания:

1 Настоящая постановка задачи может уточняться и корректироваться в процессе выполнения ОКР «САПР-РЛС» по согласованию сторон.

2 Состав и типы используемых входных и выходных данных могут уточняться по мере разработки и уточнения баз данных САПР-РЛС.

Советник генерального конструктора

В.Саушкин

ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Разработка принципов построения и программно-алгоритмического обеспечения комплексного МИМС ЗРС. Научно-технический отчет. П.А.Созинов, В.А.Трухан. – НПЦ «Радиосистемы», 1999 г.
2. Теоретические основы радиолокации. Под ред. Ширмана Я.Д. Учебное пособие для вузов. М.: Советское радио, 1970 г.
3. Саврасов Ю.С. Алгоритмы и программы в радиолокации. – М.: Радио и связь, 1985. – 216 с.
4. Отчет о составной части опытно-конструкторской работы «Разработка математических моделей для компонентов специализированного программно-аппаратного комплекса для автоматизированного проектирования радиолокационных устройств и систем» (Шифр – «САПР-РЛС-МГТУ-1») (Итоговый) Часть 1. НИИ РЭТ МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2016 г.
5. Белоцерковский Г.Б. Основы радиолокации и радиолокационные устройства. М.: Советское радио, 1975 г.
6. Финкельштейн М.И. Основы радиолокации: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1983 г.
7. Моделирование в радиолокации. Под ред. А.И.Леонова. М.: Советское радио, 1979 г.
8. Фарбер В.Е. Основы траекторной обработки радиолокационной информации в многоканальных РЛС. Учебное пособие. М.: МФТИ, 2005 г.
9. Панасюк Ю.Н. Обработка радиолокационной информации в радиотехнических системах. Учебное пособие. Тамбов: ФУБОУ ВПО «ТГТУ», 2016 г.
10. Фарина А., Студер Ф. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1993.
11. Основы построения радиолокационных станций радиотехнических войск. Под ред. В.Н.Тяпкина. Учебник. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2011 г.
12. Справочник офицера противовоздушной обороны. М.: Воениздат, 1987 г.
13. Справочник офицера воздушно-космической обороны. Тверь: ВА ВКО, 2005 г.