



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



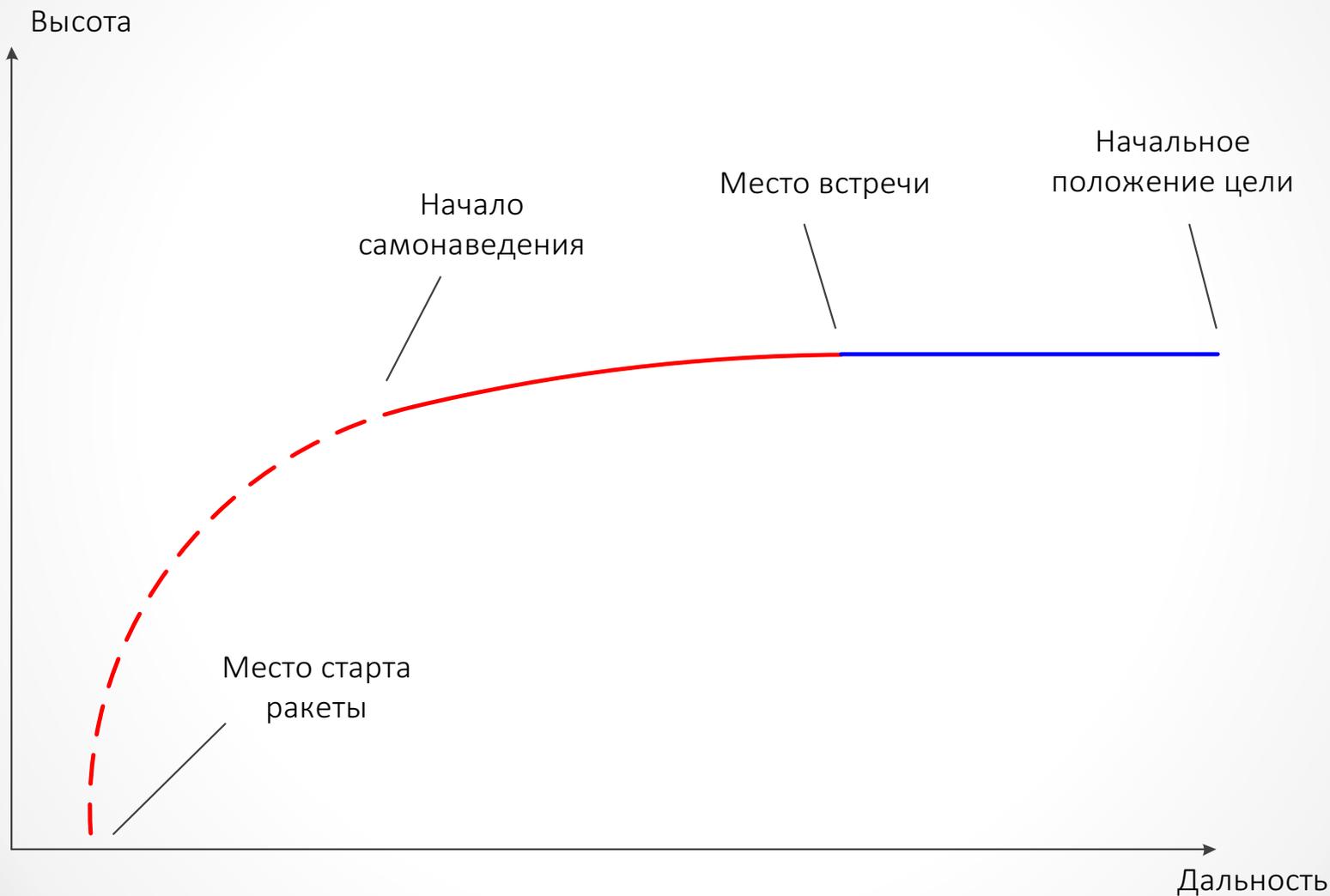
Повышение помехозащищенности активной радиолокационной головки самонаведения (АРГС) путем изменения алгоритма обработки радиолокационной информации в задаче наведения

Докладчик: аспирант 4-ого г. о. Савин Д.А.

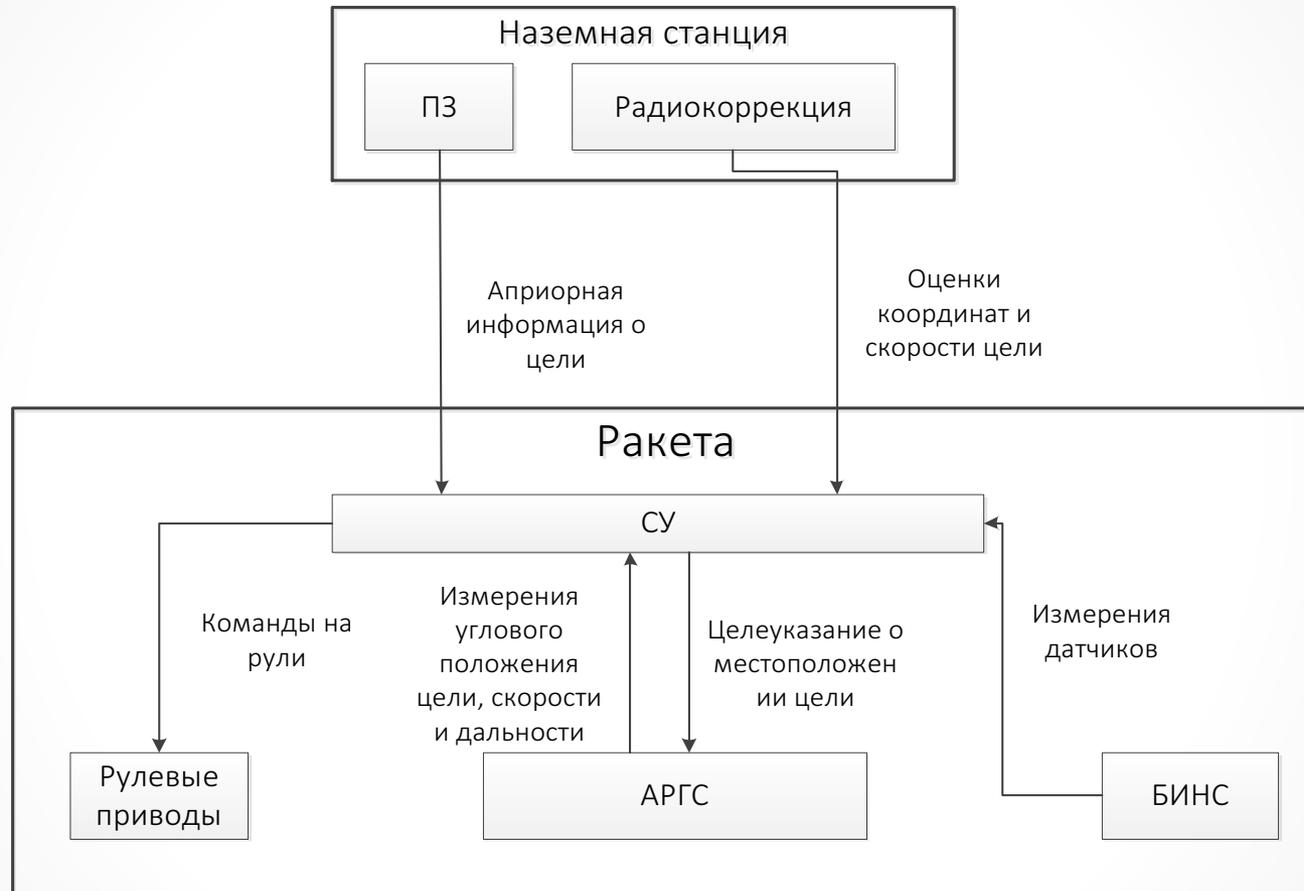
Научный руководитель Истратов А.Ю.

Кафедра Кибернетика

Этапы наведения ЗУР



Упрощенная схема информационного обмена в ракете



ПЗ – полетное задание;

СУ – система управления

АРГС – активная радиолокационная головка самонаведения

- БИНС – бортовая инерциальная навигационная система

Базовые принципы радиолокации

- Определение расстояния до объекта:

$$t_{\text{д}} = 2D / c \Rightarrow D = \frac{t_{\text{д}} c}{2}, c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$t_{\text{д}}$ - время запаздывания сигнала

- Определение радиальной скорости :

$$\omega = \omega_0 \left(1 - \frac{v}{c} \right)$$

ω - частота принятого сигнала

ω_0 - частота излученного сигнала

v - скорость приближения источника сигнала

- Направление на источник сигнала - касательная к фазовому фронту принимаемой волны

Общий вид БРЛ



Принцип действия: БРЛ используются для создания и излучения сигналов, аналогичных по структуре сигналам, отраженным от защищаемых самолетов, и превосходящих их по мощности. В таких условиях РГС атакующей ЗУР, принимая оба сигнала, наводится на их энергетический центр. При этом поражение ракетой самого самолета практически исключается.

Существующие зарубежные БРЛ

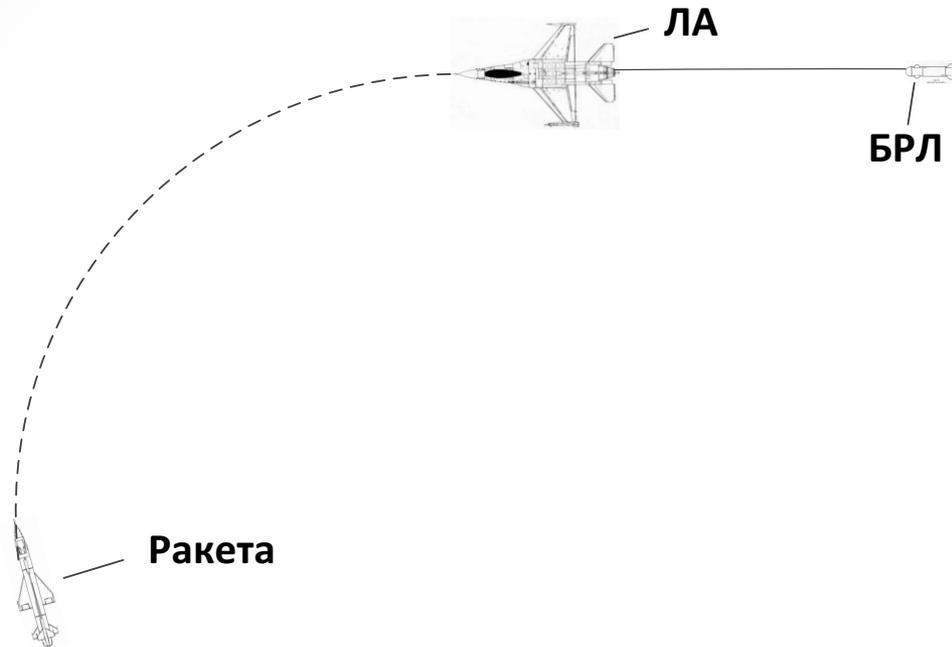
- AN/ALE-50 (Raytheon Systems, US)
- AN/ALE-55 (Lockheed Martin, US)
- B02D (Celsius Tech Electronics AB, Sweden)
- Ariel (Marconi Defense Systems, England)
- Sky Buzzer (Daimler Aerospace AG (DASA), Germany)

Технические характеристики современных БРЛ

Характеристика	Диапазон значений
Диапазон рабочих частот	2-18 ГГц
Энергетический потенциал	10-20 Вт
Время работы	Единицы минут
Длина буксировочного троса	50-200м.
Скорость носителя	До 1.4 М.
Маневренность носителя	До 5g

Подходы к противодействию БРЛ:

1. Построение специальной траектории



2. Применение специальных методов цифровой обработки РЛ сигнала

- Методы сверхразрешения (частотного, временного, углового, пространственного),
- Методы компенсации помех.

Область применения предлагаемого алгоритма противодействия

Алгоритм работает при следующих начальных условиях:

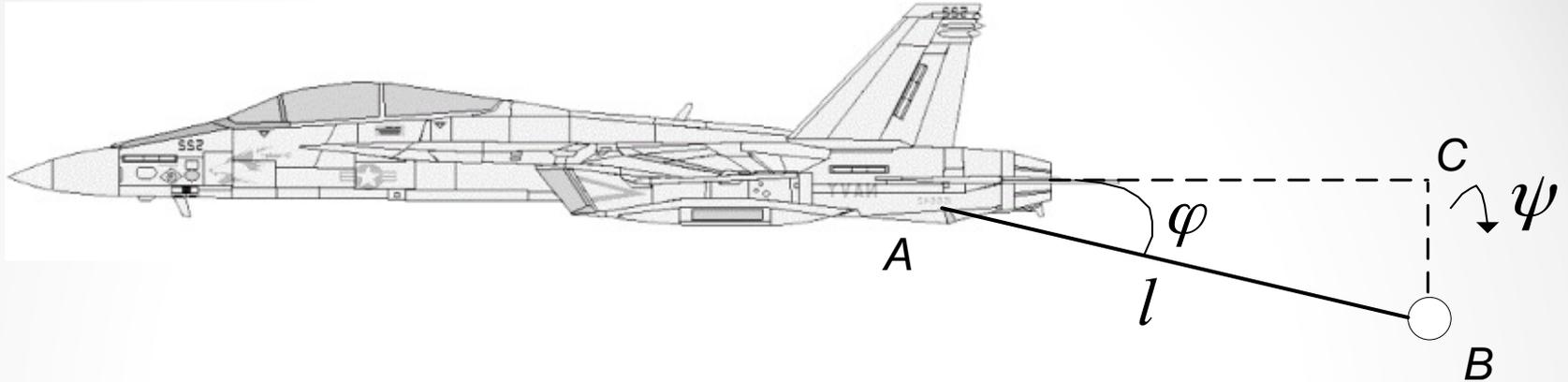
- Тип цели – одиночная цель,
- Количество буксируемых ловушек: одна,
- Начало работы БРЛ: в момент пуска ракеты,
- Ракурс подлета к цели: произвольный,
- Априорная информация о наличии БРЛ: нет,
- Тип помехи БРЛ: непрерывная/импульсная шумовая.

Использование математической модели замкнутого контура наведения ЗУР

Математическая модель замкнутого контура наведения ЗУР содержит:

- Модель движения ракеты;
- Модель АРГС;
- Модель БИНС;
- Модель СУ;
- Модель динамики цели;
- Модель измерений наземной станции;
- Модель поступающих в приемник радиолокационных сигналов

Математическая модель БРЛ



Основные параметры БРЛ, задаваемые через графический интерфейс:

- l – длина троса
- φ - угол отклонения троса от оси движения ЛА
- ψ - угол поворота треугольника ABC относительно оси движения летательного аппарата AC
- $S_{пер}$ - мощность передатчика помехи
- t_n - время начала применения БРЛ

Математическая модель

шумовой помехи от буксируемой ловушки

$$U[n] = \sqrt{\frac{P_{NJ}[n]}{2}} \cdot (\xi_R + j \cdot \xi_I)$$

$U[n]$ - отсчет комплексной огибающей сигнала на выходе n -ого канала приемника

ξ_R, ξ_I - некоррелированные по времени гауссовские случайные величины с нулевым средним и единичной дисперсией.

$P_{NJ}[n]$ - мощность шумовой помехи для n -ого канала приемника

Математическая модель

шумовой помехи БРЛ

$$P_{NJ}[n] = \frac{PD_{NJ} \cdot \Delta F_{RC} \cdot G_A \cdot L_F \cdot L_{RDM} \cdot F_A[n] \cdot \lambda^2}{(4\pi \cdot D)^2} \cdot \frac{T_{SLEN}[n]}{T_{IM}} S_n(D_{II}),$$

PD_{NJ} - спектральная плотность помехи на выходе антенного тракта передатчика активных помех

ΔF_{RC} - полоса пропускания приемника АРГС

G_A - коэффициент усиления антенны АРГС

L_F - коэффициент потерь в приемнике

L_{RDM} - коэффициент потерь в обтекателе

$F_A[n]$ - диаграмма направленности n-ого канала

λ - длина волны

D - дальность от ракеты до буксируемой ловушки

$T_{SLEN}[n]$ - длина строка n-ого канала

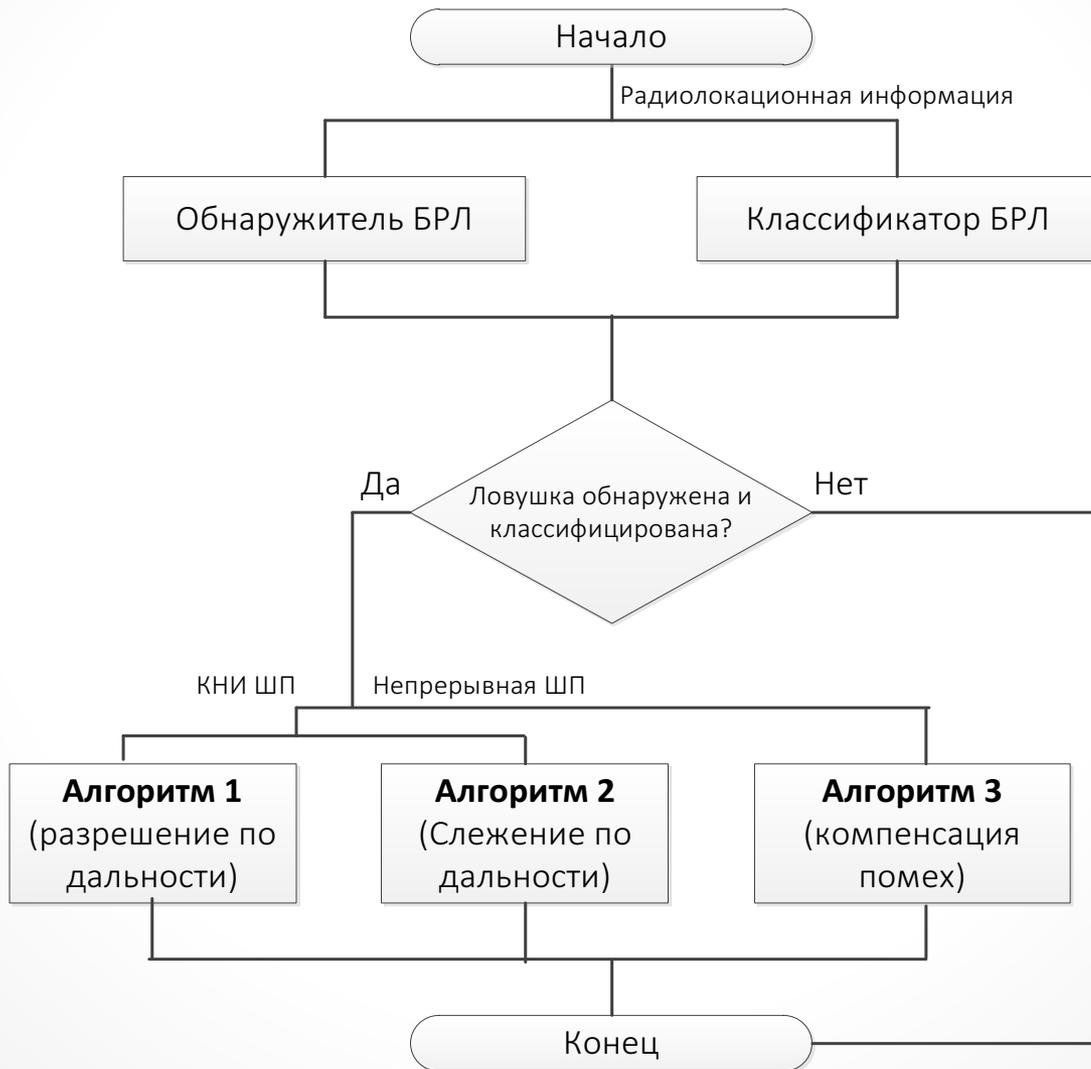
T_{IM} - период следования зондирующих импульсов

$S_n(D_{II})$ - функция, описывающая изменение амплитуды принятого сигнала из-за стробирования импульсов КНИ в n-ом канале приемника

$D_{II} = D_{ЛА} + l + D$ - полный путь, пройденный сигналом КНИ

$D_{ЛА}$ - дальность от ракеты до цели

Общая схема алгоритма противодействия буксируемой ловушке



Обнаружение БРЛ

Основные каналы антенны:

$$U_{\Sigma} = A_1 G_0 + A_2 G_0,$$

$$U_Y = A_1 G_0 \mu \varepsilon_{Y1} + A_2 G_0 \mu \varepsilon_{Y2},$$

$$U_Z = A_1 G_0 \mu \varepsilon_{Z1} + A_2 G_0 \mu \varepsilon_{Z2}.$$

где A_1, A_2 - комплексные амплитуды сигнала от цели на входе антенного тракта РГС,

G_0 - коэффициент усиления основной антенны РГС,

$\varepsilon_{Y1}, \varepsilon_{Y2}, \varepsilon_{Z1}, \varepsilon_{Z2}$ - угловые отклонения направления на цель и ловушку от главной оси антенны РГС.

μ - пеленгационная характеристика антенны РГС,

Коэффициенты компенсации:

$$k_Y = \mu \varepsilon_{Y2},$$

$$k_Z = \mu \varepsilon_{Z2},$$

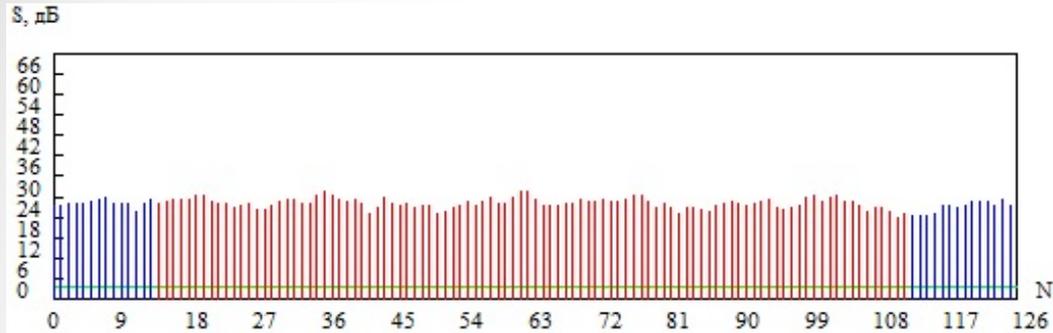
Образование новых разностных каналов:

$$U'_Y = U_Y - k_Y U_{\Sigma} = \mu A_1 G_0 (\varepsilon_{Y1} - \varepsilon_{Y2}),$$

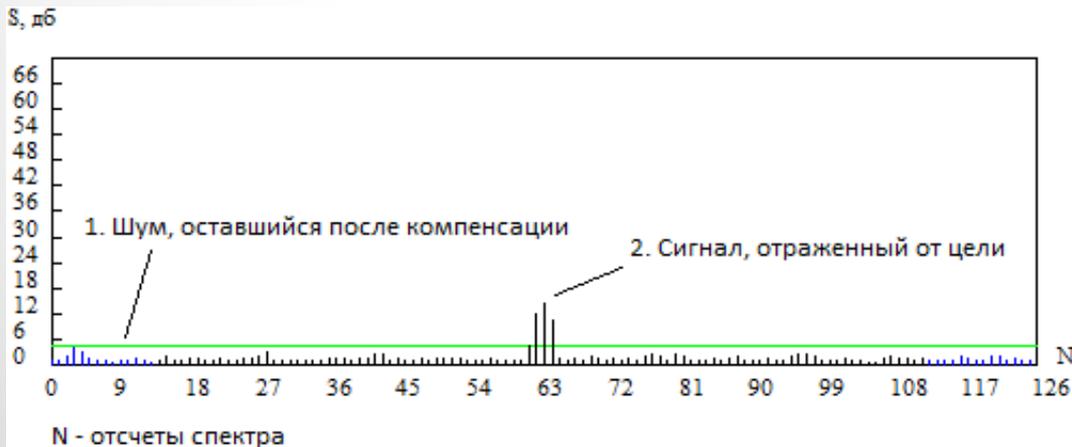
$$U'_Z = U_Z - k_Z U_{\Sigma} = \mu A_1 G_0 (\varepsilon_{Z1} - \varepsilon_{Z2}),$$

Обнаружение БРЛ

Спектр *исходного* разностного канала



Спектр *образованного* разностного канала

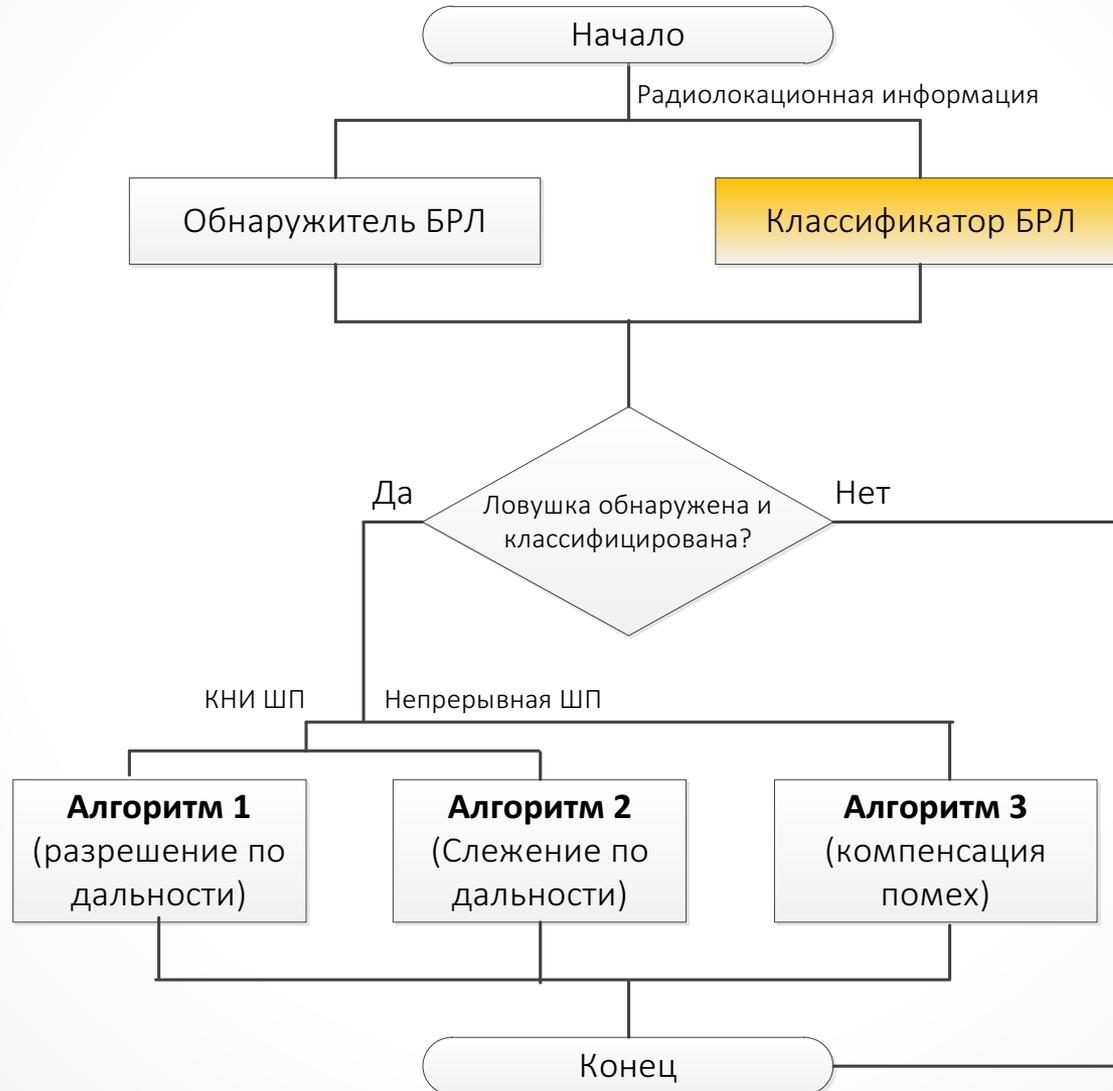


Дальность обнаружения
БРЛ

$$R_{\max} = 4 \sqrt{\frac{P_t G_t \lambda^2 \sigma \mu \Delta \varphi}{(4\pi)^3 S_{\min}}}$$

где P_t - мощность РЛС,
 G_t - коэффициент усиления антенны,
 λ - длина волны,
 σ - ЭПР цели,
 S_{\min} - порог обнаружения,
 $\Delta \varphi$ - угловое расстояние между целью и ловушкой.

Классификатор БРЛ



Классификатор БРЛ

Используемые признаки:

- $I_{\text{ШП}}$ - признак шумовой помехи
- $I_{\text{НЕПР}}$ - признак непрерывной помехи

$I_{\text{ШП}} = 1$, если средний уровень шума превышает заданный порог,

$I_{\text{НЕПР}} = 1$, если признак $I_{\text{ШП}}$ не сбрасывается дольше периода повторения слепых дальностей $T_{\text{СД}}$.

$$T_{\text{СД}} = \frac{T_{\text{повт}} \cdot c}{2 \cdot V_{\text{сбл}}}$$

$T_{\text{повт}}$ - период повторения зондирующих импульсов

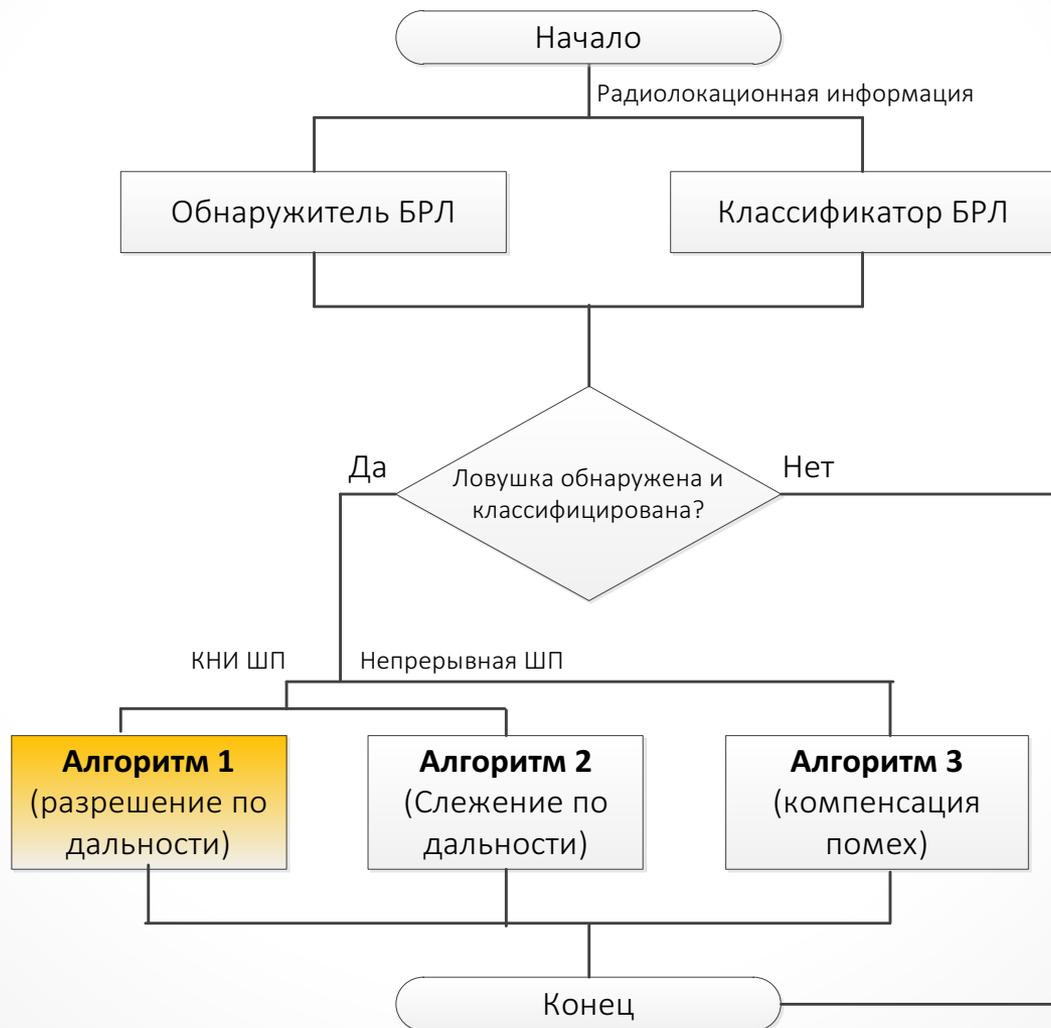
$V_{\text{сбл}}$ - скорость сближения ракеты и цели

c - скорость света

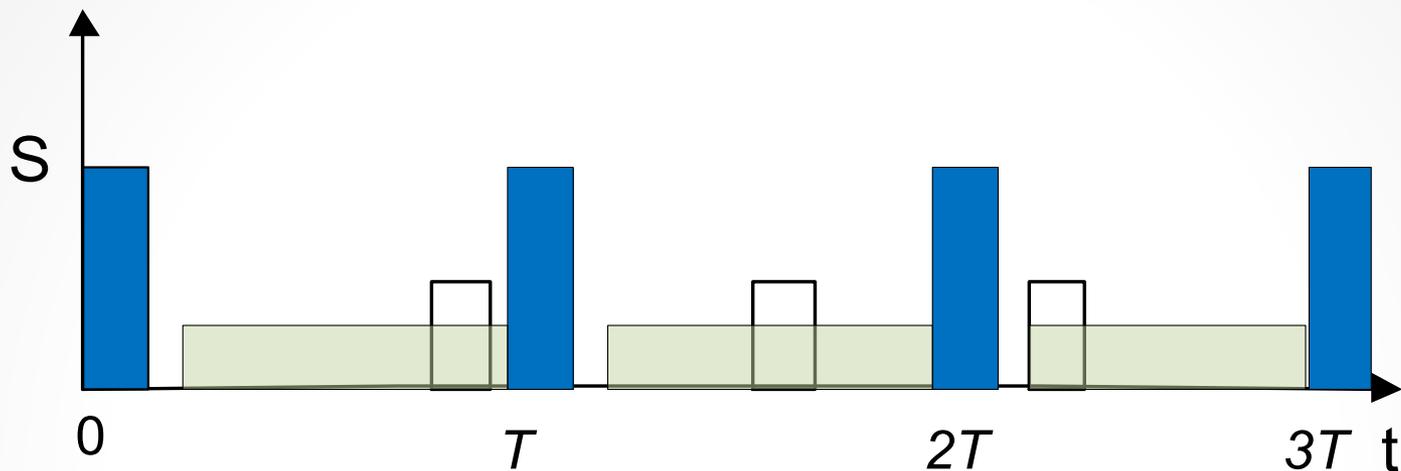
Окончательная классификация

Значение $I_{\text{ШП}}$	Значение $I_{\text{НЕПР}}$	Тип помехи
1	0	Импульсная ШП
1	1	Непрерывная ШП

Алгоритм 1. Разрешение сигнала от цели и ловушки по дальности



Цикл работы антенны

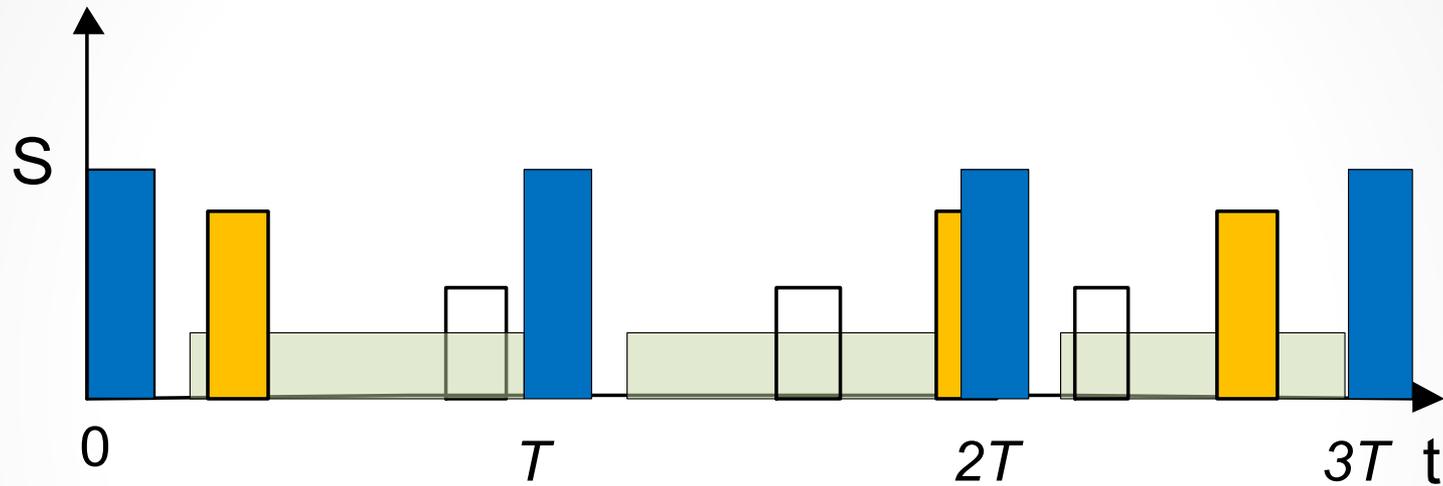


 - зондирующий импульс;

 - отраженный от цели импульс,
вернувшийся в приемник;

 - строб приемника

Цикл работы антенны АРГС в случае применения БРЛ



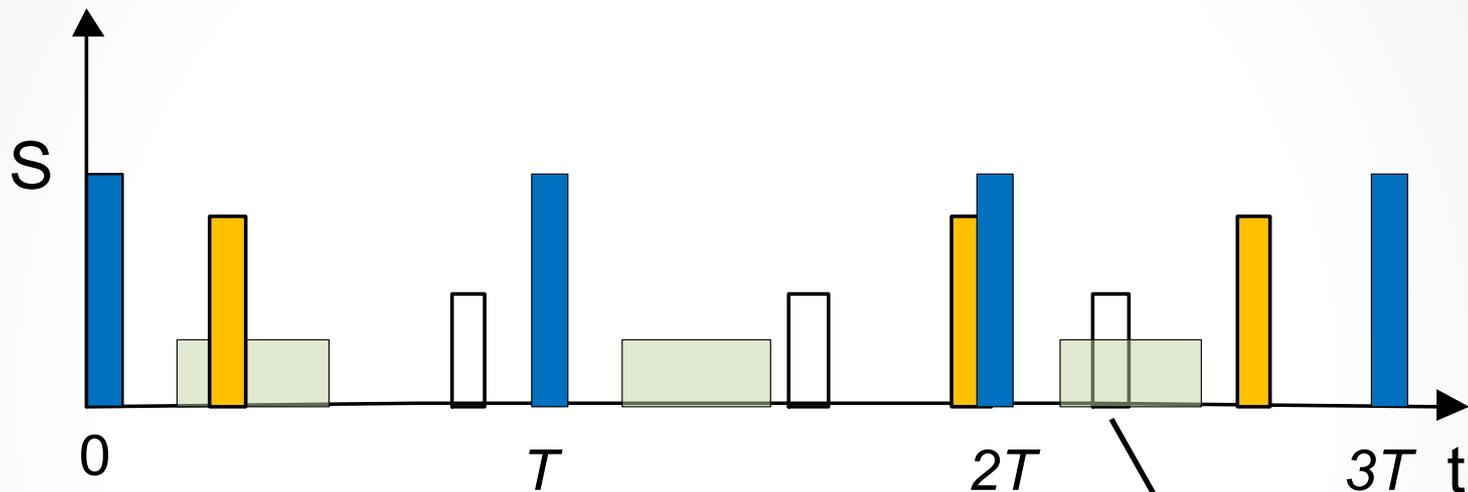
 - зондирующий импульс;

 - отраженный от цели импульс, вернувшийся в приемник;

 - строб приемника

 - сигнал от БРЛ

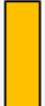
Эффект от уменьшения длины строба и скважности зондирующих импульсов



 - зондирующий импульс;

 - отраженный от цели импульс, вернувшийся в приемник;

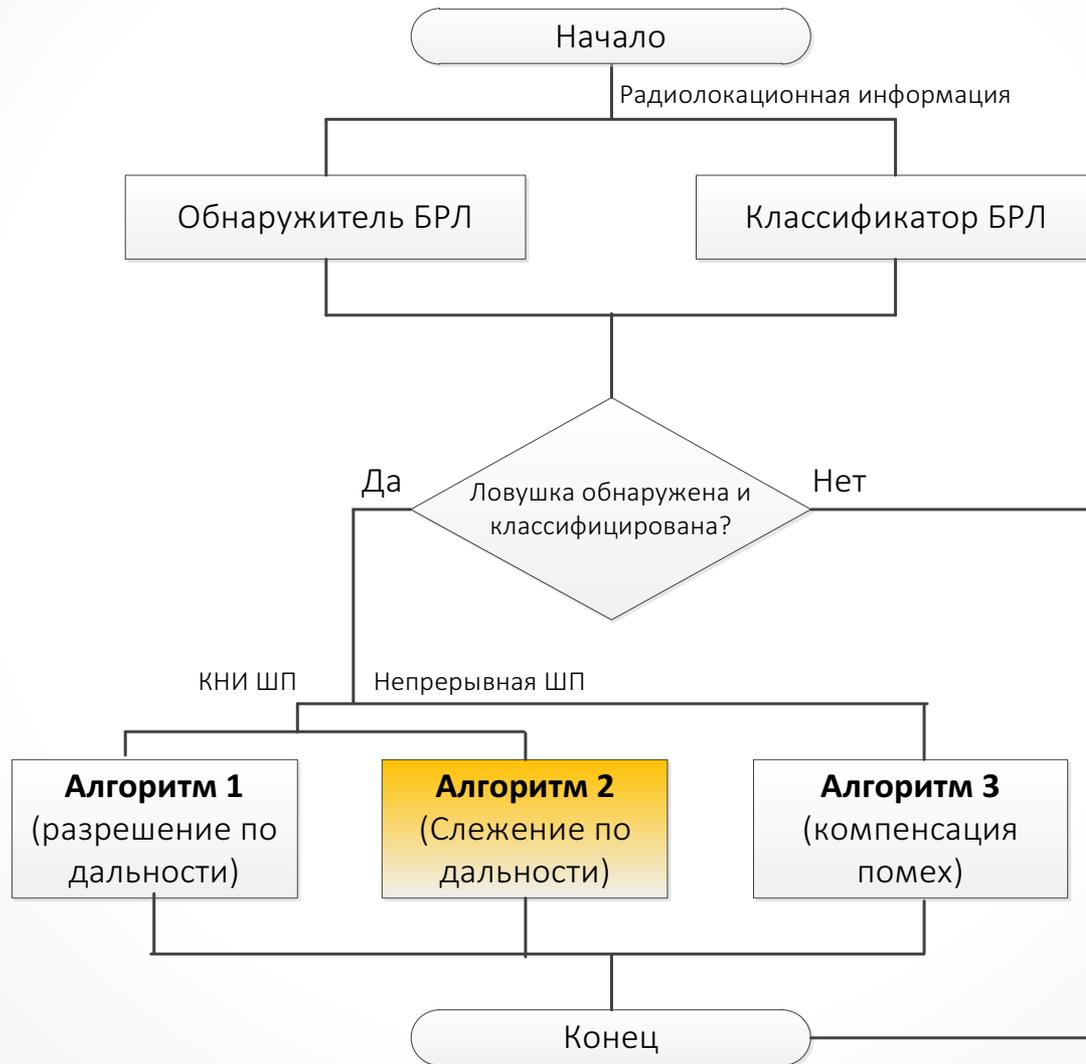
 - строб приемника

 - сигнал от БРЛ

Угловые измерения цели
могут быть извлечены

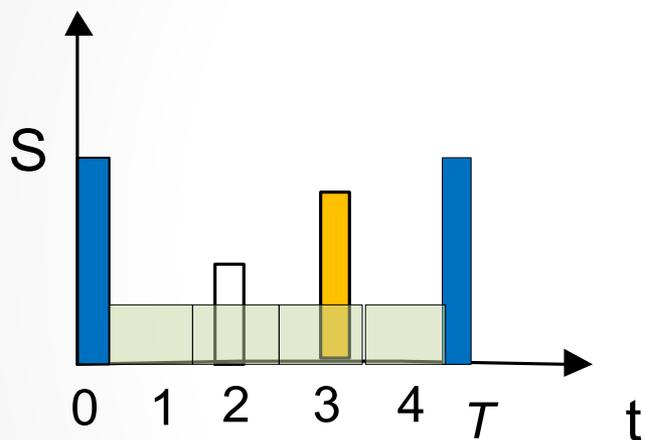
Алгоритм 2

Слежение по дальности

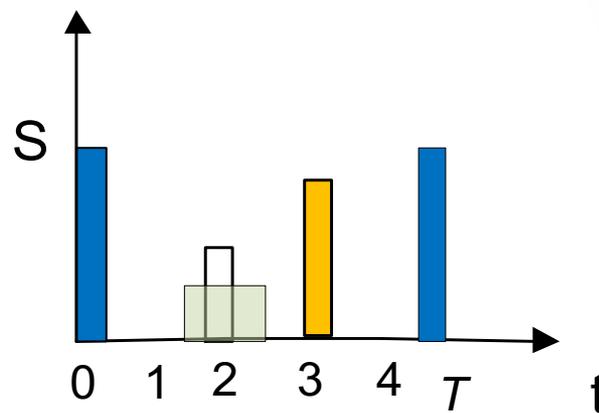


Алгоритм 2. слежение по дальности

Поиск по дальности

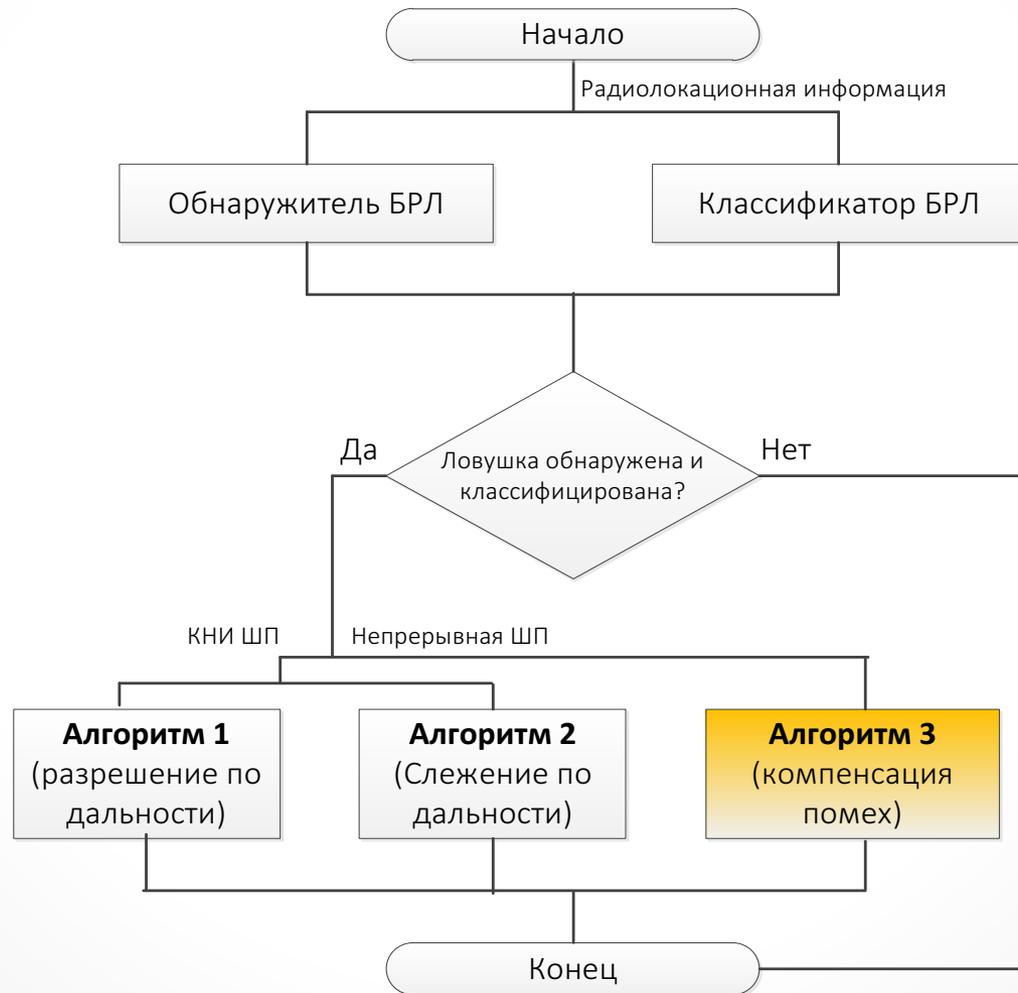


Слежение по дальности



-  - зондирующий импульс;
-  - отраженный от цели импульс;
-  - строб приемника
-  - сигнал от БРЛ

Алгоритм 3. Компенсация помехи ДИК



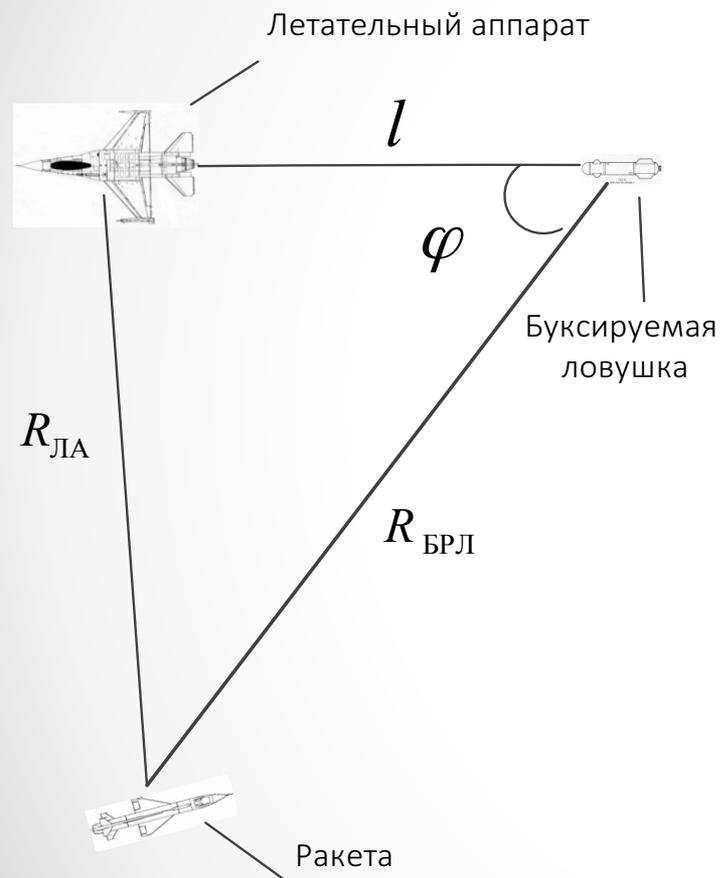
Алгоритм 3. Компенсация помехи ДИК

Изменения в алгоритме обработки радиолокационной информации:

- Наведение в упрежденную точку,
- Компенсация помех дополнительным информационным каналом,
- Изменение направления антенны.

Наведение в предполагаемое местоположение

цели



С целью оптимизации траектории после обнаружения БРЛ УР направляется в предполагаемое местоположение цели $\vec{X}_{ЛА}$:

$$\vec{X}_{ЛА} = \vec{X}_{БРЛ} + \vec{V}_{ЛА} \cdot l,$$

где $\vec{X}_{БРЛ}$ - координаты БРЛ, вычисляемые при помощи угловых измерений РГС и информации о дальности до цели, получаемой по линии радиокоррекции,

$\vec{V}_{ЛА}$ - единичный вектор скорости ЛА, получаемый по линии радиокоррекции,

l - предполагаемая длина троса.

Компенсация помех ДИК

1) Вычитание полезного сигнала из дополнительного информационного канала

$$U'_\partial = U_\partial - k_1 U_\Sigma - k_2 U_Y - k_3 U_Z,$$

где U_∂ - исходный дополнительный канал РГС,

U'_∂ - новый дополнительный канал РГС,

k_1, k_2, k_3 - комплексные коэффициенты.

2) Компенсация основных каналов РГС:

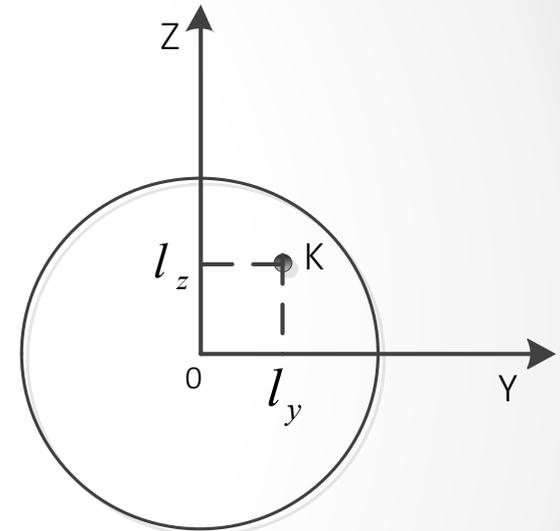
$$U'_\Sigma = U_\Sigma - k_\Sigma U_c,$$

$$U'_Y = U_Y - k_Y U_c,$$

$$U'_Z = U_Z - k_Z U_c,$$

где U'_Σ, U'_Y, U'_Z - скомпенсированные основные каналы,

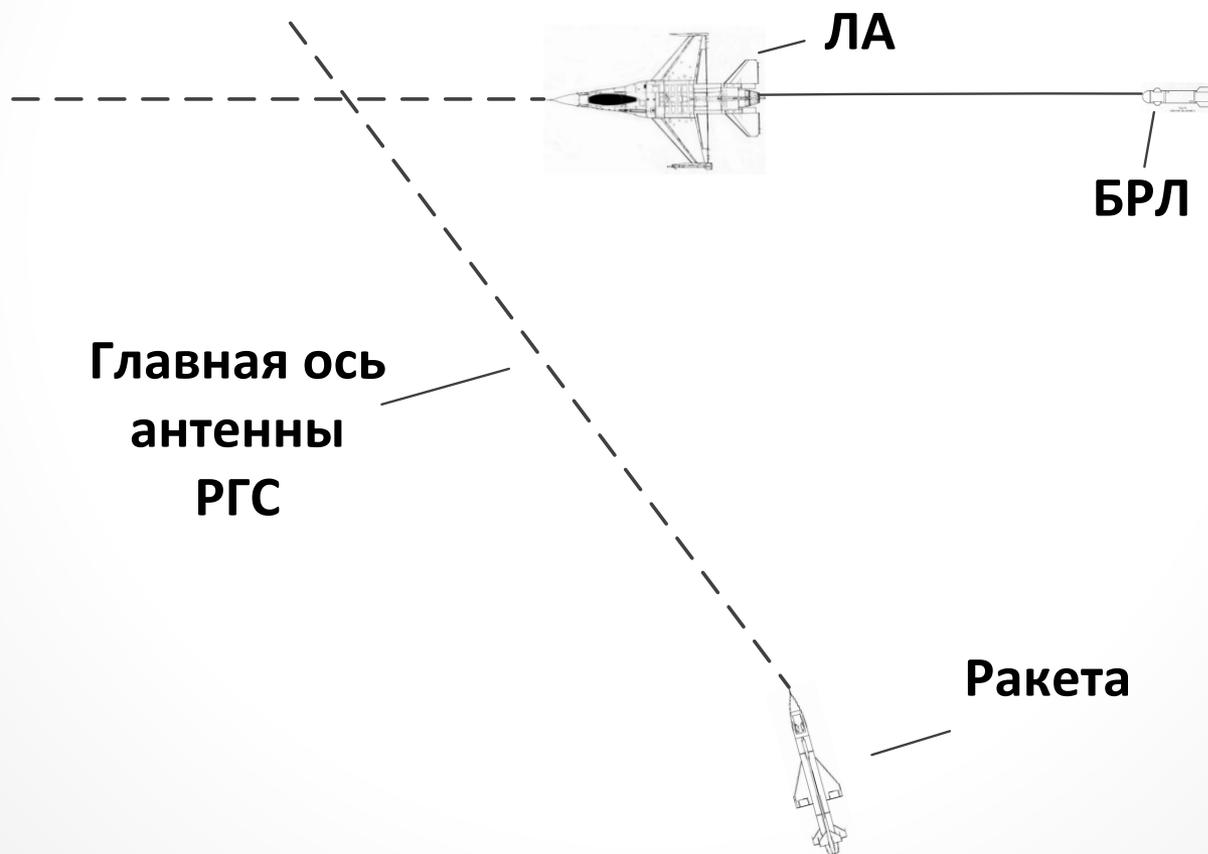
k_Σ, k_Y, k_Z - коэффициенты компенсации.



К – дополнительная (компенсационная) антенна;

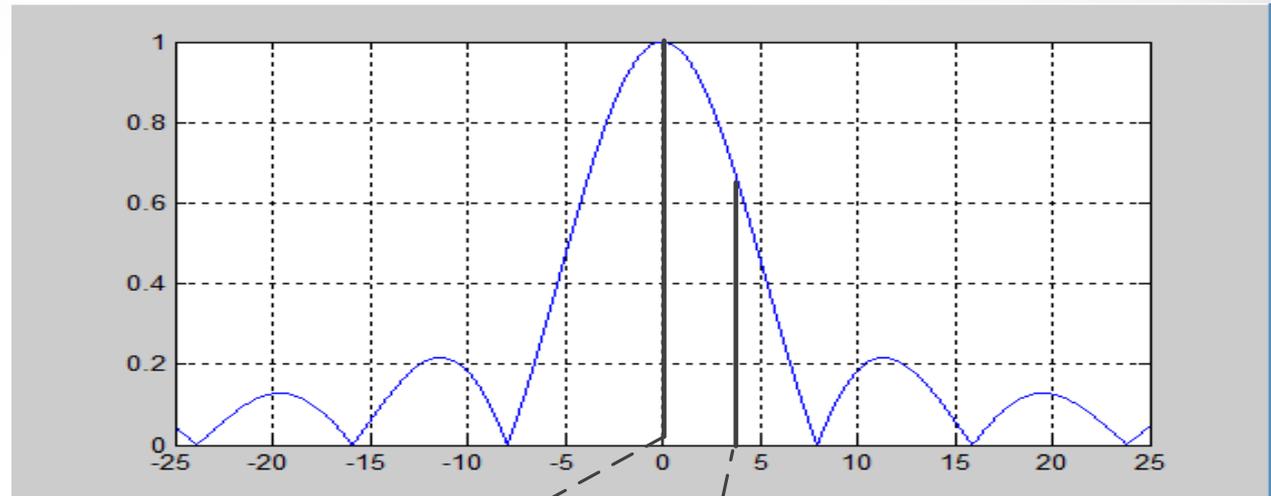
Выбор оптимального направления антенны

Антенна РГС направляется в точку, находящуюся на некотором расстоянии впереди ЛА по линии троса.



Выбор оптимального направления антенны

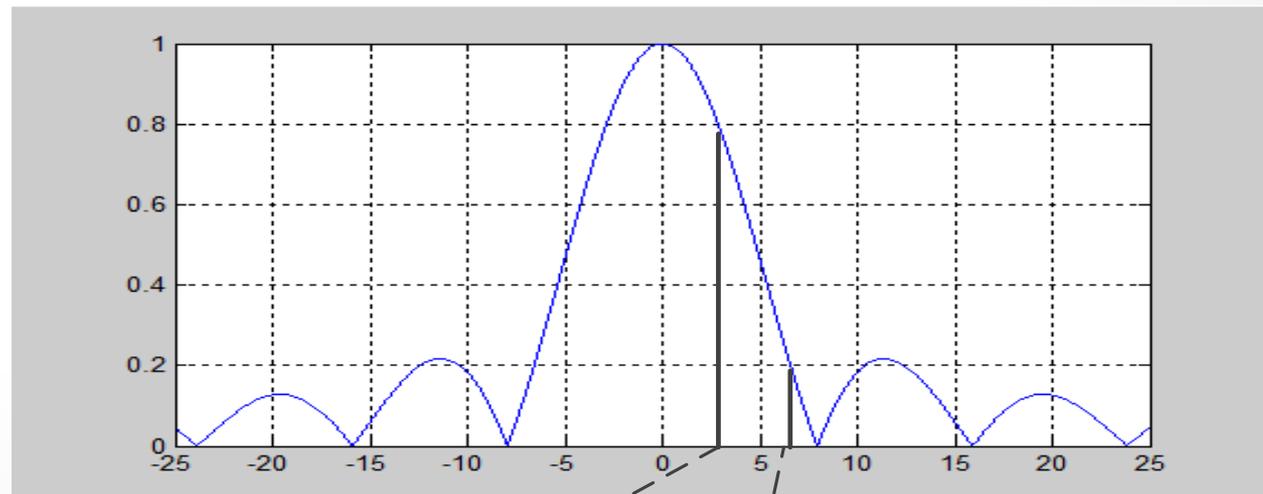
Антенна
смотрит на ЛА



Коэффициент ДНА
на полезный сигнал

Коэффициент
ДНА на помеху

Антенна
смотрит в
упрежденную точку



Коэффициент ДНА
на полезный сигнал

Коэффициент
ДНА на помеху

Методика тестирования алгоритма

- Для оценки каждого блока алгоритма были разработаны специальный набор вариантов моделирования (совокупность начальных условий);
- Для каждого варианта моделирования было просчитано 100 статистических реализаций
- На каждой статистической реализации (пуске) разыгрывались в соответствии со своими математическими моделями следующие случайные величины и процессы:
 - Ошибки выдачи ПЗ и кадров радиокоррекции РЛС;
 - Случайные ошибки пеленгации целей, включая ошибки обтекателя;
 - Случайные флуктуации ЭПР цели;
 - Случайный разброс параметров ракеты;

Исследование блока обнаружения БРЛ

Варьируемые величины:

Наименование	Обозначение	Значения
Длина троса, м	$l_{тр}$	50, 100, 200
Ракурс подлета, град	$\varphi_{под}$	0, 30, 60, 90

Каждому варианту соответствовали следующие начальные условия:

- Скорость цели – 300 м/с;
- ЭПР цели – 5м²;

Дальность обнаружения при моделировании

№	Длина троса	Ракурс полета	Минимум	Максимум	Среднее
1	50	0	3562	4331	3966
2	50	30	3576	4330	4010
3	50	60	3569	4732	4251
4	50	90	4026	5454	4482
5	100	0	4608	5827	4990
6	100	30	4606	6109	5072
7	100	60	4616	5811	5413
8	100	90	4942	6527	5685
9	200	0	5832	7242	6433
10	200	30	5846	7535	6518
11	200	60	6146	7600	6710
12	200	90	6501	8046	7190

Измерение уровня ложных обнаружений

Для измерения уровня ложных обнаружений были рассмотрены варианты из предыдущей таблицы с нулевой длиной троса

№	Ракурс подлета, град	Доля ложных тревог
1	0	0%
2	30	1%
3	60	0%
4	90	0%

Уровень ложных тревог не превышает 1% для всех ракурсов сближения

Исследование классификатора

В качестве критерия эффективности классификатора рассматривались доля правильно распознанных типов помехи и время, требующееся для классификации.

Варьируемые величины:

Название переменной	Обозначение	Рассматриваемые значения
Тип ШП	-	Импульсная, непрерывная
Скорость цели, м/с	V	300,500,700
Ракурс подлета, град	$\varphi_{под}$	0,45,90,135,180

Результаты работы классификатора

- Доля правильно распознанных типов помехи – 100%;
- Минимальное время классификации – 0 сек.;
- Максимальное время классификации – 1.55 сек.;
- Среднее время классификации – 0.617 сек.

Эффективность работы алгоритмов противодействия

Варьируемые параметры:

Название	Обозначение	Список значений
Тип помехи		Импульсная ШП, непрерывная ШП
ЭПР цели, m^2	σ	5, F-15
Длина троса, м	$l_{тр}$	50,100,200
Высота цели, м	$h_{ЛА}$	1000,3000,5000
Ракурс подлета, град	$\varphi_{рак}$	0,30,60,90,120,150,180

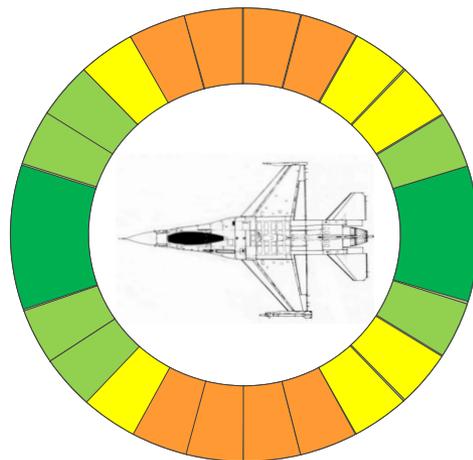
Критерий эффективности:

- вероятность попадания в круг радиусом $6m^2$

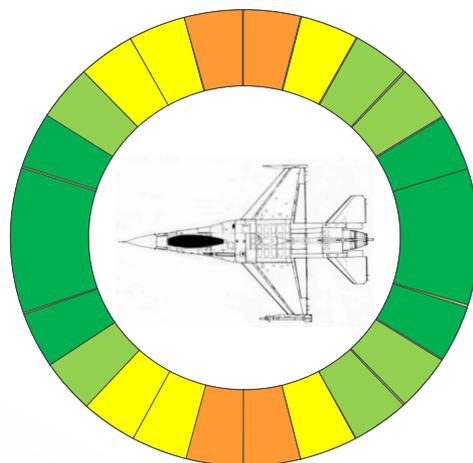
Сравнение алгоритмов противодействия

БРЛ с импульсной помехой

Алгоритм 1

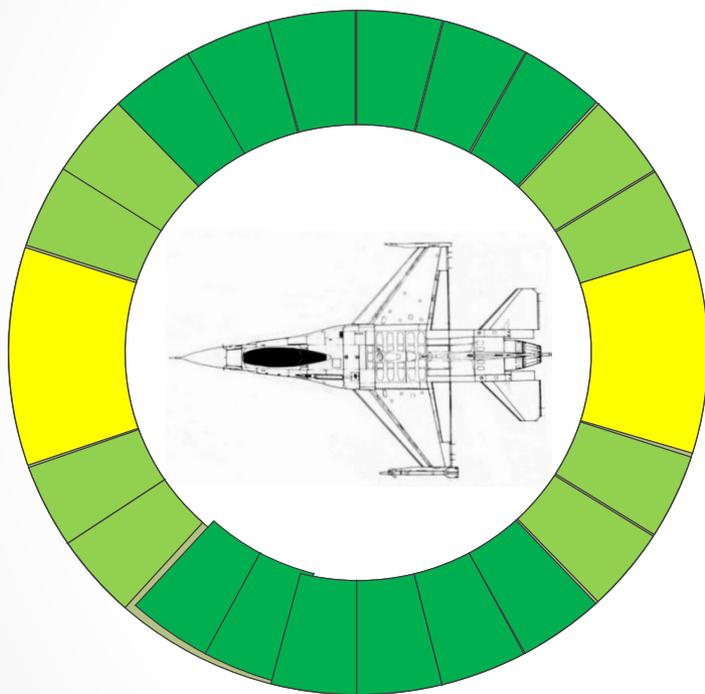


Алгоритм 2



Вероятность попадания	Цвет
90-100%	Зеленый
80-90%	Светло-зеленый
70-80%	Желтый
60-70%	Оранжевый
40-60%	Красный
Менее 40%	Темно-красный

Эффективность работы алгоритма противодействия БРЛ с непрерывной помехой



Вероятность попадания	Цвет
90-100%	Зеленый
80-90%	Светло-зеленый
70-80%	Желтый
60-70%	Оранжевый
40-60%	Красный
Менее 40%	Темно-красный

Итог. Достоинства алгоритма

Разработан алгоритм противодействия буксируемой радиолокационной ловушке, включающий в себя обнаружение ловушки, распознавание типа применяемой ею помехи. Алгоритм реализован и включен в состав вторичной обработки ЗУР малой дальности.

Достоинства алгоритма:

- Высокая эффективность,
- Малая вычислительная сложность,
- Малые требования к РГС
- Апробация на подробной математической модели самонаведения

Продвижения в аспирантуре

- Сданы 3 кандидатских экзамена (иностранный язык – 5, философия – 4, специальность – 5);
- Имеется 10 публикаций по теме диссертации (из них 3 ВАК);
- Имеется текст диссертации (97 стр).

Спасибо за внимание