



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ



# Разработка бортового алгоритма обработки радиолокационной информации в условиях воздействия искусственных помех из вынесенной точки пространства в задаче самонаведения

**Докладчик:** аспирант 3-его г. о. Савин Д.А.

**Научный руководитель** Истратов А.Ю.

Кафедра Кибернетика

# Этапы работы ЗРК

ЗРК – совокупность функционально связанных военных и технических средств, обеспечивающих решение задач по борьбе со средствами воздушно космического нападения противника



Этапы работы:

- Обзор
- Обнаружение
- Сопровождение
- Пуск ЗУР
- Контроль поражения

# Базовые принципы радиолокации

- Определение расстояния до объекта:

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

$t_{\Delta}$  - время запаздывания сигнала

- Определение радиальной скорости :

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

$\omega$  - частота принятого сигнала

$\omega_0$  - 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)

# AN/ALE-50

Raytheon Systems, US

AN/ALE-50 Towed  
Decoy System



AN/ALE-50 относится к первому поколению буксируемых ЛЦ активного типа. Состоит из двух частей.

**Первая часть:** устройство для сбрасывания ЛЦ и контроллер, обеспечивающий ее хранение и подвод электропитания.

**Вторая часть:** сама ЛЦ в виде автономной подсистемы, состоящей из приемопередатчика, усилителя на ЛБВ и модулятора.

БРЛ усиливает и переизлучает принимаемый от РЛС противника сигнал, имитируя тем самым эхо-сигнал от защищаемого самолета.

Применялись в Югославии (1999), Ираке (2004).



# AN/ALE-55

Lockheed Martin, US



AN/ALE-55 – БРЛ следующего поколения. В отличие от предыдущей ловушки использует информацию от самолетного приемника предупреждения о радиолокационном облучении. Формирование излучаемого сигнала происходит в самолетном специализированном генераторе, который передает его ловушке по волоконно-оптическому кабелю.

Таким образом, сама ловушка состоит только из антенны и передатчика, что значительно уменьшает ее стоимость.

Применяемые режимы:

- Режим создания шумовой помехи
- Режим имитации ложной цели

# B02D

Celsius Tech Electronics AB, Sweden



Буксируемая ложная цель B02D специально разработана для истребителей, поэтому ее выпуск (сброс) возможен во время полета со сверхзвуковой скоростью. У пилота имеется возможность выпускать ЛЦ без излучения при входе в область воздушного пространства, контролируемую РЛС противника. В конце периода, составляющем несколько минут, трос пиротехническим путем отсекается.



# Ariel

Marconi Defense Systems, England



Ariel первоначально разрабатывалась для защиты крупных самолетов, однако впоследствии появился и вариант для скоростных реактивных самолетов.

При буксировке скорость самолета составляет от 280 до 670 км/ч.

Вариант для скоростных реактивных самолетов был испытан на скоростях до  $M=1,2$ .

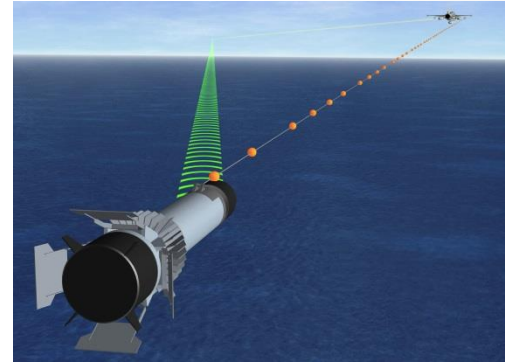
Система включается, когда самолет входит в область, где существует угроза со стороны радиолокационных средств противника.

После выхода из такой области Ariel втягивается обратно в самолет.



# Sky Buzzer

Daimler Aerospace AG (DASA), Germany



Эта ЛЦ предназначена для защиты как самолетов с большими фюзеляжами, так и истребителей, и имеет модульное построение (состав поставки может определяться заказчиком). ЛЦ Sky Buzzer вводит угловые ошибки в контуры сопровождения бортовых и наземных РЛС и головок самонаведения ракет.

В конце полета незадолго до посадки пилот отсекает ЛЦ, которая на парашюте может осуществить мягкую посадку в предусмотренном месте.

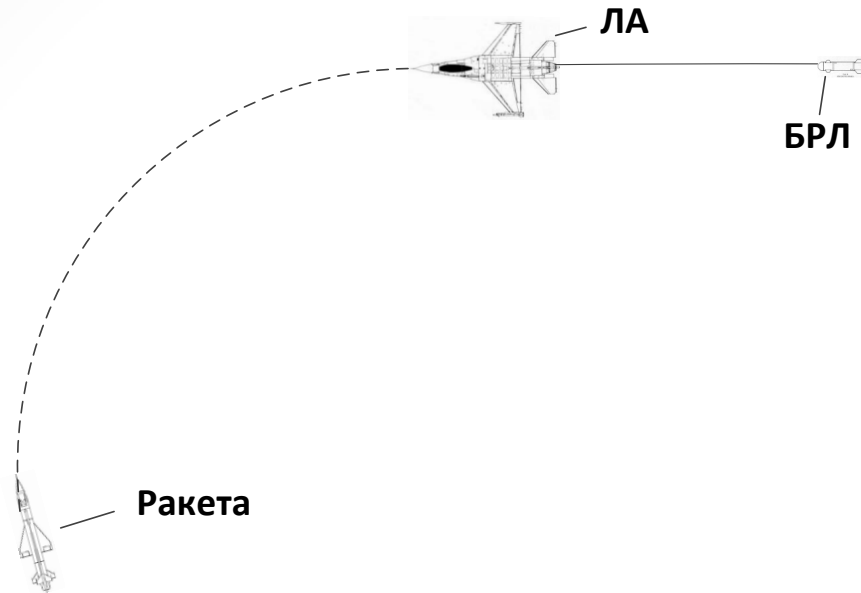
Во время испытаний Sky Buzzer буксировалась на скоростях вплоть до  $M=1,4$  и перегрузкой до  $5g$ .

# 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.

# Внешний вид используемой математическая модель ЗУР

Моделирование процессов наведения ракеты

Вариант: Ввод данных, Выполнить, Результаты, Справка, Пакетный режим

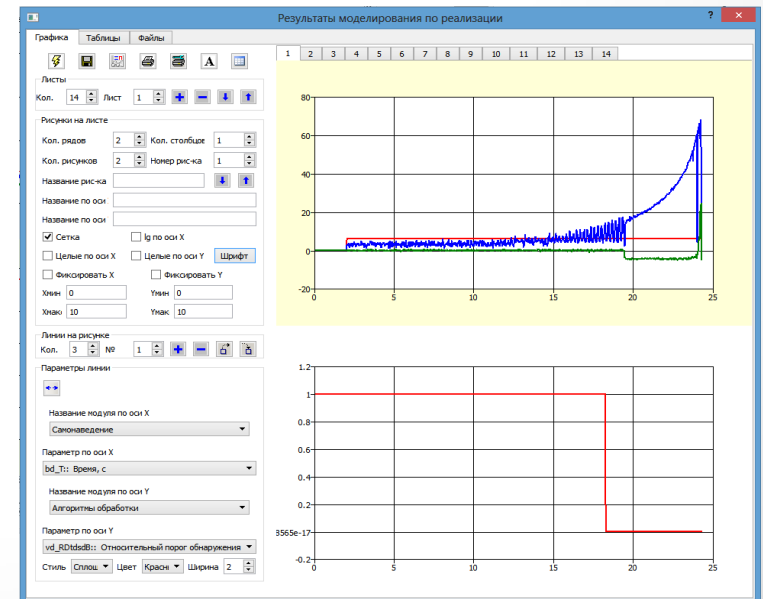
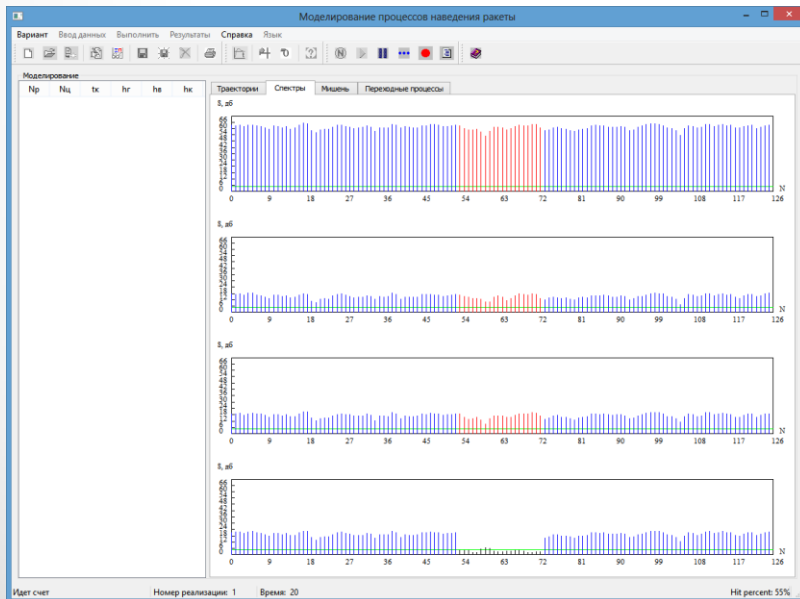
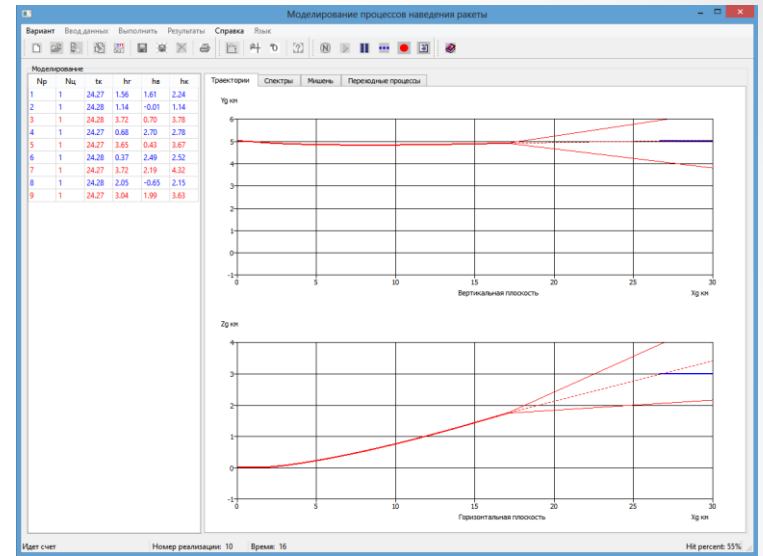
Буксованная логика, 200h.xml

- Самонаведение
  - РЛМ
  - Алгоритмы ПЗ
- РАКЕТА
  - РАКАП
    - Модель движения РМ
  - ВИНС
    - Датчики
    - Алгоритмы ориентации и навиг...
  - Бортовая СУ
    - Автопилот/Авионика
    - Алгоритмы СУ
  - АРГС
    - Обтекатель
    - Антенна
    - Приемник
    - Приемод антенны
    - Алгоритмы обработки
  - Цель
    - Аэродинамическая цель
    - Радиопортрет цели
    - Финал

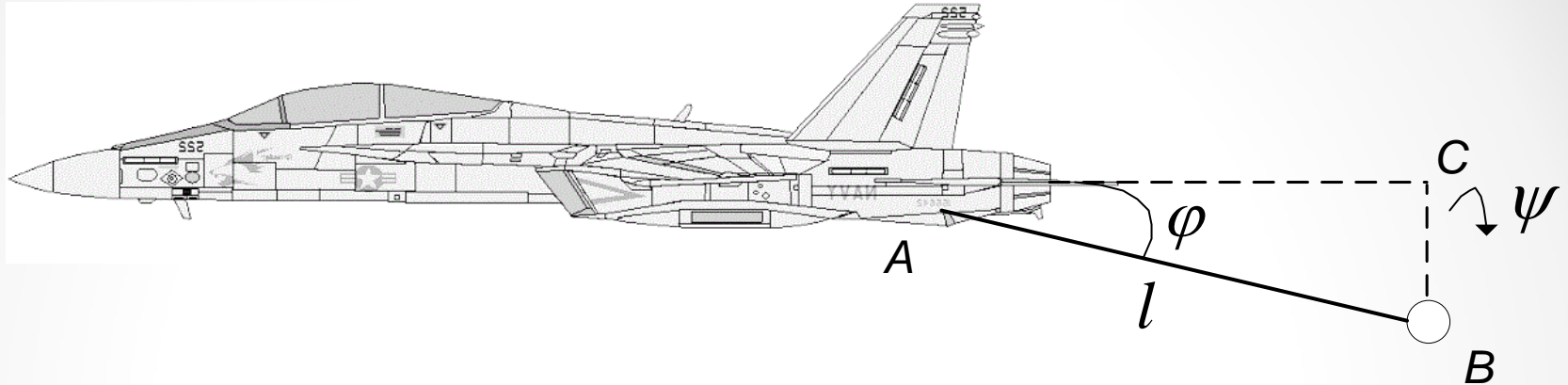
Значения параметров объекта		Регистрируемые величины в реализации		Регистрируемые величины в ст...	
SKO единичный дальности, м	4.5	4.5			
SKO единичный скорости, м/с	0.5	0.5			
SKO единичный угла места, рад	0.001	0.001			
SKO единичный пеленга, рад	0.001	0.001			
Период обзора РЛМ, с	0.1	0.1			
Признак включения ЛРК	1	1			
Такт передачи данных по ЛРК, с	0.25	0.25			

Все по умолчанию    Диалог

R/LM



# Математическая модель БРЛ



Основные параметры БРЛ, задаваемые через графический интерфейс:

- $l$  – длина троса
- $\varphi$  - угол отклонения троса от оси движения ЛА
- $\psi$  - 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

$\xi_R, \xi_I$  - 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

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

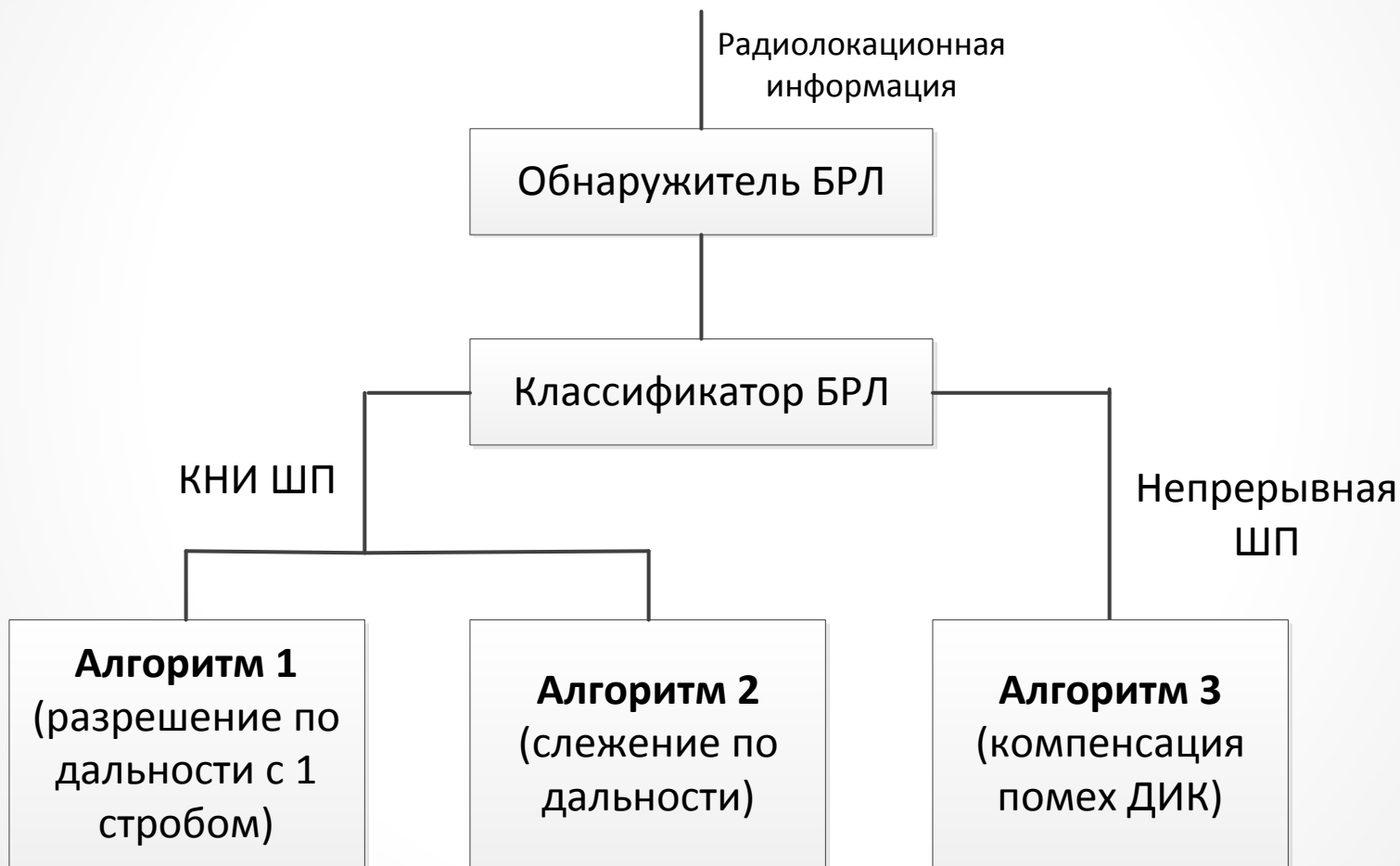
- $PD_{NJ}$  - спектральная плотность помехи на выходе антенного тракта передатчика активных помех
- $\Delta F_{RC}$  - полоса пропускания приемника АРГС
- $G_A$  - коэффициент усиления антенны АРГС
- $L_F$  - коэффициент потерь в приемнике
- $L_{RDM}$  - коэффициент потерь в обтекателе
- $F_A[n]$  - диаграмма направленности n-ого канала
- $\lambda$  - длина волны
- $D$  - дальность от ракеты до буксируемой ловушки
- $T_{SLEN}[n]$  - длина строба 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
- $D_{II} = D_{JA} + l + D$  - полный путь, пройденный сигналом КНИ
- $D_{JA}$  - дальность от ракеты до цели

# 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: передняя полусфера,
- Априорная информация о наличии БРЛ: нет,
- Тип помехи БРЛ: непрерывная/квазинепрерывная шумовая.

# 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.

$\mu$  - пеленгационная характеристика антенны РГС,

**Коэффициенты компенсации:**

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

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

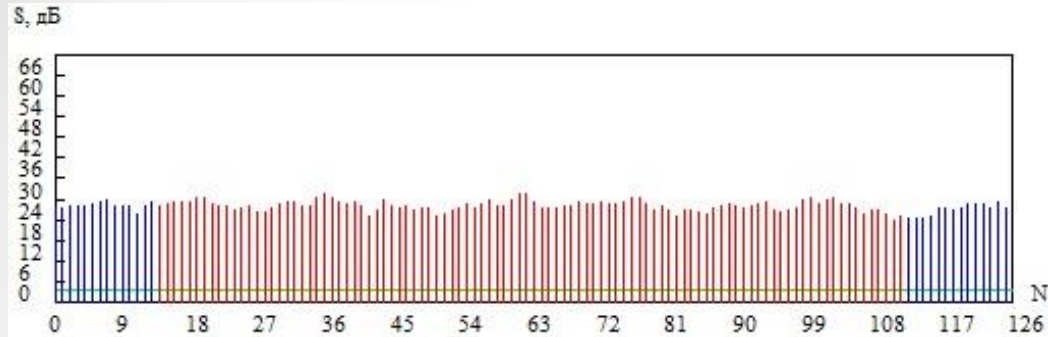
**Образование новых разностных каналов:**

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

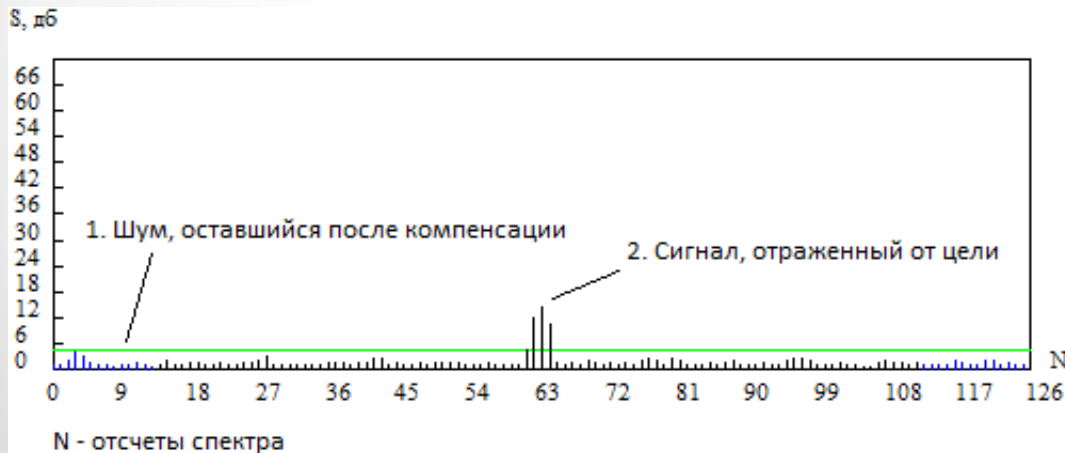
$$U'_Z = U_Z - k_Z U_{\Sigma} = \mu A_1 G_0 (\varepsilon_{Z1} - \varepsilon_{Z2}),$$

# Обнаружение БРЛ

Спектр *исходного* разностного канала



Спектр *образованного* разностного канала



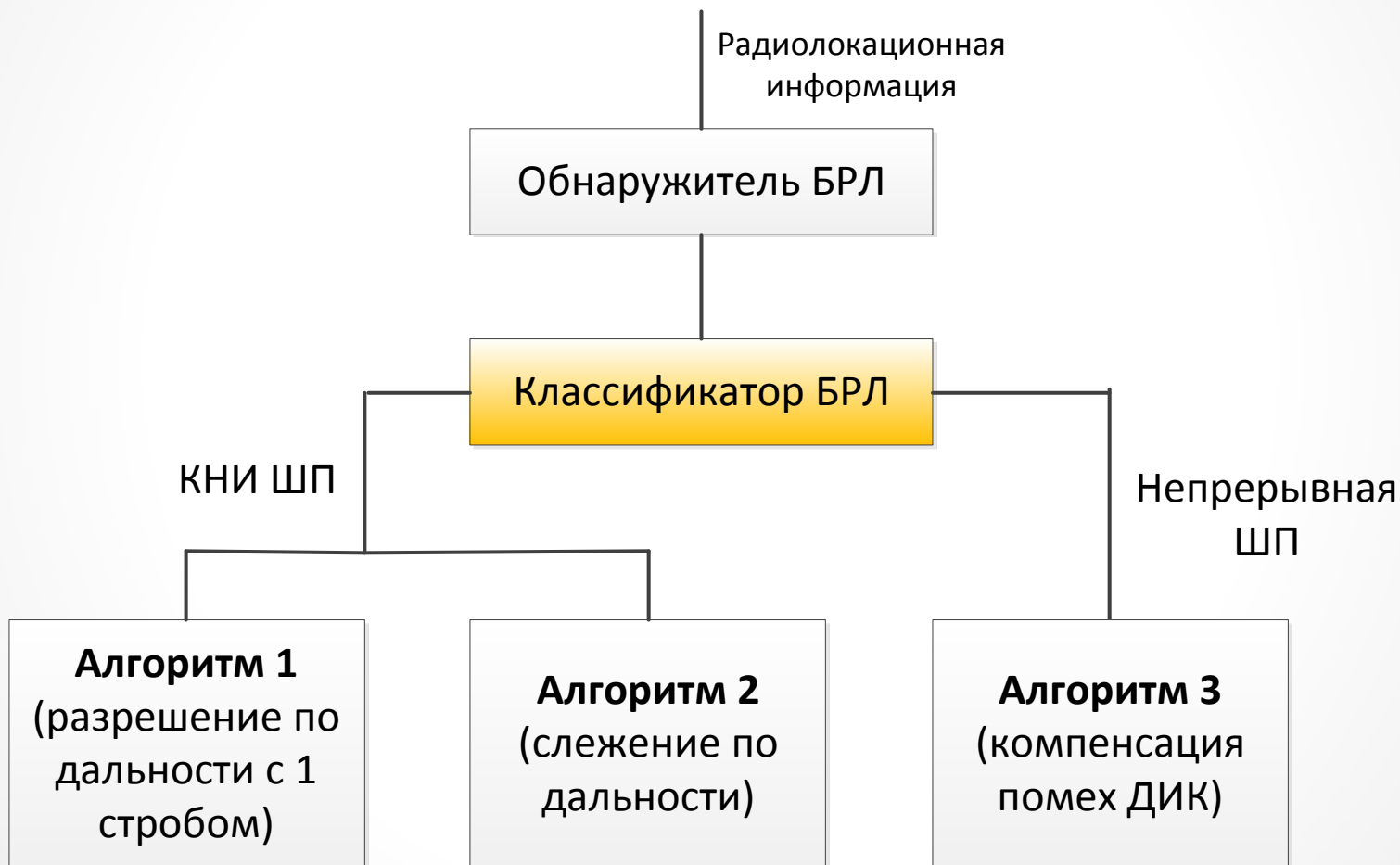
Дальность обнаружения  
БРЛ

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

где  $P_t$  - мощность РЛС,  
 $G_t$  - коэффициент усиления антенны,  
 $\lambda$  - длина волны,  
 $\sigma$  - 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

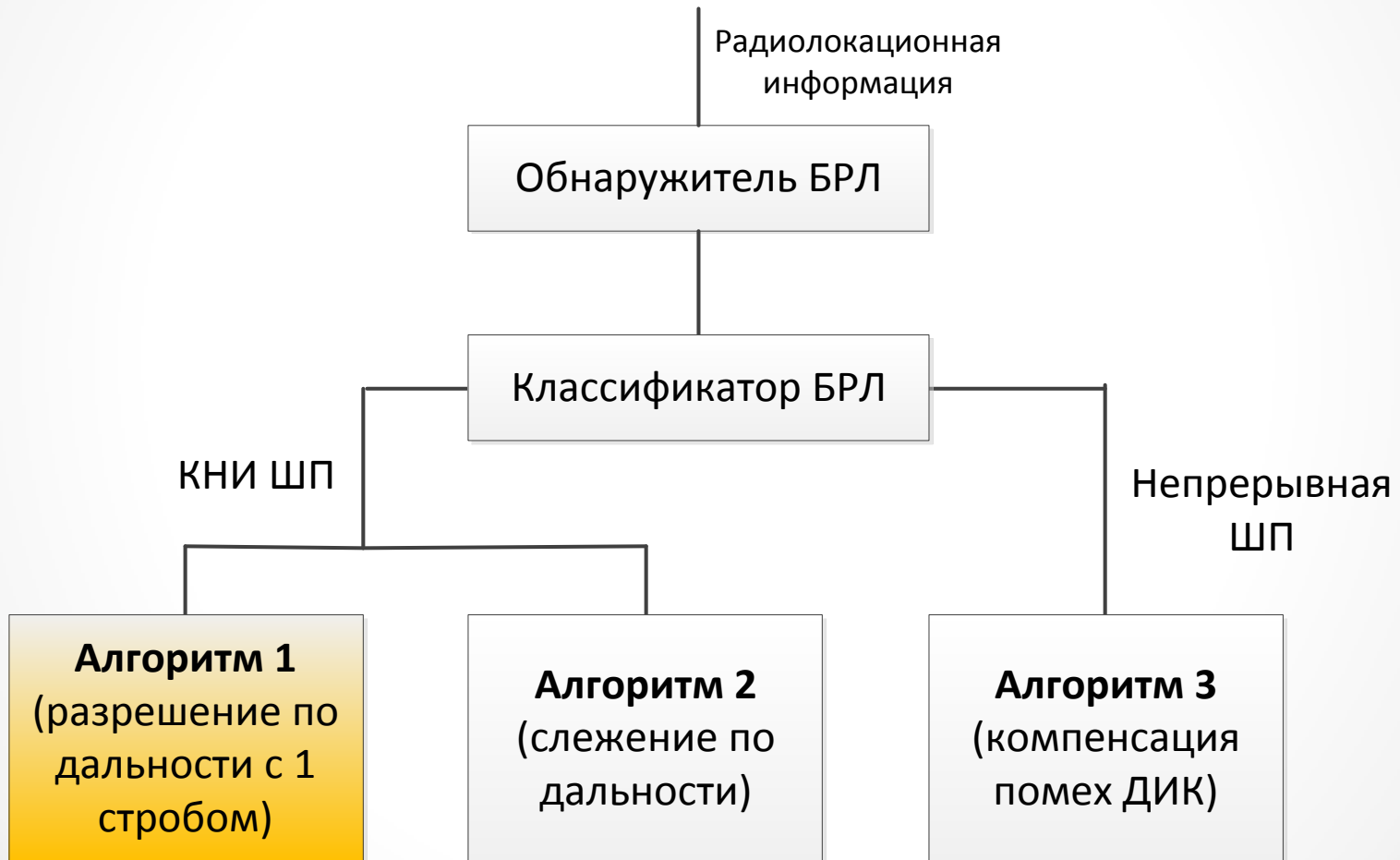
$V_{\text{сбл}}$  - скорость сближения ракеты и цели

$c$  - скорость света

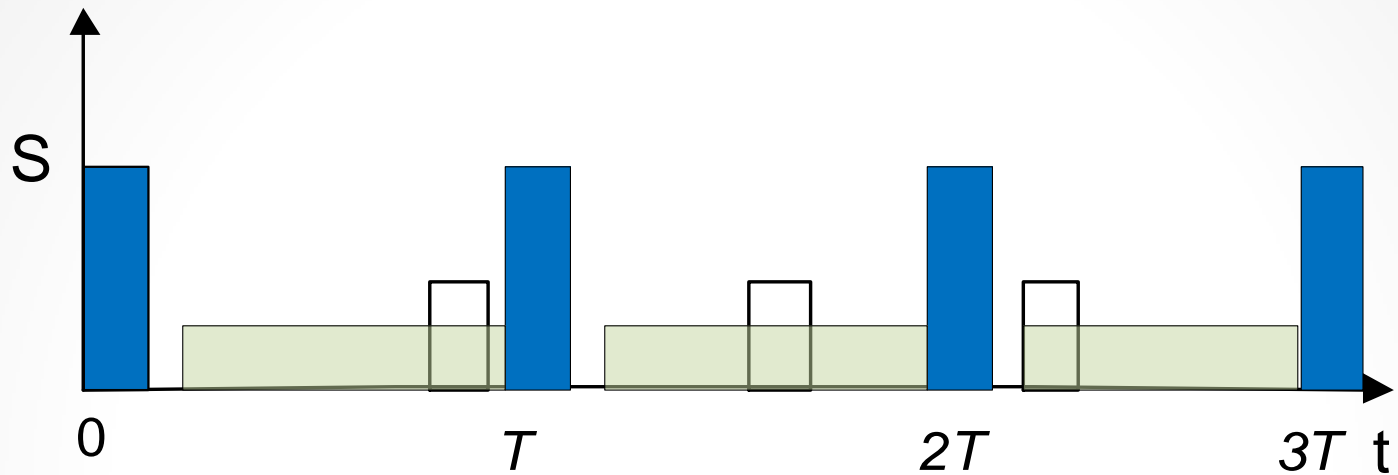
Окончательная классификация

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 АРГС



- зондирующий импульс;

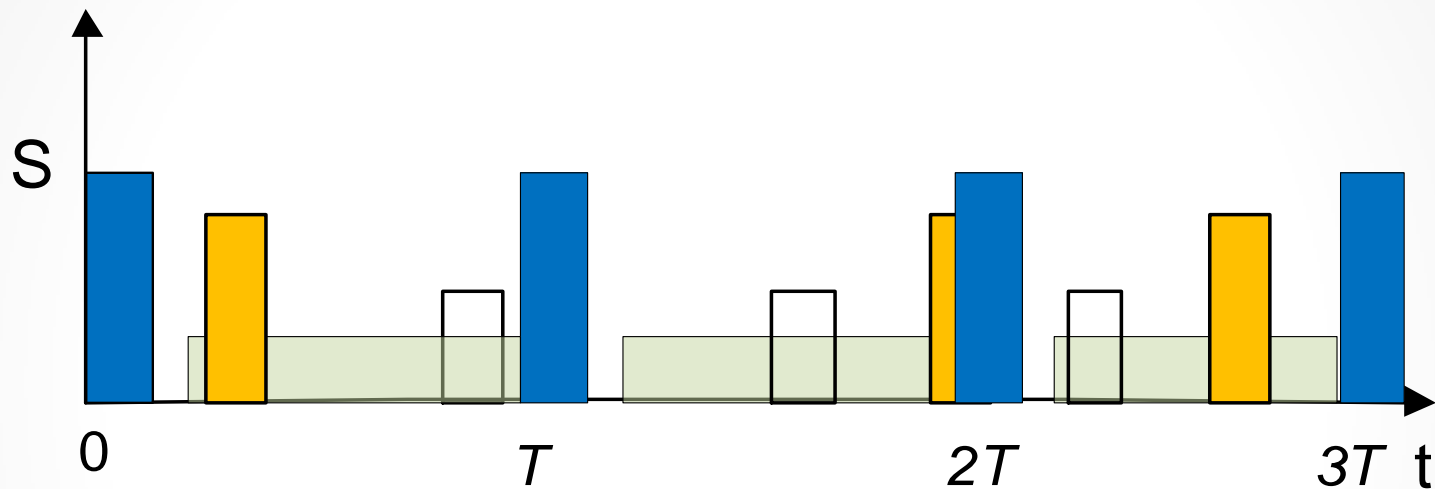


- отраженный от цели импульс,  
вернувшийся в приемник;



- строб приемника

# Цикл работы антенны АРГС в случае применения БРЛ



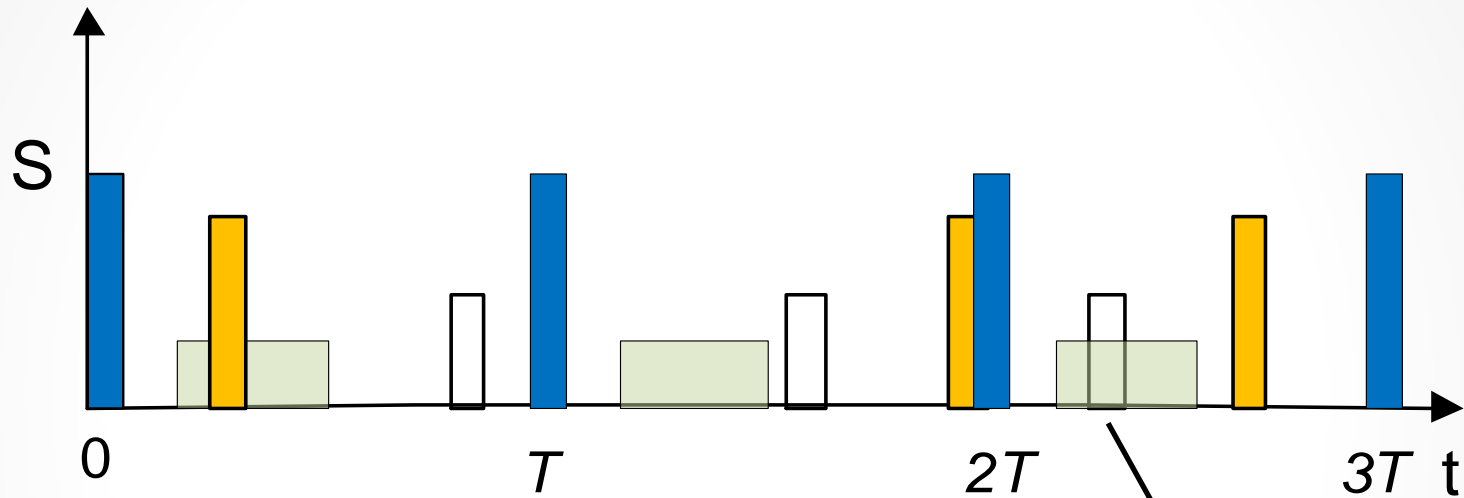
 - зондирующий импульс;

 - 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

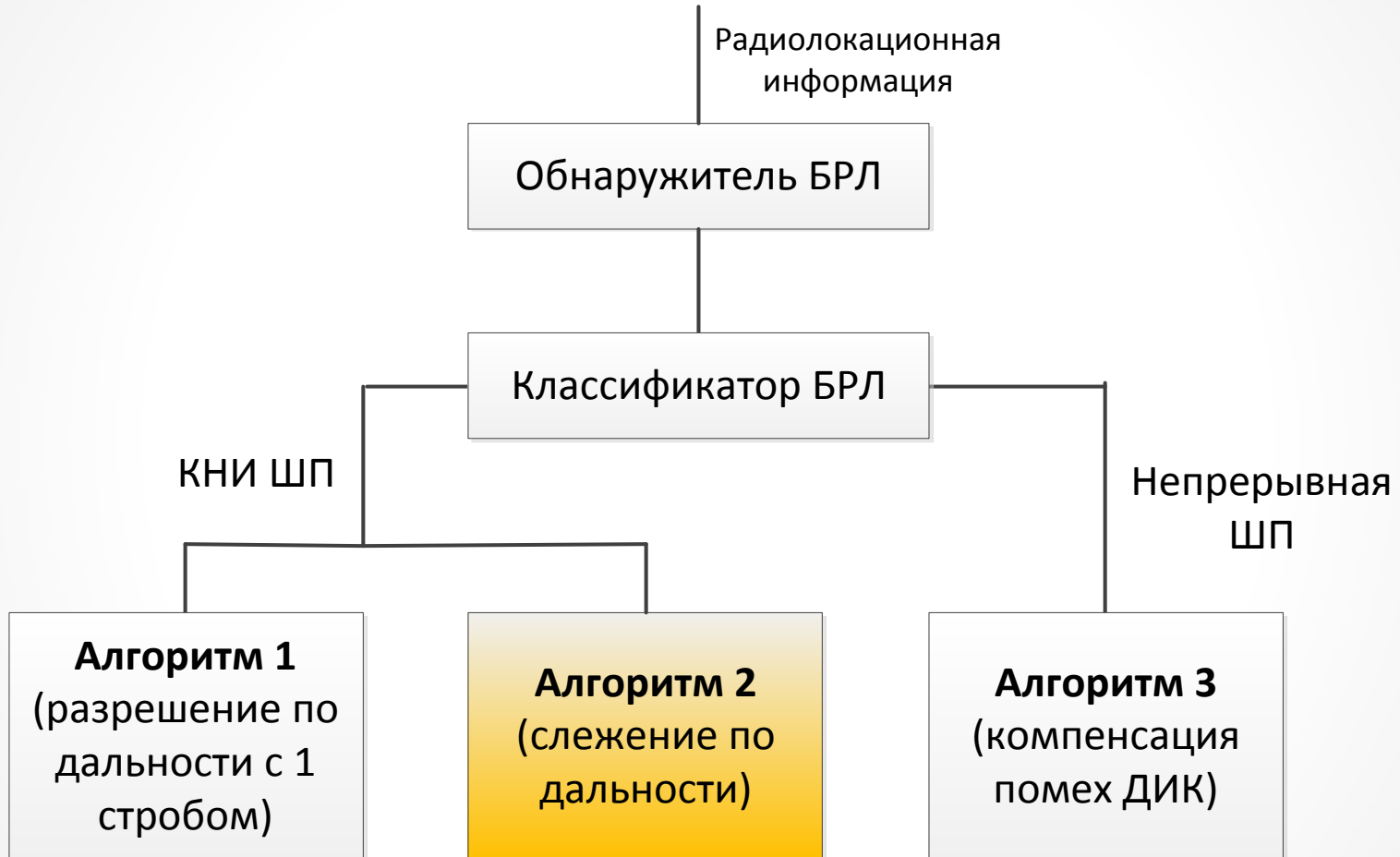
 - сигнал от БРЛ

Угловые измерения цели  
могут быть извлечены



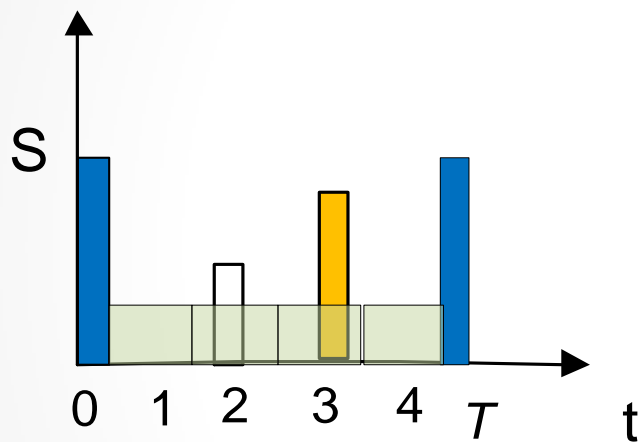
# Алгоритм 2

## Слежение по дальности

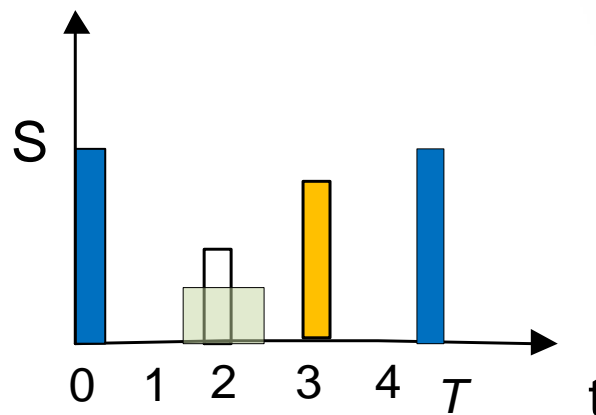






# Алгоритм 2. слежение по дальности

## Поиск по дальности



## Слежение по дальности



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

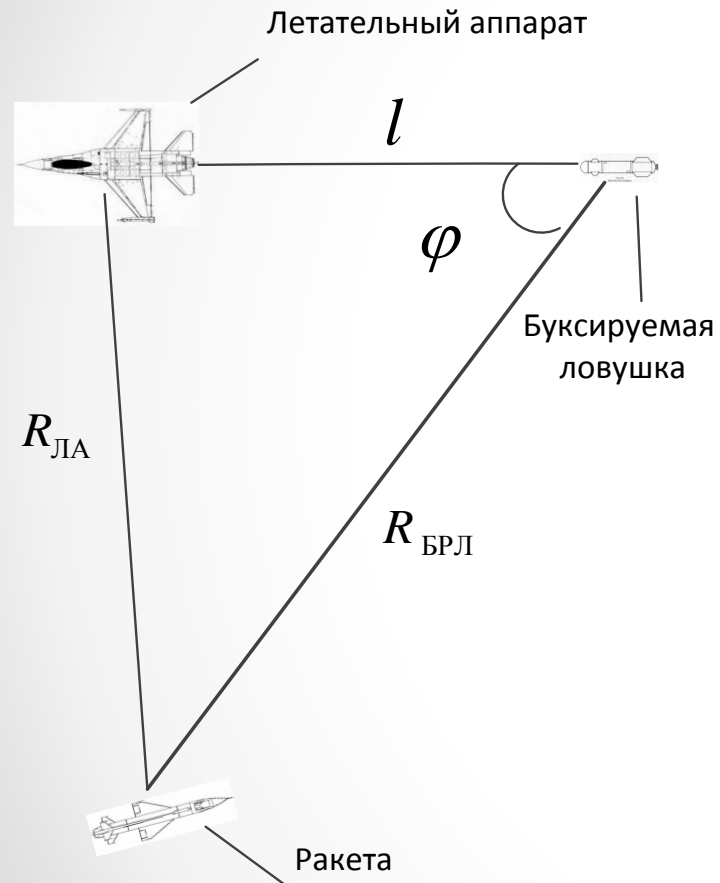
# Алгоритм 3. Компенсация помехи ДИК



# Алгоритм 3. Компенсация помехи ДИК

- Этап 1:
  - Наведение в упрежденную точку,
  - Компенсация помех дополнительным информационным каналом,
  - Выбор оптимального направления антенны.
- Этап 2:
  - Наведение ракеты производится по угловым измерениям, полученным после компенсации помех дополнительным информационным каналом.

# Первый этап. 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.

# Первый этап. 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  $U_\partial$  - исходный дополнительный канал РГС,

$U'_\partial$  - новый дополнительный канал РГС,

$k_1, k_2, k_3$  - комплексные коэффициенты.

2) Компенсация основных каналов РГС:

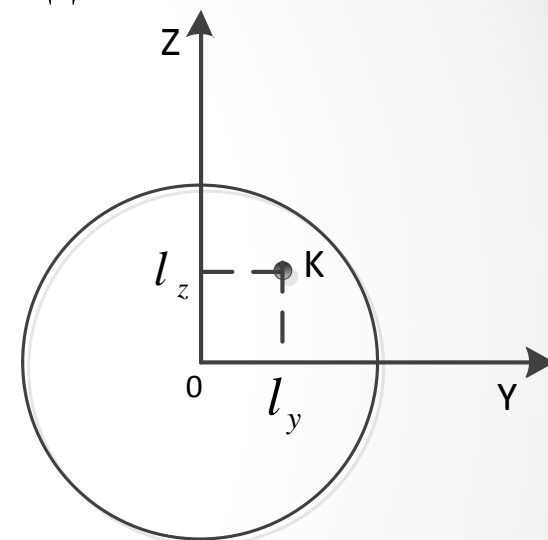
$$U'_\Sigma = U_\Sigma - k_\Sigma U_c,$$

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

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

где  $U'_\Sigma, U'_Y, U'_Z$  - скомпенсированные основные каналы,

$k_\Sigma, k_Y, k_Z$  - коэффициенты компенсации.

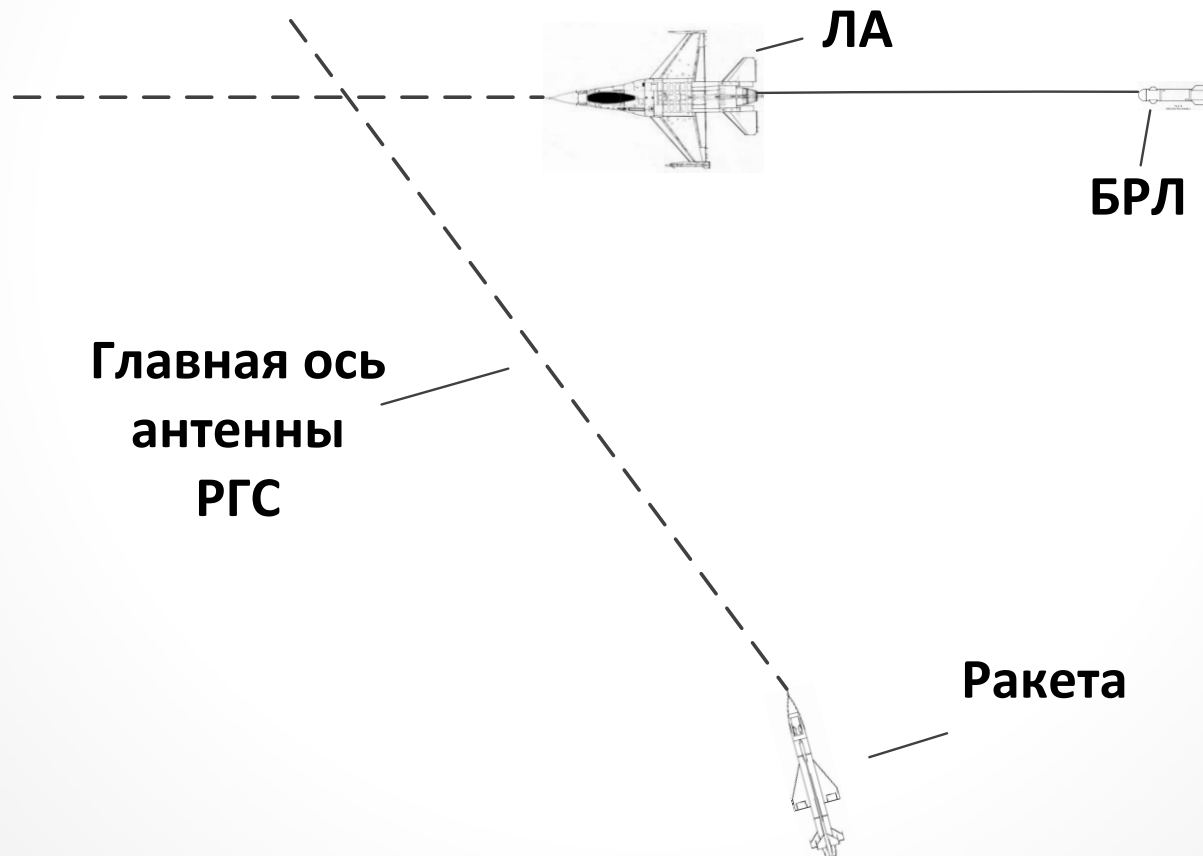


К – дополнительная (компенсационная) антенна;



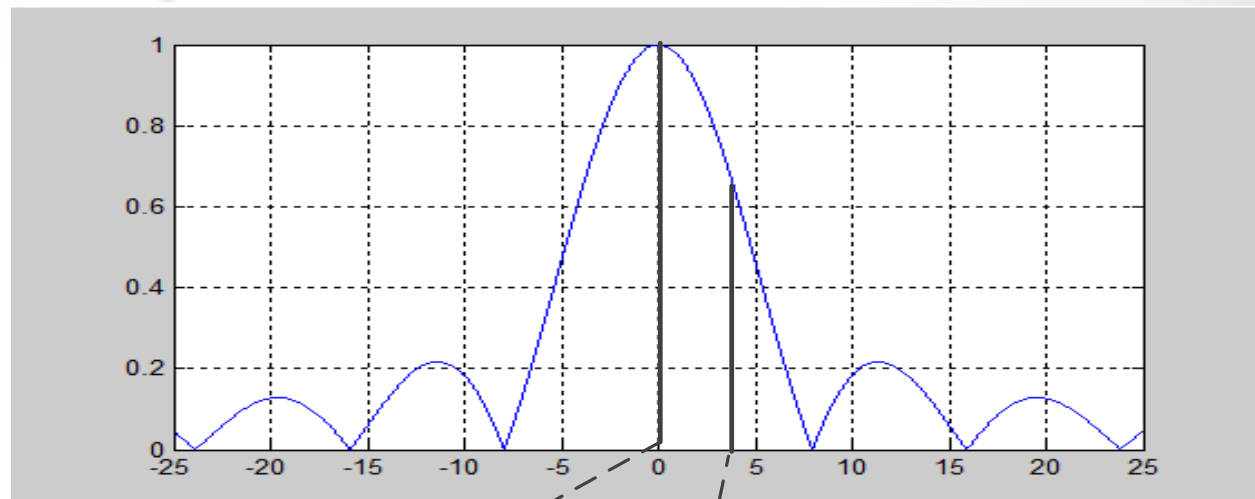
# Первый этап. Выбор оптимального направления антенны

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



# Первый этап. Выбор оптимального направления антенны

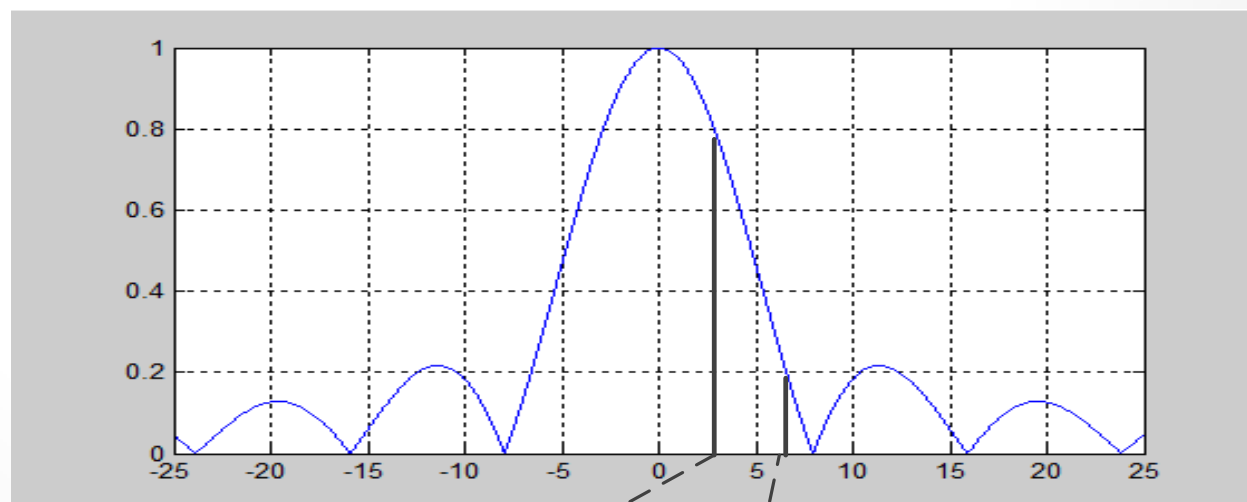
Антенна  
смотрит на ЛА



Коэффициент ДНА  
на полезный сигнал

Коэффициент  
ДНА на помеху

Антенна  
смотрит в  
упрежденную точку



Коэффициент ДНА  
на полезный сигнал

Коэффициент  
ДНА на помеху

## Второй этап. Заключительный

На втором этапе наведение начинает осуществляться по угловым измерениям, полученным РГС в результате компенсации помех дополнительным информационным каналом.

Антенна РГС по-прежнему направлена в точку, находящуюся перед целью.

Задачей предыдущего этапа является минимизация мгновенного промаха к моменту начала второго этапа противодействия.

# Начальные условия моделирования

Параметр	Значение
Скорость ЛА	200-700 м/с
Длина буксировочного троса	50-200м
Тип помехи, применяемой ловушкой	Непрерывная или импульсная шумовая помеха
Радиопортрет цели	Одноточечная модель с ЭПР = $3\text{м}^2$ , многоточечная модель F-16
Ракурс подлета к цели	В пределах передней полусферы
Время встречи с целью	8-15с

# Результаты моделирования

## Противодействие БРЛ с импульсной ШП

	Алгоритм 1	Алгоритм 2
Доля полученных измерений	17%	100%
Вероятность поражения ЛА*	83%	98.5%

## Противодействие БРЛ с непрерывной ШП (Алгоритм 3)

Вероятность поражения одноточечной цели с ЭПР = 3м<sup>2</sup> - 90%

Вероятность поражения многоточечной цели F-16 на встречных ракурсах - 45%

Вероятность поражения многоточечной цели F-16 на боковых ракурсах – 85%

\*Под поражением понимается попадание в 5-метровую трубку промаха

# 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
- Проверка на подробной математической модели

# Итог. Проблемы при подготовке диссертации

- Малое количество обзорной информации
- Отсутствие реальных алгоритмов формирования помех БРЛ
- Отсутствие исчерпывающего математического обоснования разработанных алгоритмов

# Прогресс подготовки диссертации

- По тематике исследования написано 7 статей (из них 2 ВАК).
- Проведено выступление на пяти конференциях
- Сдано 2 кандидатских минимума
- Написано 2 главы диссертации



# Планируется сделать

- Доработать алгоритм, повысив его эффективность на встречах курсах
- Провести более детальную проверку его эффективности
- Попытаться математически доказать эффективность предлагаемых методов
- Дописать диссертацию