

7 Радионавигационные системы

Бортовые радионавигационные системы:

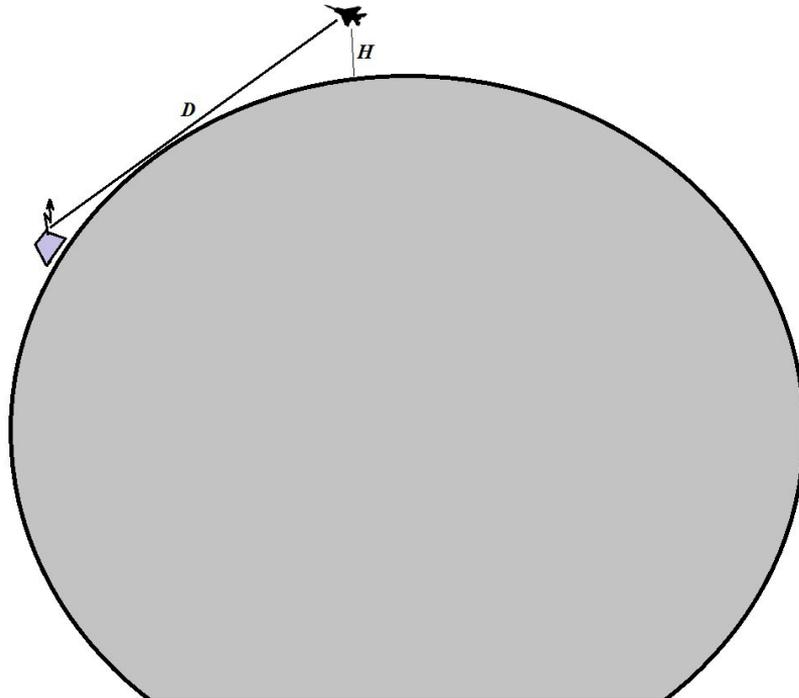
- радиотехнические системы ближней навигации (РСБН);**
- комплексная радионавигационная система, включающая в себя всенаправленный азимутальный радиомаяк (VOR) и всенаправленный дальномерный маяк (DME);**
- автоматический радиокompас (АРК);**
- курсо-глиссадные системы или инструментальные системы захода на посадку (ILS, ПРМГ);**
- радиотехнические системы дальней навигации (РСДН);**
- радиовысотомеры малых и больших высот (РВ);**
- доплеровские измерители скорости и угла сноса (ДИСС).**

Радиосистемы ближней навигации

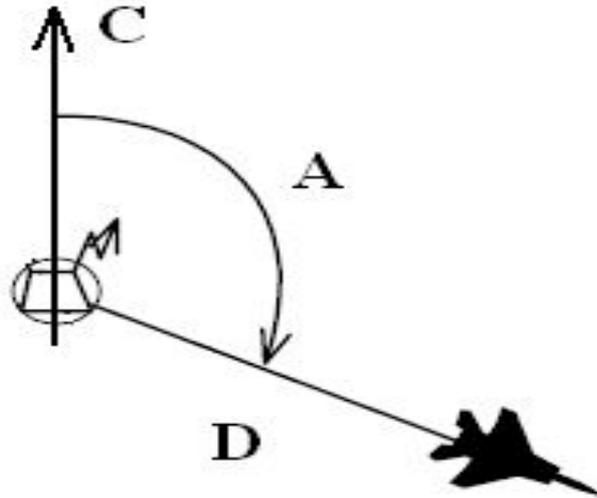


Назначение радиосистем ближней навигации –

определение местоположения самолета на расстояниях до 400 километров от радионавигационных точек. Основаны на угломерных и дальномерных измерениях.



Назначение радиосистем ближней навигации



Определение азимута ЛА относительно радиомаяка.

Определение наклонной дальности от ЛА до радиомаяка.

Определение местоположения самолета по азимуту и наклонной дальности – пересечение линии равных азимутов (прямая) и линии равных дальностей (окружность).

Навигационные параметры:

$$D = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2} \quad A = \arctg(z/x), \text{ при } 0 < x, \quad 0 < z$$

Здесь

Ox – ось координат, направленная на север

Oy – ось координат, направленная вверх

Oz – ось координат, направленная на восток

Радиосистемы ближней навигации

Отечественная система РСБН – определение местоположения самолета, привод самолета в заданную точку в пределах зоны действия системы, наземное наблюдение воздушной обстановки.

VOR/DME (VHF Omnidirectional Radiobeacon/Distance Measuring Equipment) – определение местоположения самолета, привод самолета в заданную точку в пределах зоны действия системы. Стандартное средство ближней навигации на зарубежных воздушных линиях. Азимутальный (VOR) и дальномерный (DME) радиомаяки используются и как самостоятельные средства навигации, образуя соответственно угломерные или дальномерные системы.

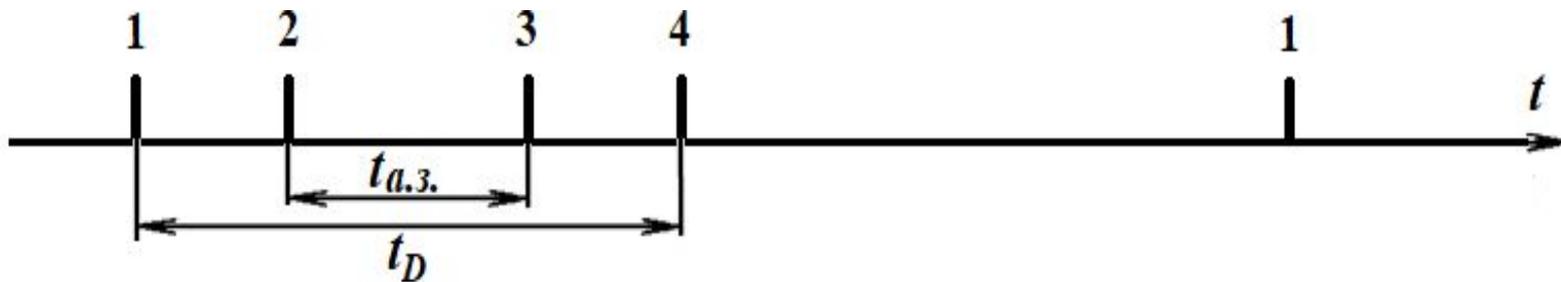
Радиосистема РСБН



Радиосистема VOR/DME



Принцип действия дальномерного канала РСБН



1 – запрос дальности, 2 – прием запроса дальности, 3 – ответ дальности,
4 – прием ответа дальности, $t_{a.з.}$ – аппаратная задержка сигнала в радиомаяке,

t_D – измеряемое время.

$$D = \frac{t_D - t_{a.з.}}{2} c$$

Принцип действия азимутального канала РСБН

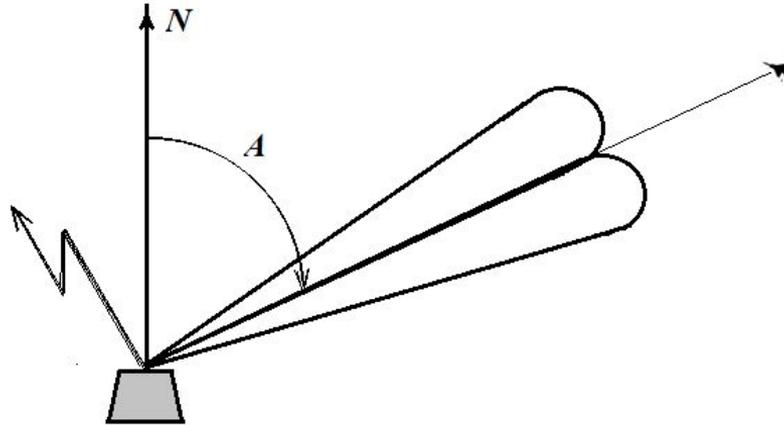
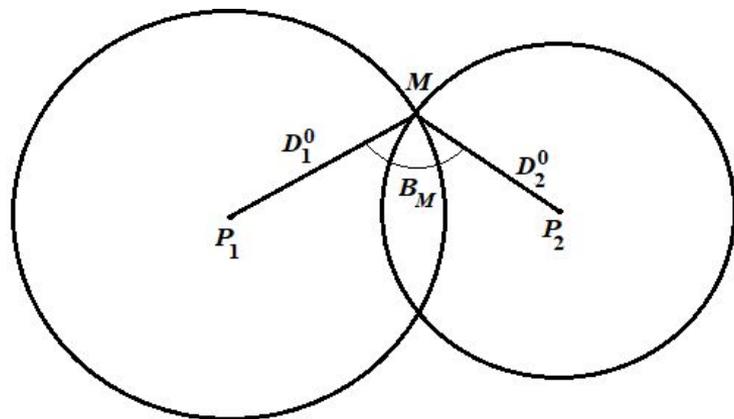


Диаграмма направленности азимутальной антенны в горизонтальной плоскости

Определение координат по нескольким дальностям DME

$$(x - x_{mi})^2 + (y - y_{mi})^2 + (z - z_{mi})^2 = D_i^2, \quad i = 1, \dots, N.$$



$$\sigma_{\Delta R} = \sqrt{2} \frac{\sigma_{\Delta D}}{\sin B_M}$$

Определение местоположения по двум дальностям

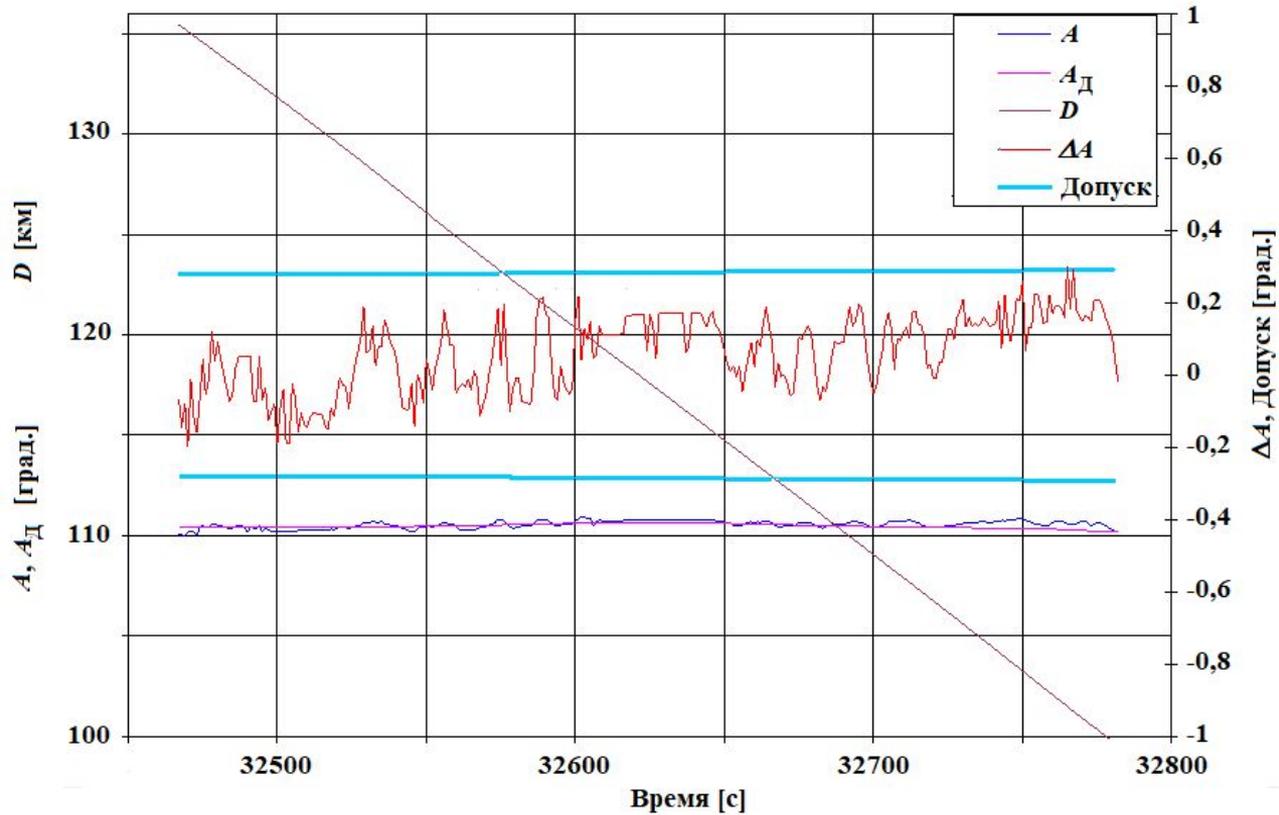
Основные причины погрешностей радиосистем ближней навигации

1. Помехи, поступающие на вход бортового приемника Случайные погрешности, вызванные внешними помехами.

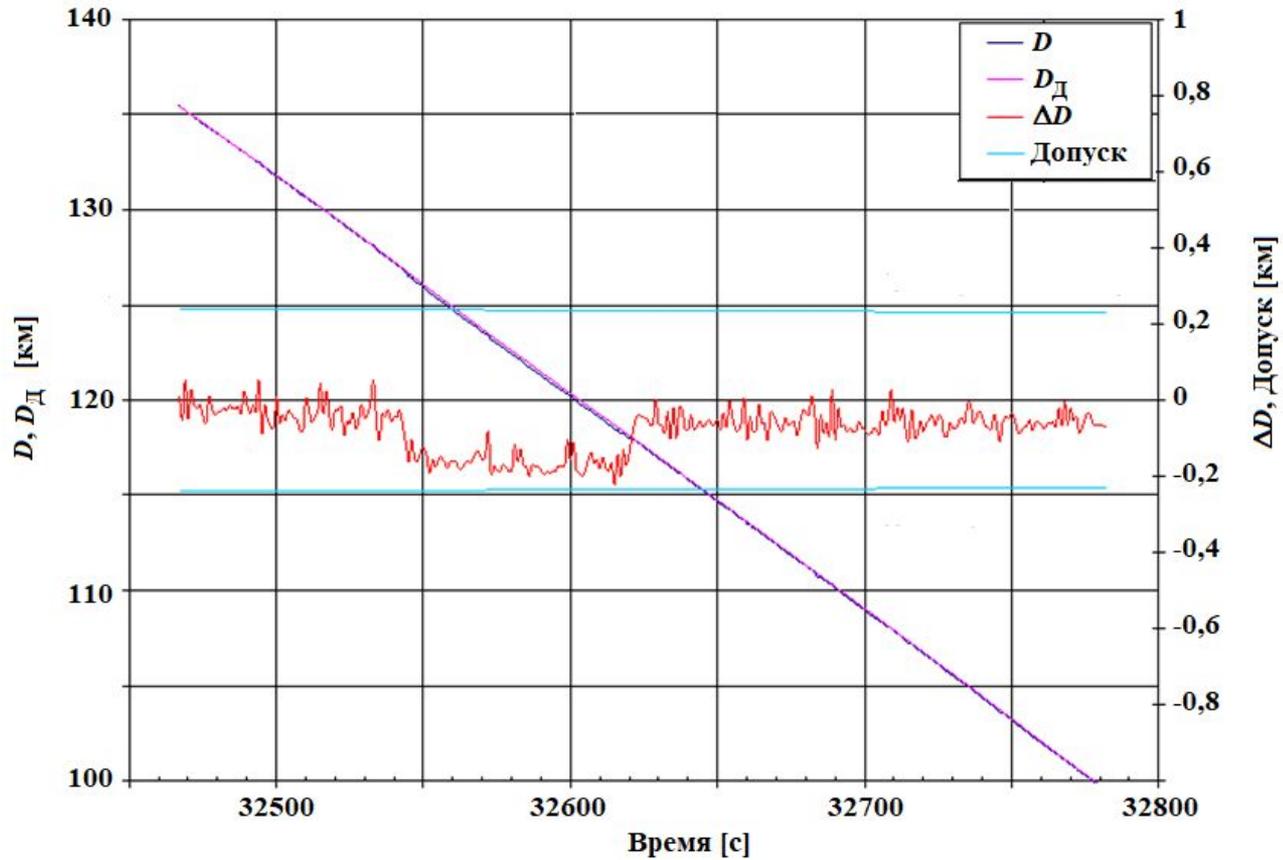
2. Погрешности, вызванные дестабилизирующими факторами Отражения радиосигналов от местных объектов, попадающих одновременно с самолетом в пределы области диаграммы направленности азимутального канала. Изменение принимаемого сигнала при отражении от земной поверхности.

3. Аппаратурные погрешности измерителя времени Наибольшее влияние оказывают на точность определения дальности.

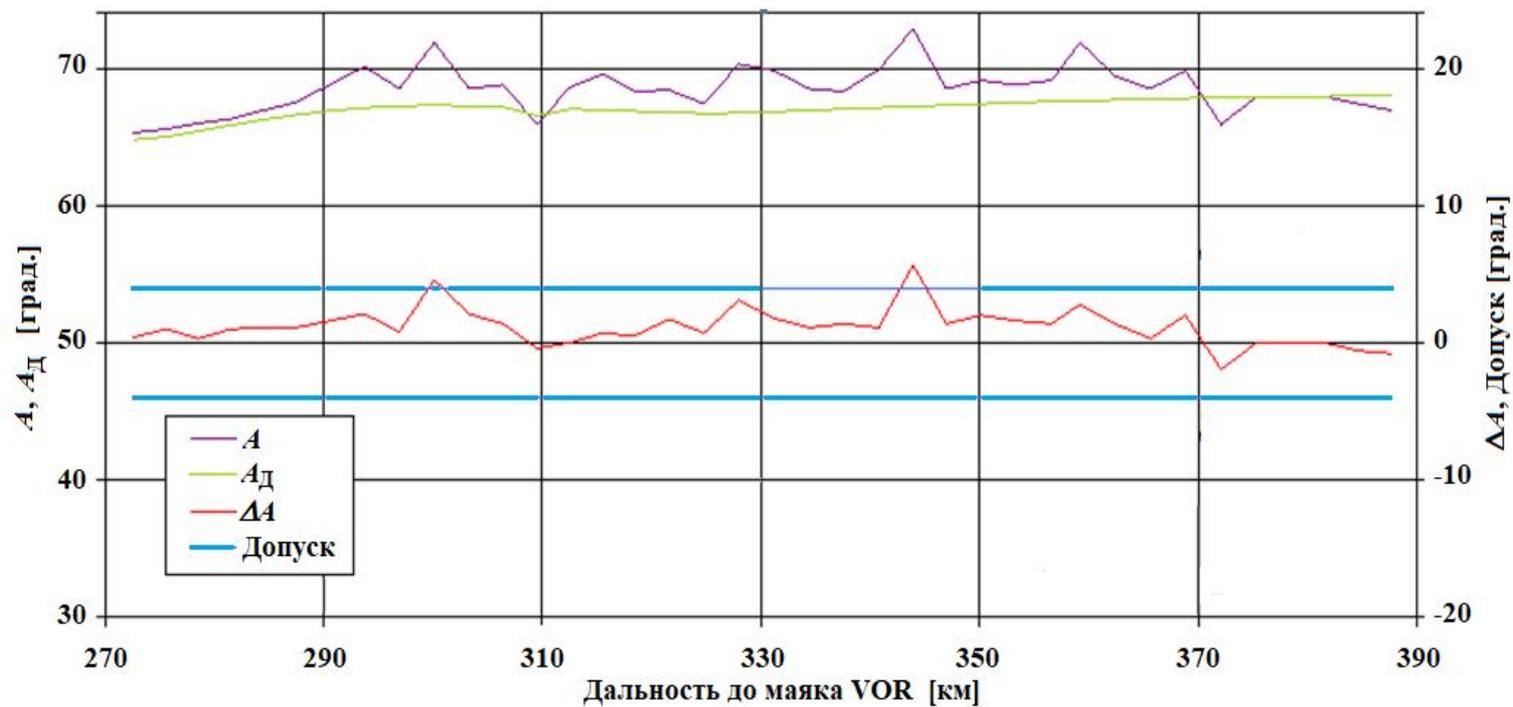
Оценивание РСБН в летных испытаниях



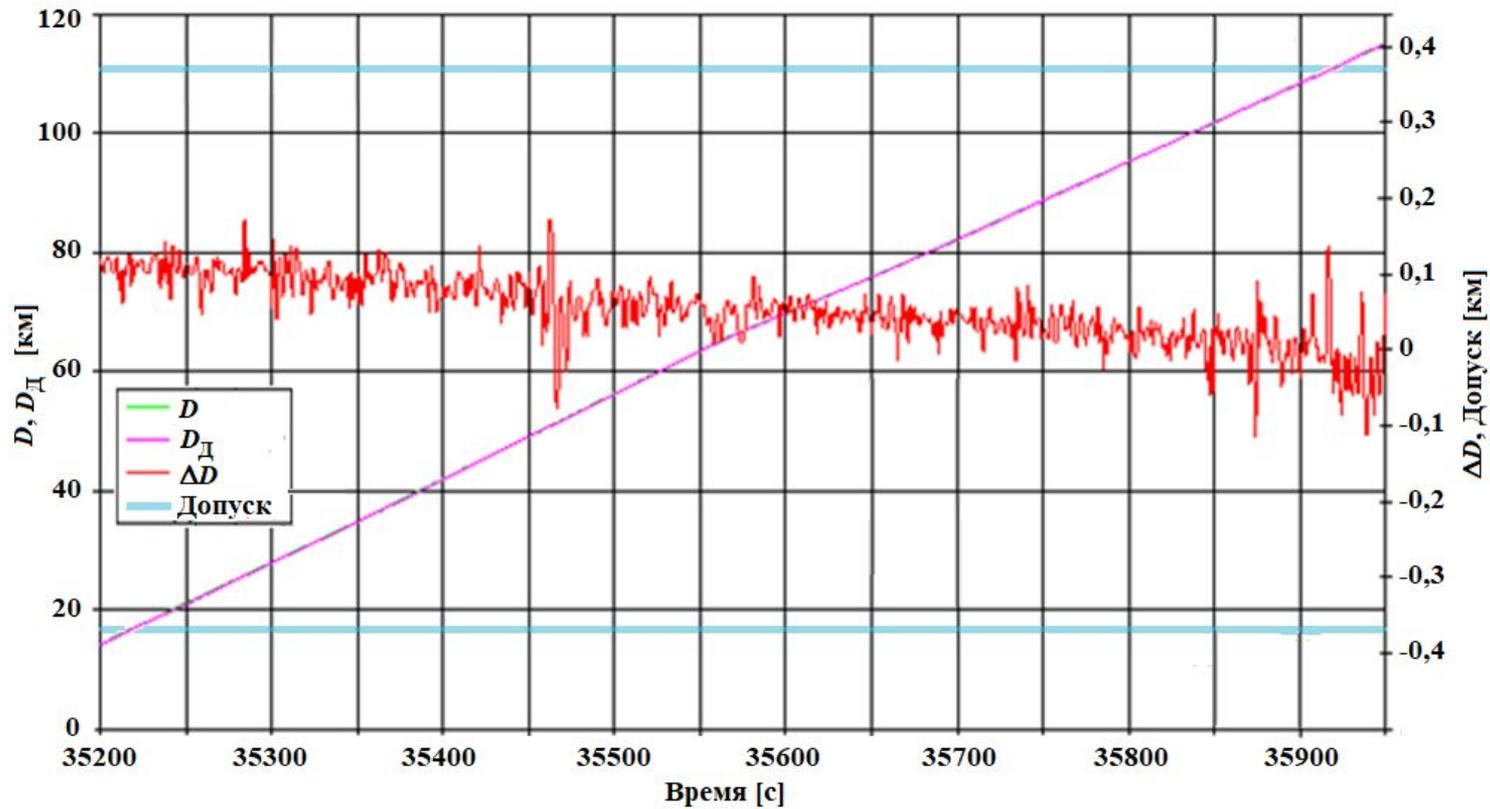
Пример оценивания погрешности ΔA азимута РСБН



Пример оценивания погрешности ΔD дальности РСБН



Пример оценивания погрешности ΔA азимута VOR

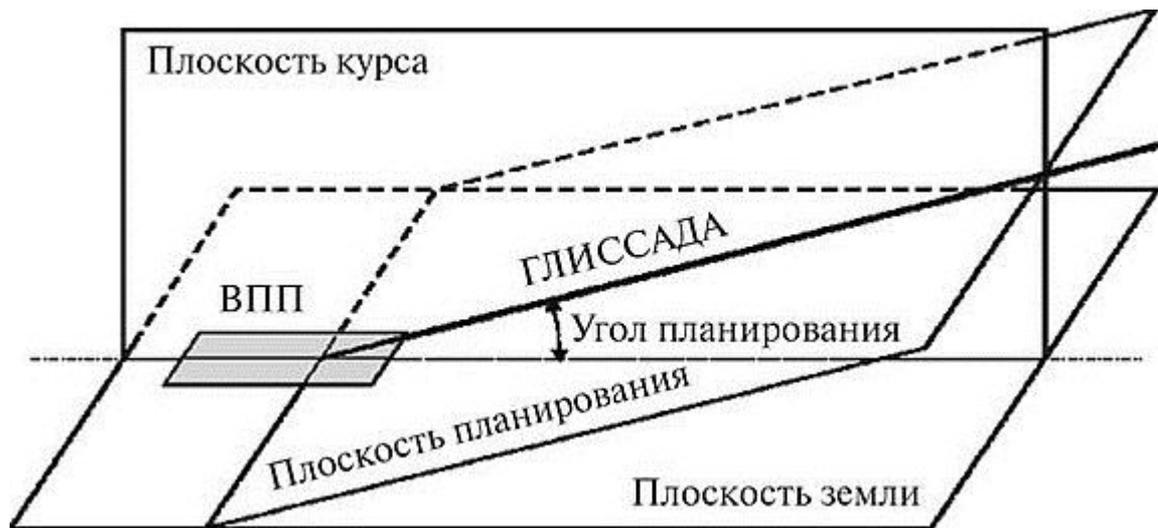


Пример оценивания погрешности ΔD дальности DME

Радиотехнические системы посадки

Назначение радиосистемы посадки –

определение отклонений от заданной траектории посадки. Угломерные каналы системы основаны на амплитудных или временных измерениях.



Типы радиомаячных систем посадки

- Метрового диапазона ILS (Instrument Landing System),
- Метрового диапазона СП-50
- Дециметрового диапазона ПРМГ (посадочная радиомаячная группа)
- Сантиметрового диапазона MLS (Microwave Landing System)

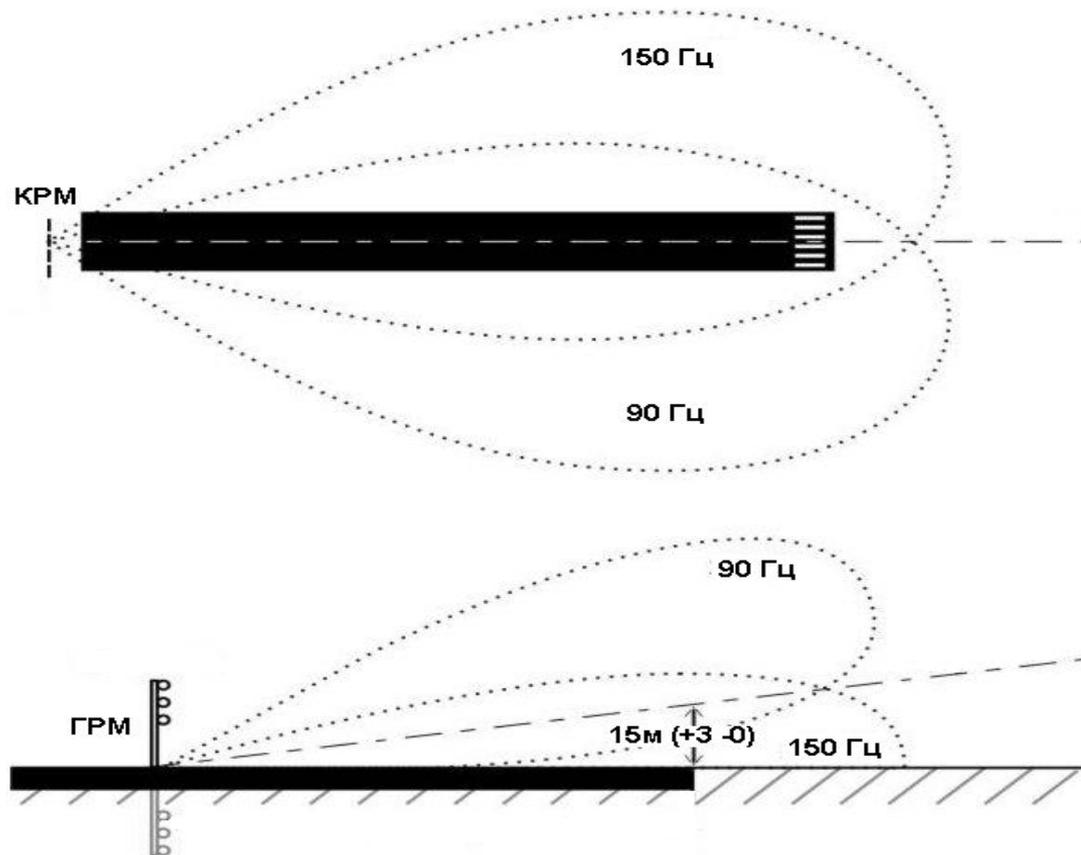
Курсовой радиомаяк ILS



Глиссадный радиомаяк ILS



Схема функционирования курсового и глиссадного радиомаяков ILS



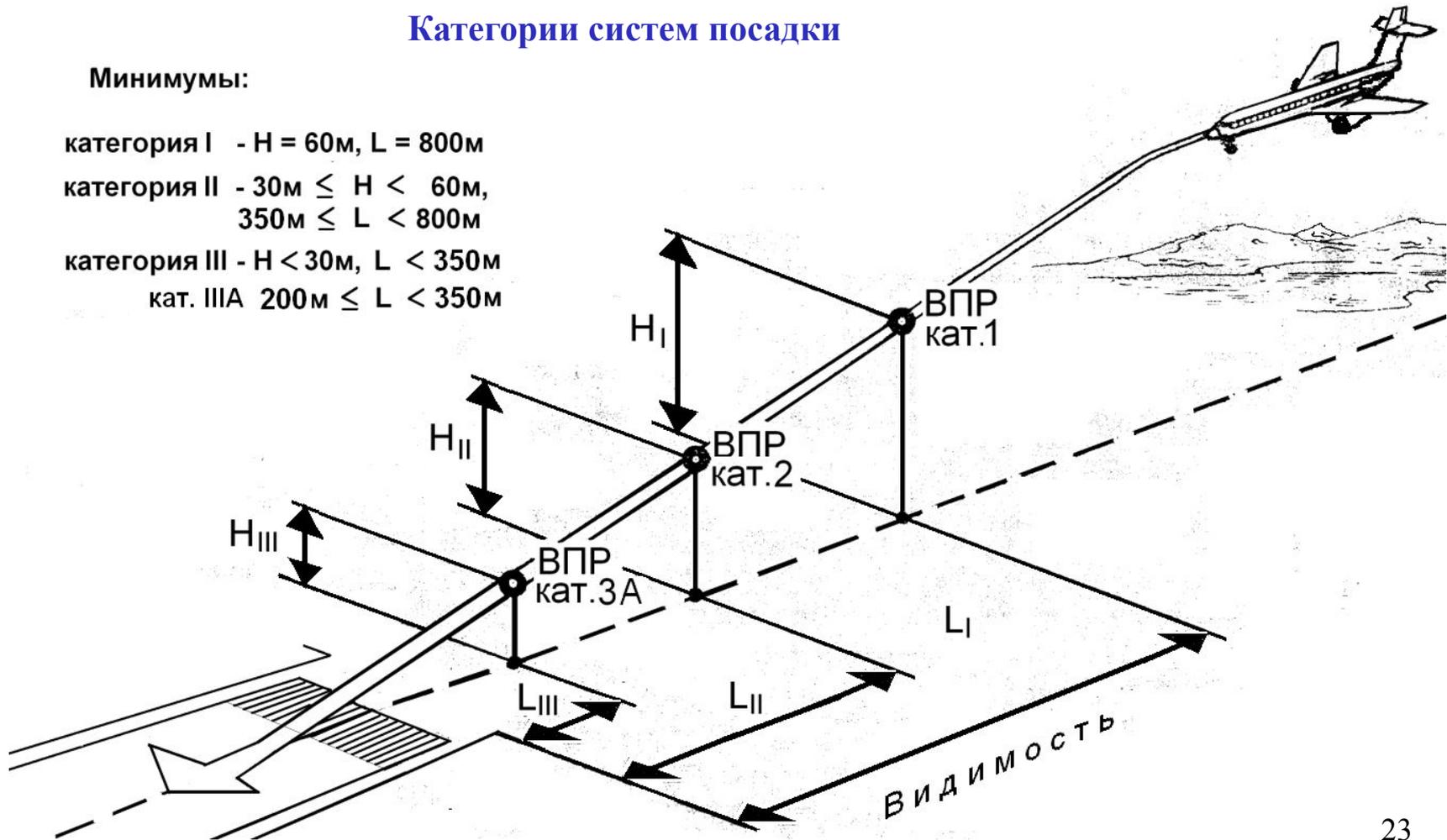
Категории систем посадки

Минимумы:

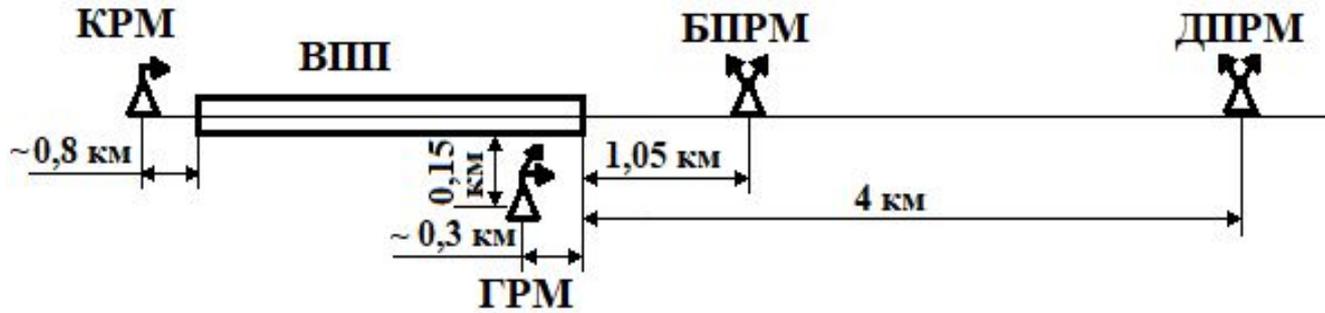
категория I - $H = 60\text{м}$, $L = 800\text{м}$

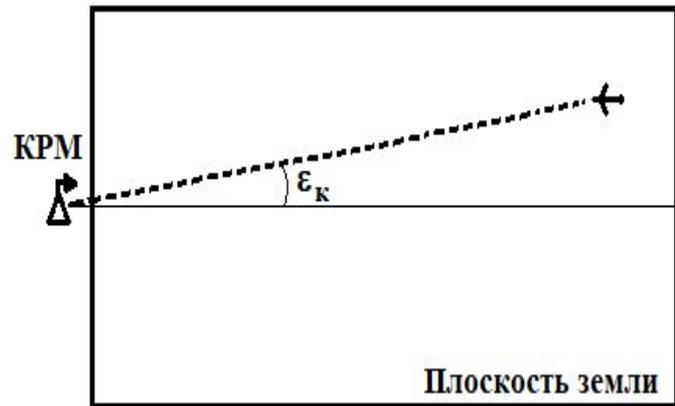
категория II - $30\text{м} \leq H < 60\text{м}$,
 $350\text{м} \leq L < 800\text{м}$

категория III - $H < 30\text{м}$, $L < 350\text{м}$
кат. IIIA $200\text{м} \leq L < 350\text{м}$

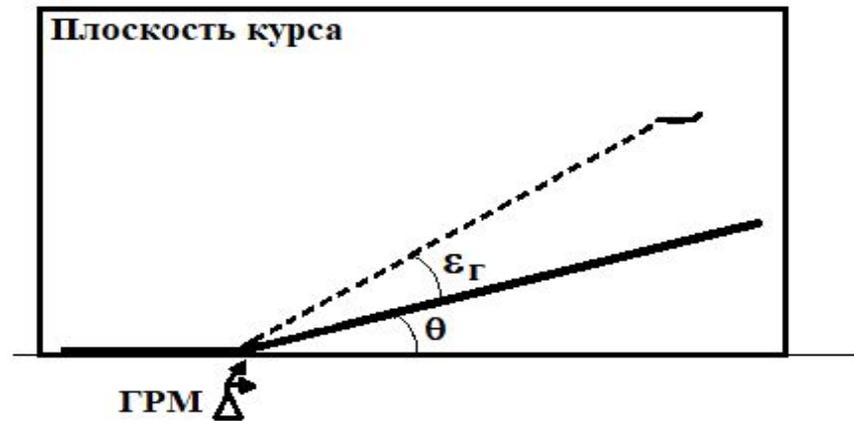


Размещение радиомаяков посадочных систем





Проекция на плоскость земли



Проекция на плоскость курса

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПОСАДКИ

В комплекс ПНК могут входить приемники систем ILS/СП-50 и РСБН, работающие в режиме «посадка» для обеспечения посадки самолетов в сложных метеоусловиях по наземным радиотехническим маякам инструментальных средств: метрового диапазона ILS, СП-50 или дециметрового диапазона ПРМГ, работающих в диапазонах радиоволн

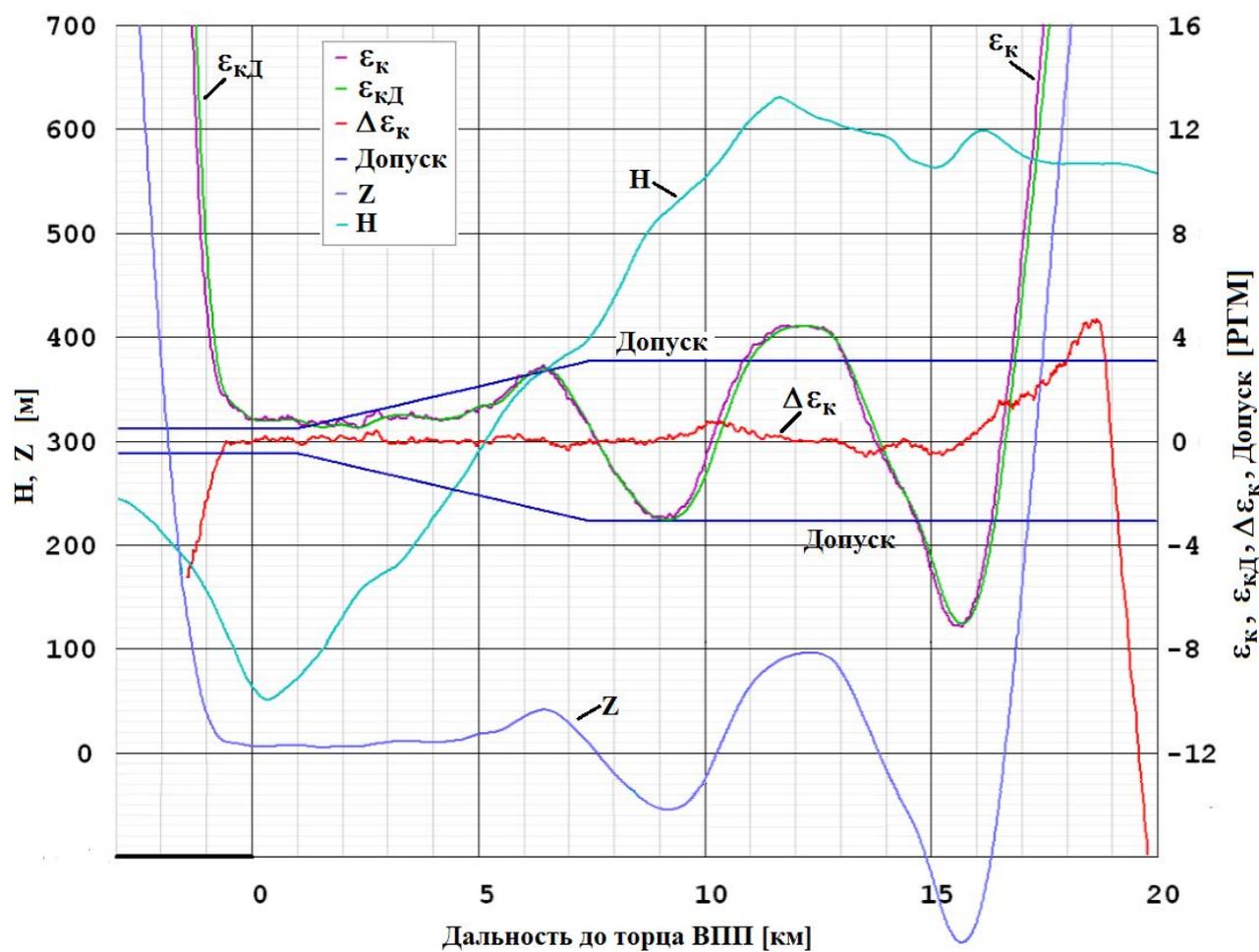
- ILS/СП-50 - 108,10.....111,9 МГц для курсового канала, 328,6...335,4 МГц для глиссадного канала, 75 МГц для маркерного канала;
- ПРМГ – 905.1...932.4 МГц для курсового канала, 939.6...966.9 МГц для глиссадного канала и 939.6...966.9 для дальномерного канала.

Системы ILS и СП-50 состоят из курсовых (КРМ), глиссадных (ГРМ) и маркерных (МРМ) радиомаяков и соответствующих им бортовых приемников с каналами курса, глиссады и маркера.

- Курсовые и глиссадные радиомаяки ILS работают на 40 частотных каналах, СП-50 на 20 частотных каналах
- Маркерные радиомаяки размещаются вдоль продолжения оси ВПП со стороны захода на посадку и служат источником информации экипажу о расстоянии до ВПП.

Система ПРМГ состоит из курсовых (КРМ), глиссадных (ГРМ) и дальномерных (РД) радиомаяков и соответствующих им бортовых приемников с каналами курса, глиссады и дальности.

- Курсовые и глиссадные радиомаяки ПРМГ работают на 40 частотных каналах
- Информация о дальности приводится к посадочному порогу ВПП.



Пример оценивания погрешности по курсу радиотехнической системы посадки

Автоматический радиокомпас (АРК)

1



2



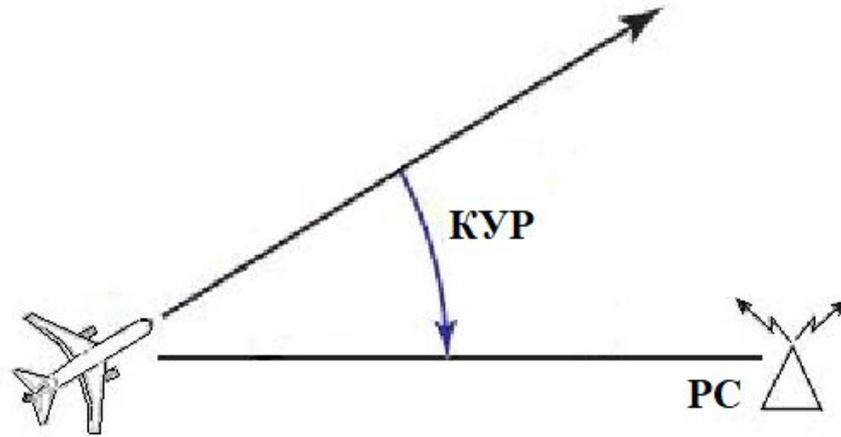
1 - указатель КУР, 2 - пульт АРК

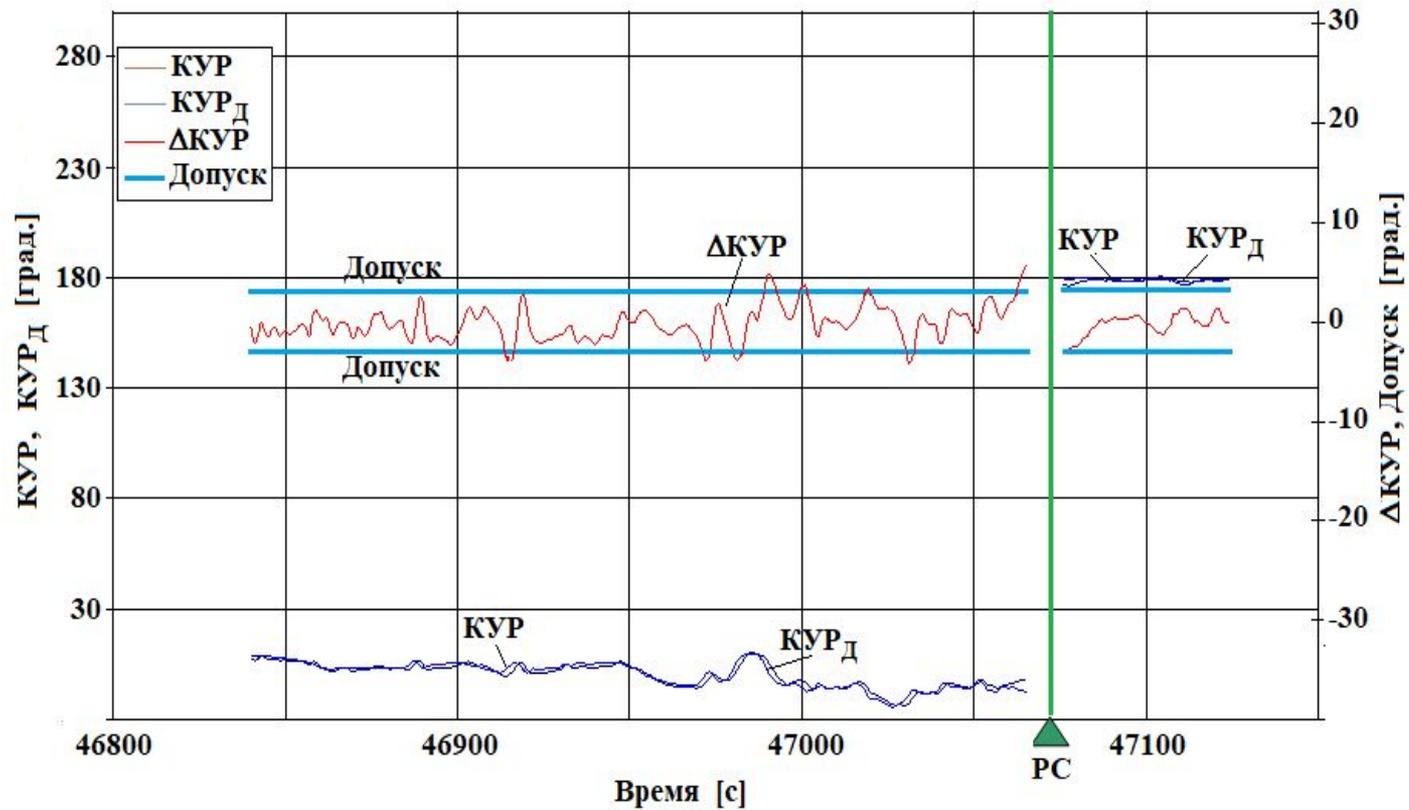
Кабина Як-18т.

АРК предназначен для навигации летательных аппаратов по сигналам наземных радиостанций путём непрерывного измерения курсового угла радиостанции (КУР) — угла, заключённого между продольной осью воздушного судна и направлением на радиостанцию, отсчитываемый по часовой стрелке.

После настройки на несущую частоту радиостанции АРК непрерывно

Автоматический радиокомпас





Пример оценивания параметра КУР при пролете над радиостанцией

Доплеровский измеритель скорости самолета (ДИСС)

Принцип действия ДИСС основан на использовании доплеровского смещения частоты отражённого от земной поверхности сигнала при облучении её узким пучком (лучом) электромагнитной энергии. При этом средняя частота данного смещения F_i (i - номер луча) в месте приёма, т.е. на ЛА связана с вектором путевой скорости W_{Π} следующим соотношением:

$$F_i = \frac{2W_{\Pi}}{\lambda} \cos \gamma_i$$

где γ_i - угол между вектором путевой скорости W_{Π} и i -м лучом;

λ - длина волны излучаемых колебаний.

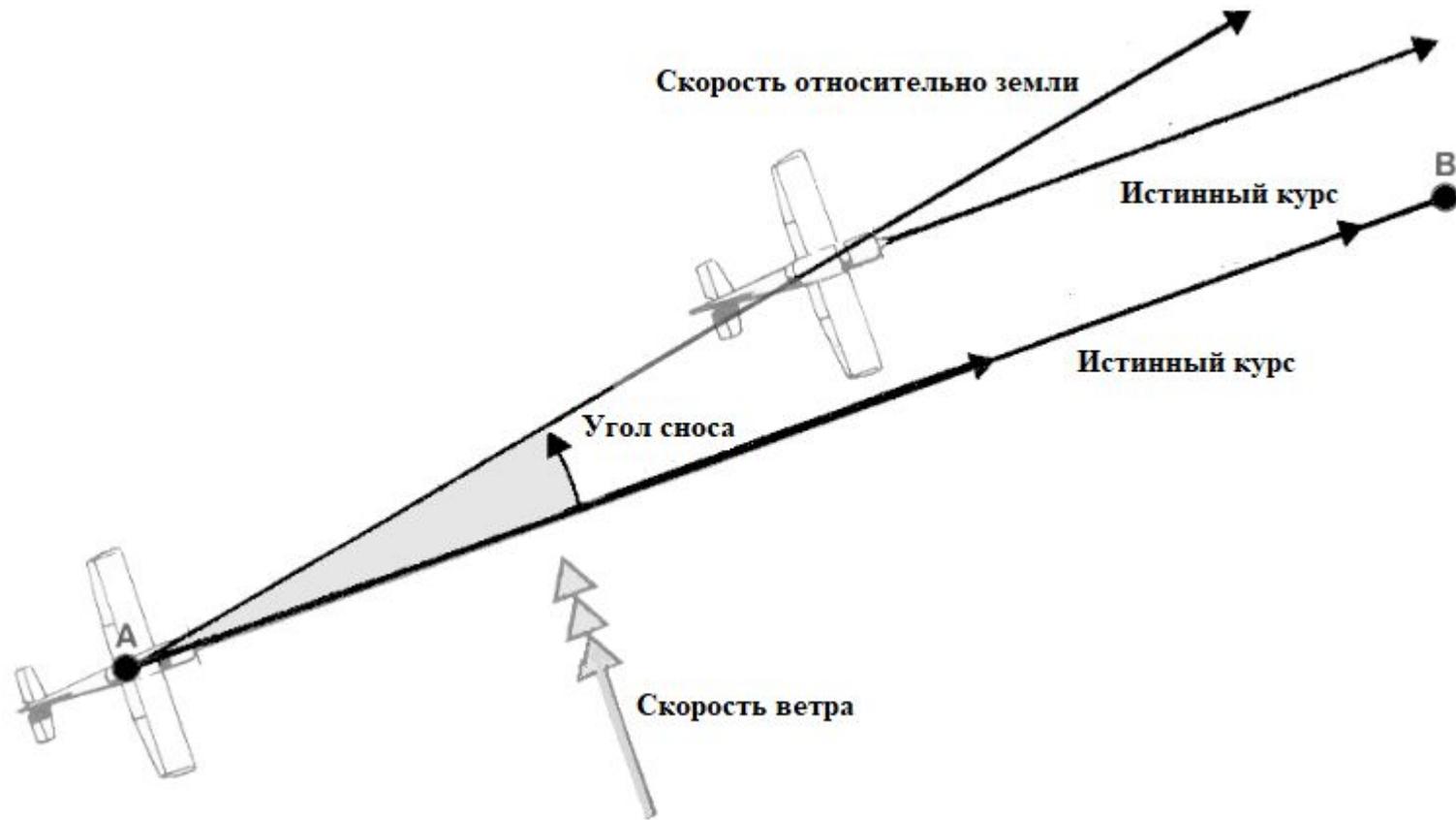
Используя 3-4 некопланарных луча, можно найти вектор скорости W_K летательного аппарата, т.е. его три проекции в связанной с самолетом системе координат. Величина вектора земной скорости в связанной системе координат вычисляется так:

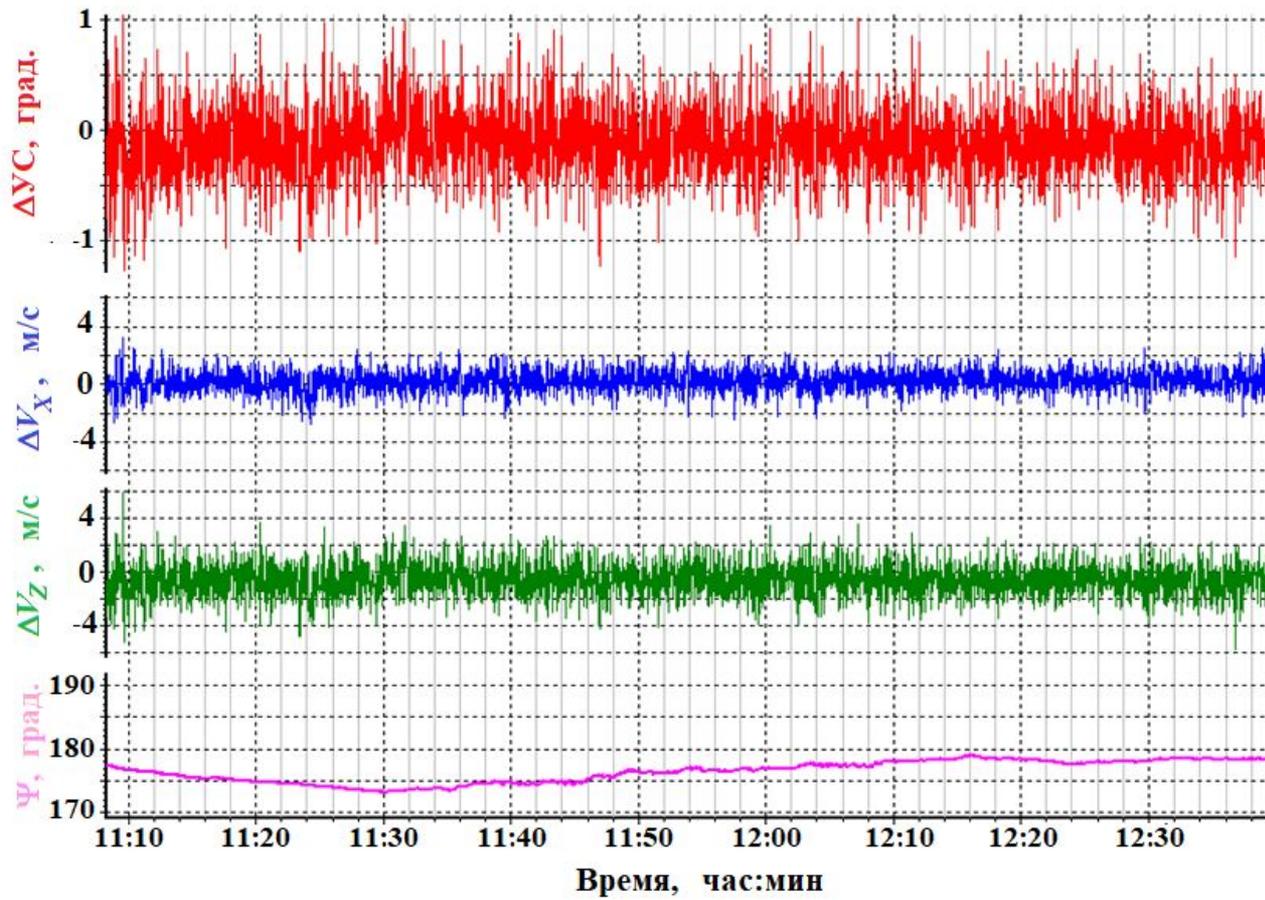
$$W_K = \sqrt{W_{KX}^2 + W_{KY}^2 + W_{KZ}^2};$$

$$УС = \arctg\left(\frac{W_{KZ}}{W_{KY}}\right)$$

УС - угол сноса (сумма углов аэродинамического сноса и скольжения).

Определение угла сноса





Погрешности параметров ДИСС на участке полета

Радиовысотомер (РВ)

Принцип действия радиовысотомера основан на определении времени прохождения радиосигнала от передающей антенны до отражающей поверхности и обратно, к приёмной антенне (основной принцип радиолокации). Высота и время задержки сигнала связаны формулой:

$$h = t \cdot c / 2,$$

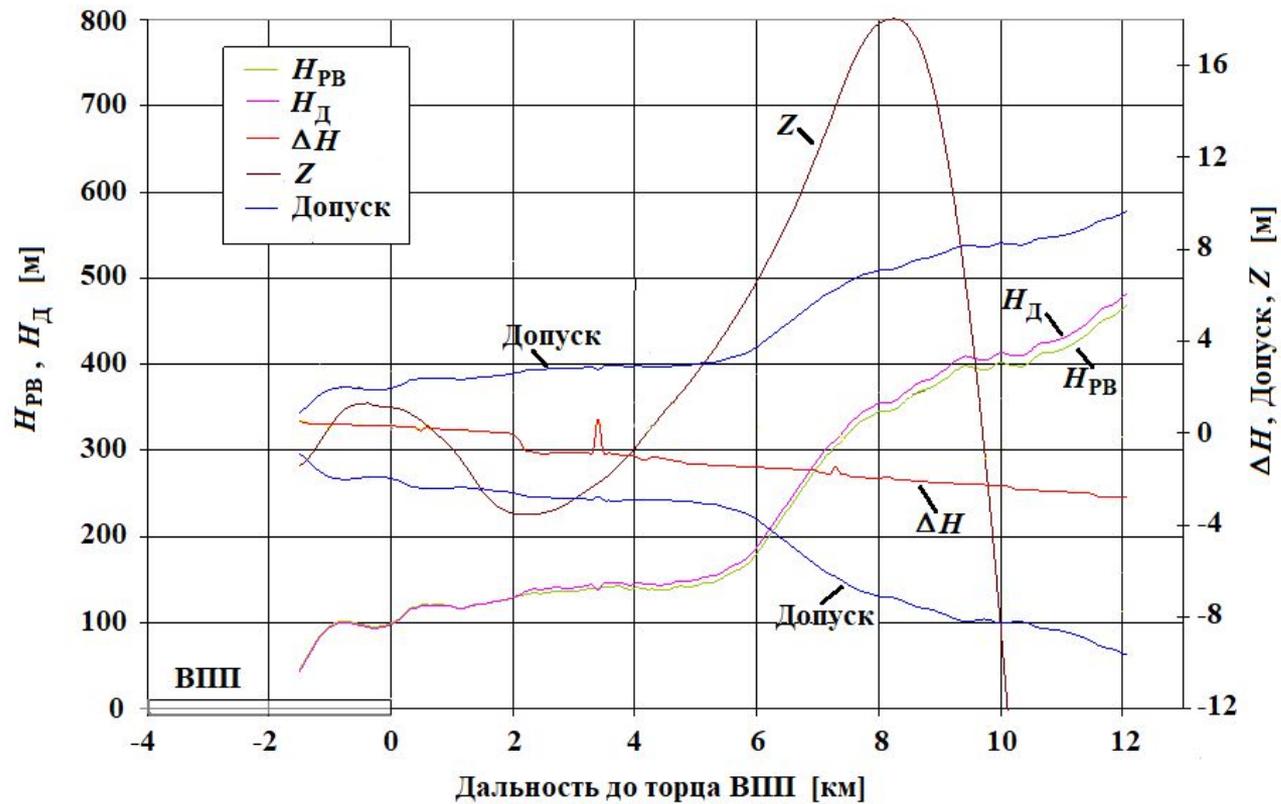
где h — высота; t — время задержки; c — скорости распространения радиоволн (равна скорости света).

Погрешность РВ может составлять

1÷3% от высоты.

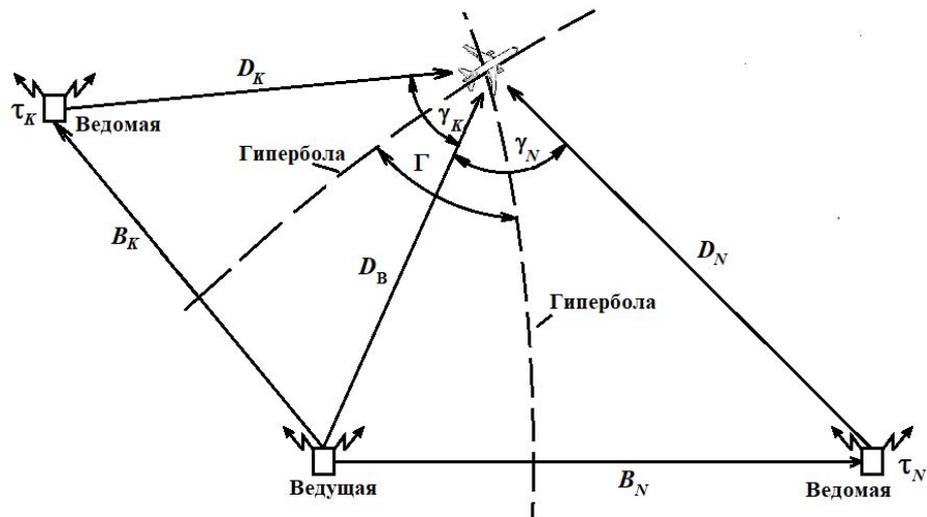


Радиовысотомер на панели приборов



Погрешности высоты радиовысотомера

Радиотехнические системы дальней навигации



Определение положения ЛА с помощью станций РСДН

Примеры радиотехнических систем дальней навигации

OMEGA – фазовая радионавигационная система (США).

АЛЬФА (Маршрут) – фазовая радионавигационная система (Россия).

LORAN-C (long range navigation) – импульсно-фазовая разностно-дальномерная система (США).

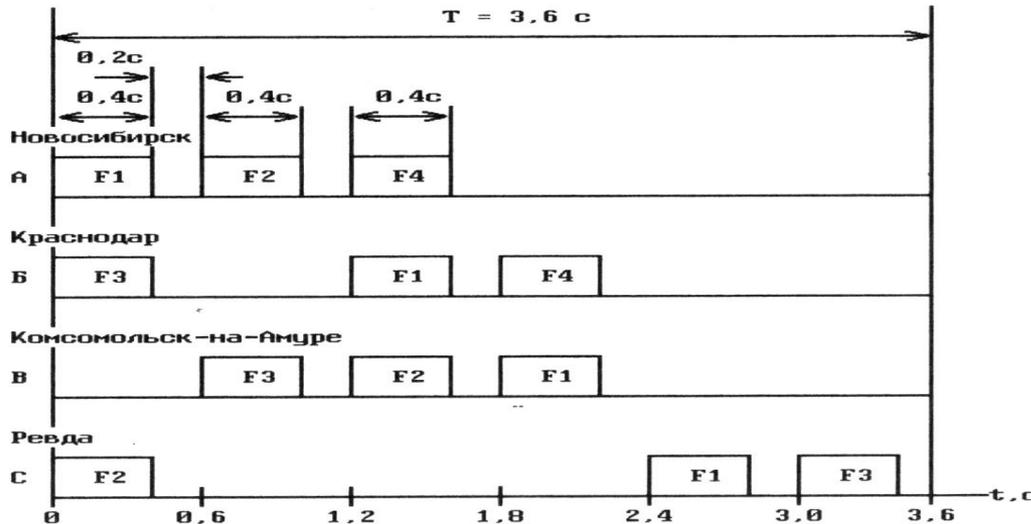
«ЧАЙКА» – импульсно-фазовая разностно-дальномерная система (Россия).

Фазовая радионавигационная система АЛЬФА (Маршрут)

Состоит из 4 станций: Комсомольск-на-Амуре, Новосибирск, Краснодар, пос. Ревда
(Мурманская область)

Формат сигналов, излучаемых

станциями



Рабочие частоты:

$F = 11,9$ кГц,

$F^1 = 12,6$ кГц,

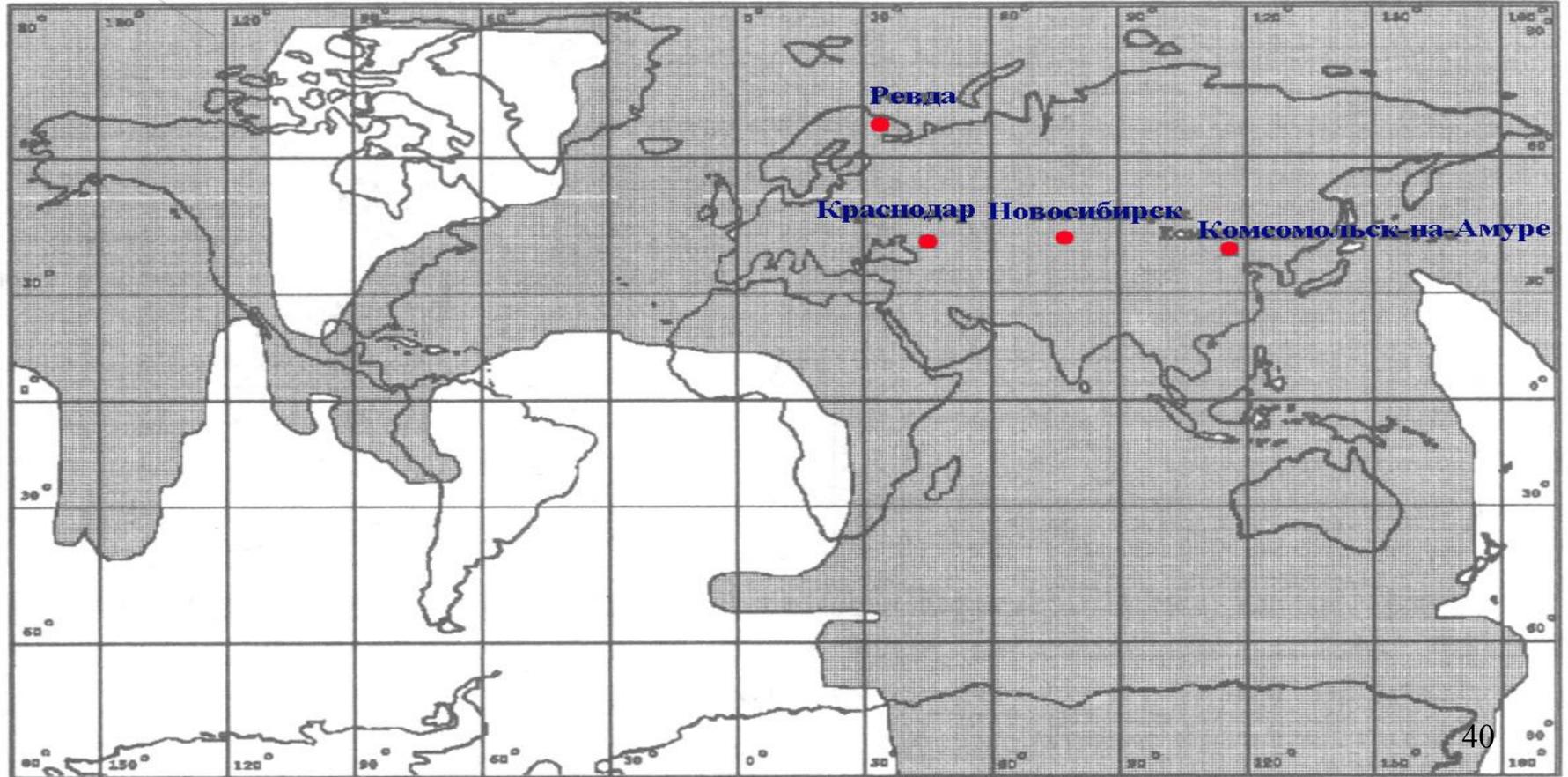
$F^2 = 14,9$ кГц
3

Длительности излучаемых посылок

одинаковы и равны $0,4$ с, период

повторения сигналов $3,6$ с

Расположение наземных станций и зона покрытия системы АЛЬФА



Расположение наземных станций и зона покрытия системы OMEGA



Импульсно-фазовые радионавигационные системы

Станции работают группами, каждая из групп образует цепь станций. Цепь включает в себя одну ведущую и 2 – 5 ведомых станций.

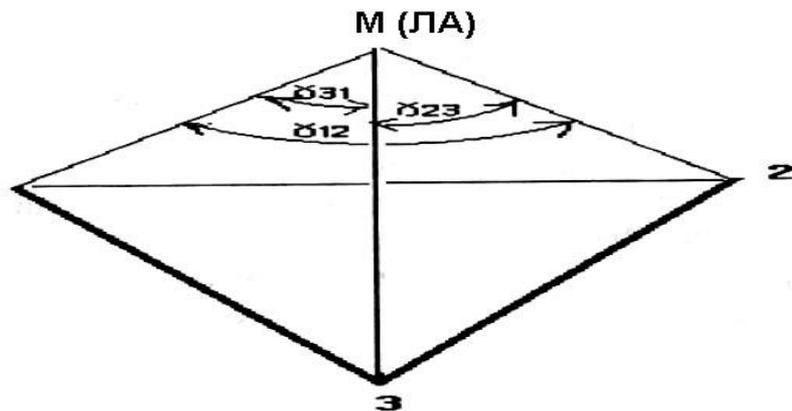
Длина баз пар станций (ведущая – ведомая) 550 – 1500 км.

Рабочая частота 100 кГц.

Погрешность определения координат 200 – 600 м, зависит от геометрического расположения наземных станций и приемника в рабочей зоне цепи.

Геометрический фактор:

$$G = \frac{\sqrt{\sin^2 \frac{\gamma_{12}}{2} + \sin^2 \frac{\gamma_{23}}{2} + \sin^2 \frac{\gamma_{31}}{2}}}{2\sqrt{2} \sin \frac{\gamma_{12}}{2} \sin \frac{\gamma_{23}}{2} \sin \frac{\gamma_{31}}{2}}$$

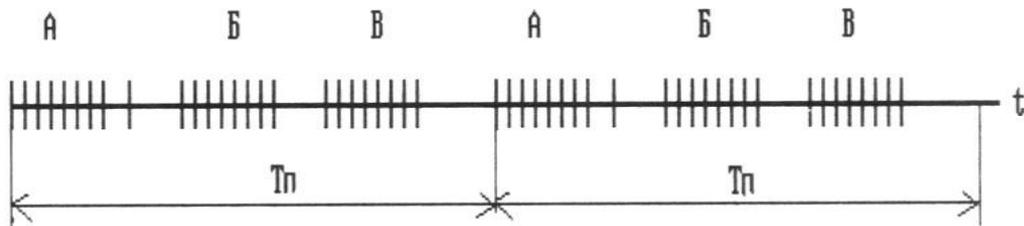


При удалении потребителя от ведущей станции 3 за линию 1-2, геометрический фактор возрастает и точность координат уменьшаться. Наименьший геометрический фактор имеет место в центре треугольника 1-2-3 и равен 1,22. На краю рабочей зоны геометрический фактор максимален и равняется 4..5.

Устранение фазовой неоднозначности в системах LORAN-C и «Чайка»

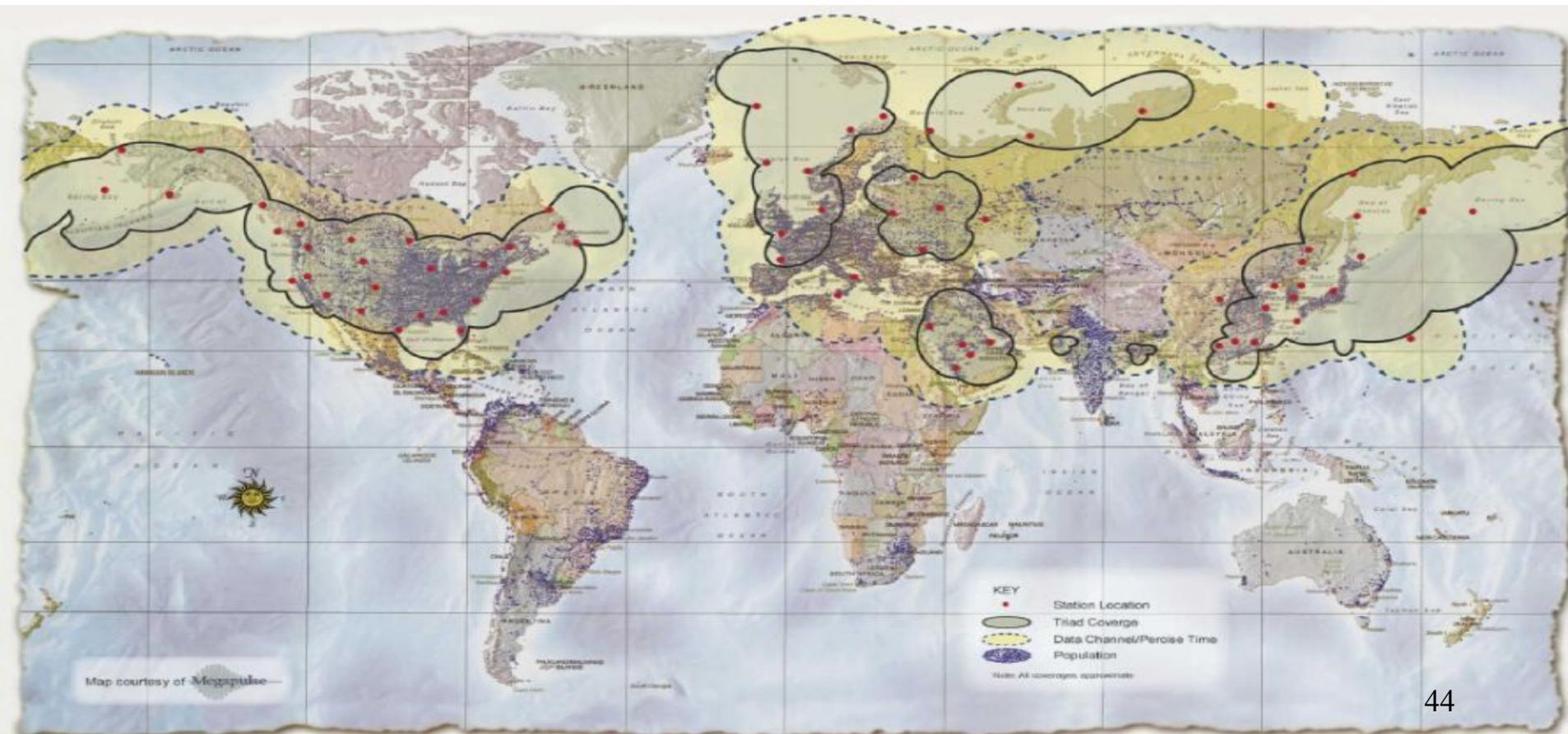
Измерения производится импульсно-фазовым методом: грубое измерение разности дальностей основано на оценке интервала времени между приходом импульсов ведущей и ведомых станций, а точное - на оценке разности фаз несущих колебаний тех же импульсов.

Последовательности пакетов радио- импульсов станций
цепи



Ведущая станция А излучает 9 импульсов, восемь из которых отстоят друг от друга на 1000 мкс, а девятый, отстоит от восьмого 1800 мкс. Этот сигнал распространяется как к потребителю, так и к приемным устройствам ведомых станций. Принятые на ведомых станциях сигнал задерживается на определенное для этой станции время (кодовая задержка) и затем излучается в эфир.

Зона покрытия систем LORAN-C и «Чайка»



Основные характеристики радиосистем дальней навигации

Параметр	LORAN-C «Чайка»	ОМЕГА АЛЬФА
Дальность, км	до 2600	до 12000
Погрешность, км	0,2 ÷ 0,6	3,7
Диапазон частот	100 кГц	10 ÷ 14 кГц

Основные причины погрешностей радиосистем дальней навигации

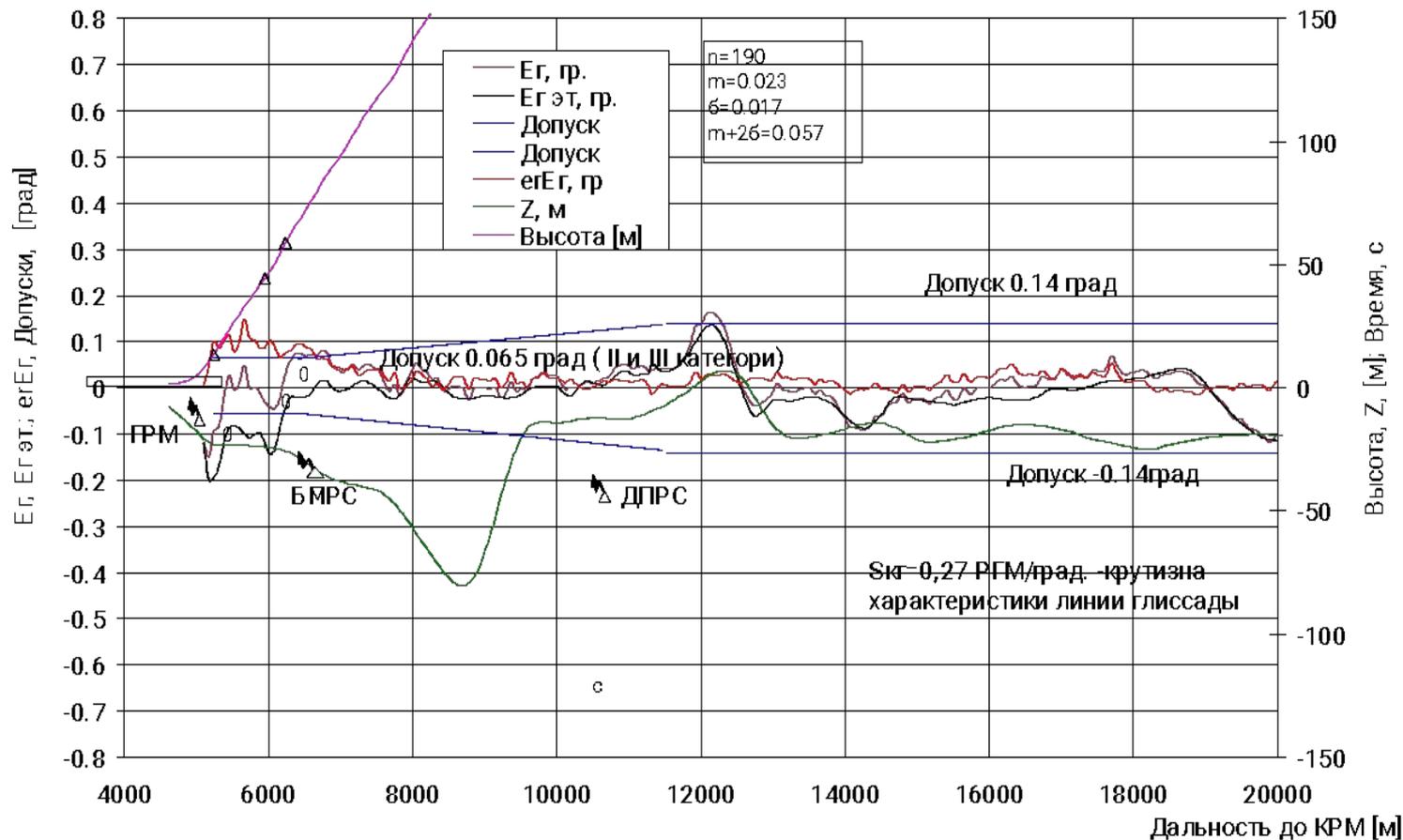
1. Помехи, поступающие на вход бортового приемника. Наибольшая погрешность связана с атмосферными помехами.

2. Отражение радиоволн систем дальней навигации от верхнего слоя ионосферы.

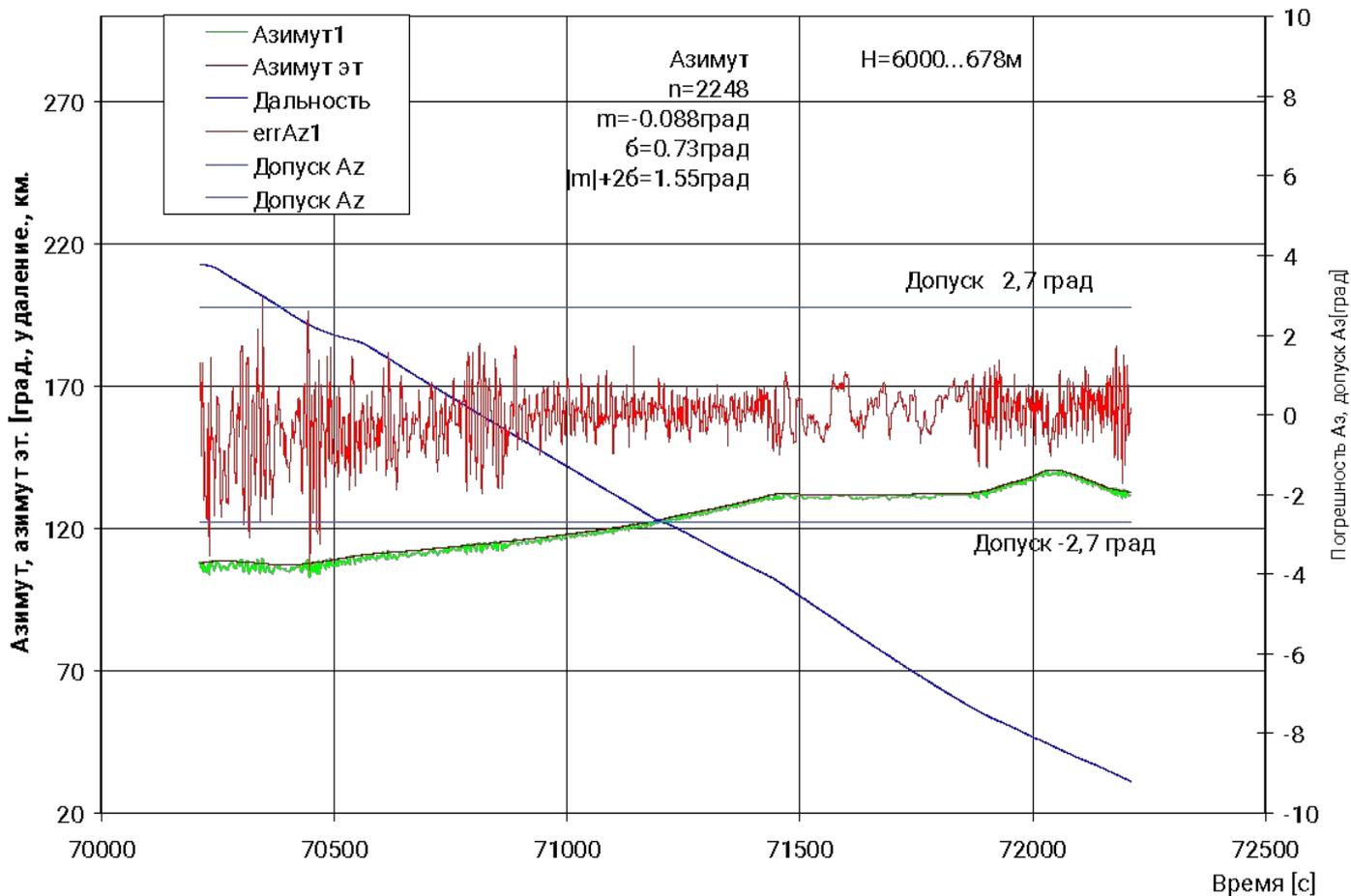
Радиоволны распространяются не только вдоль поверхности Земли (поверхностная волна), но и отражаются от нижнего слоя ионосферы (пространственная волна). Интерференция поверхностной и пространственной радиоволн приводит к искажению принимаемых сигналов.

3. Непостоянство фазовой скорости распространения поверхностной волны. Изменение скорости связано с разной проводимостью и диэлектрической проницаемостью подстилающей поверхности.

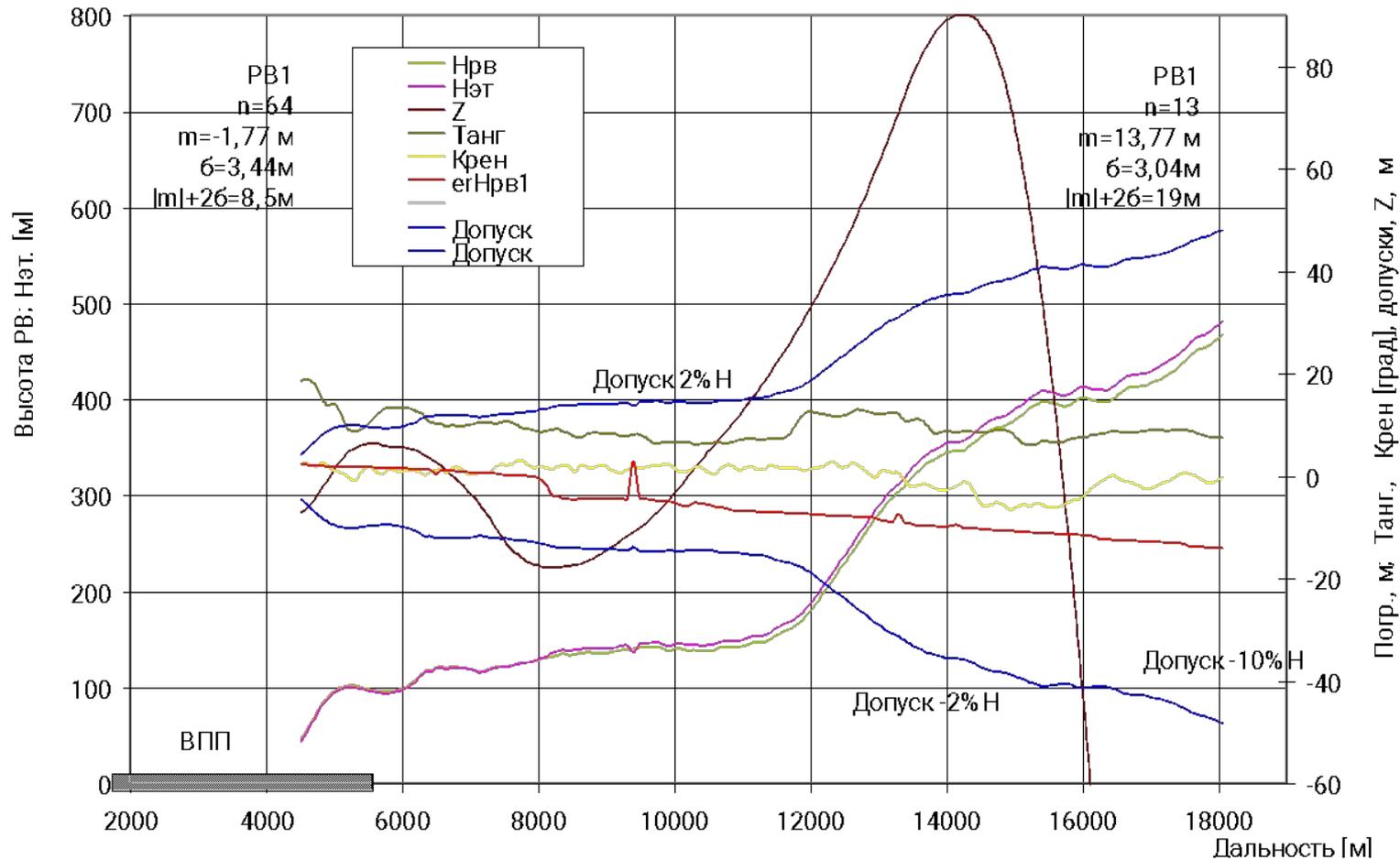
Оценка сигналов отклонений от глиссады ILS в летных испытаниях



Оценка азимута VIM в летных испытаниях



Оценка измерений высоты РВ в летных испытаниях



Анализ функционирования АРК в летных испытаниях

