

# АВТОНОМНЫЕ ДОПЛЕРОВСКИЕ УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ НАВИГАЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

ДОПЛЕРОВСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ВЕКТОРА  
СКОРОСТИ И УГЛА СНОСА (ДИСС)  
ЛЕКЦИЯ

# УПРАВЛЕНИЕ ПОЛЕТОМ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Наземные радиоэлектронные системы	
Трассовые РЛС	
Аэродромные РЛС	
Посадочные РЛС	
Вторичные РЛС	
Метео-навигационные РЛС	
Дальней навигации РЛС	
Обзора летного поля РЛС	
РСБН	
И т.д.	

Бортовые радиоэлектронные устройство	
ДИСС	
РВ	
Дальней навигации РЛС	
РСБН	
Корреляционно-экстремальная навигационная система	
РСА	
Радиокомпас	
И т.д.	

- Под системой счисления пути (ССП) понимается система, предназначенная для определения местоположения ЛА по результатам интегрирования составляющих вектора скорости ЛА, измеряемых с помощью бортовых датчиков. Датчиками радиотехнических ССП служат доплеровские измерители скорости и угла сноса (ДИСС).
- Продольная, поперечная и вертикальная составляющие вектора скорости ЛА путем интегрирования измеряемых специальными приборами (акселерометрами) ускорений ЛА по соответствующим направлениям.
- Особенностью всех ССП является ухудшение точности определения местоположения со временем, причина которой заключается в накоплении (интегрировании) погрешностей датчика скорости.

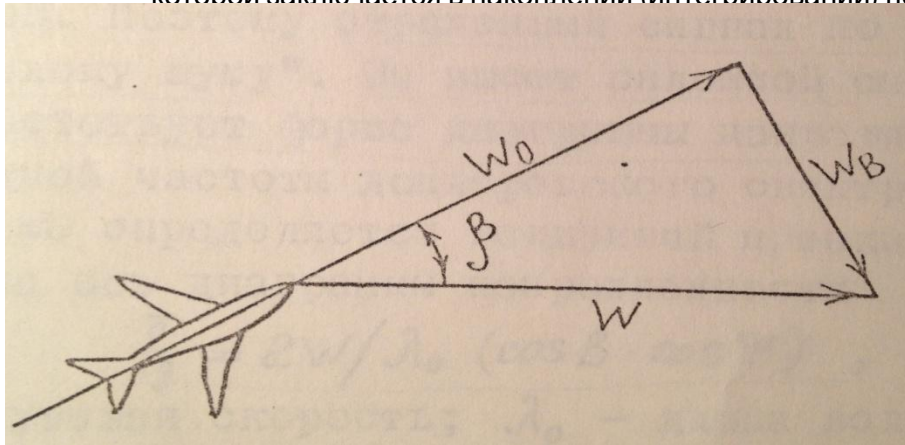


Рис. 1

Путевая скорость  $\vec{W}$  складывается из двух составляющих: воздушной скорости  $\vec{W}_0$ , т.е. скорости движения летательного аппарата относительно воздушной среды, и скорости ветра  $\vec{W}_B$ , т.е. скорости движения воздушной среды относительно земли. Направление вектора воздушной скорости практически совпадает с направлением оси летательного аппарата. Векторы  $\vec{W}, \vec{W}_0, \vec{W}_B$  образуют так называемый навигационный треугольник

# АВТОНОМНЫЕ ДОПЛЕРОВСКИЕ УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ НАВИГАЦИИ ПРЕДНАЗНАЧЕНЫ:

- Для измерения путевой скорости, угла сноса и составляющих вектора скорости летательных аппаратов (ЛА);
- Для определения координат их местоположения и автоматического управления полетом;
- Для измерения скорости ветра;

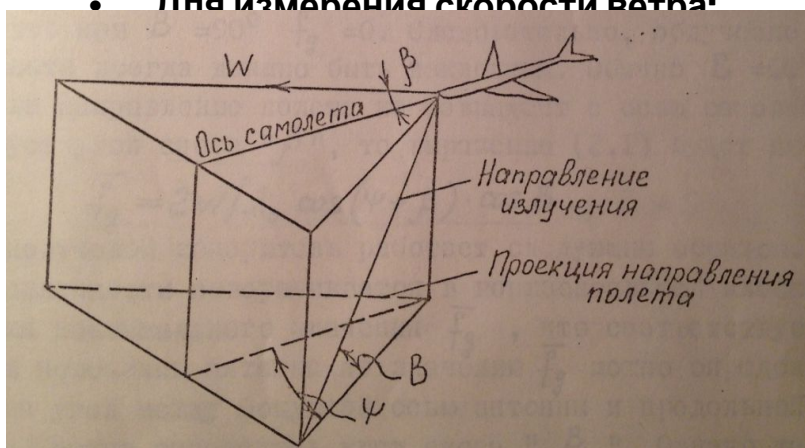
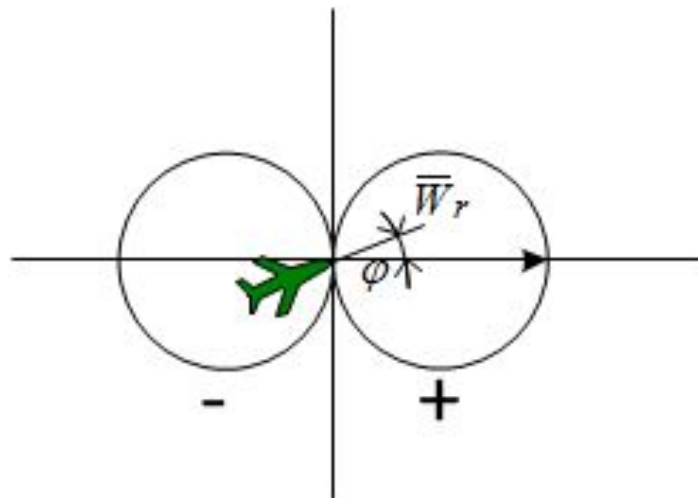


Рис. 1.1



$$\overline{f_d} = \frac{2 \cdot W}{\lambda_0} \cdot (\cos B \cdot \cos \Psi) \quad \begin{array}{l} \text{- если угла сноса} \\ \text{нет} \end{array}$$

# ОСНОВНЫЕ ЧАСТИ АВТОНОМНОЙ ДОПЛЕРОВСКОЙ СИСТЕМЫ НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ



Рис.1.2

ДИСС определяет на борту ЛА направление вектора путевой скорости по отношению к продольной оси ЛА. Для определения направления полета ЛА по отношению к странам света, т.е. в системе координат, связанной с Землей, необходимо знание курса ЛА, определяющего переход по направлению от подвижной системы координат к неподвижной. Итак, для того, чтобы определить, в каком направлении и с какой скоростью летит аппарат, необходимо наличие как доплеровского устройства, измеряющего угол сноса и путевую скорость, так и курсовой системы. Интегрирование получаемых данных о перемещении ЛА с помощью так называемого навигационного вычислителя координат и учет координат начального пункта маршрута позволяет ответить на вопрос, где находится ЛА. Для того, чтобы решить задачу, в каком направлении и сколь долго лететь до пункта назначения, необходимо сопоставить информацию о действительном положении ЛА с заданными координатами пункта назначения.

# ОДНОЛУЧЕВОЙ ДИСС

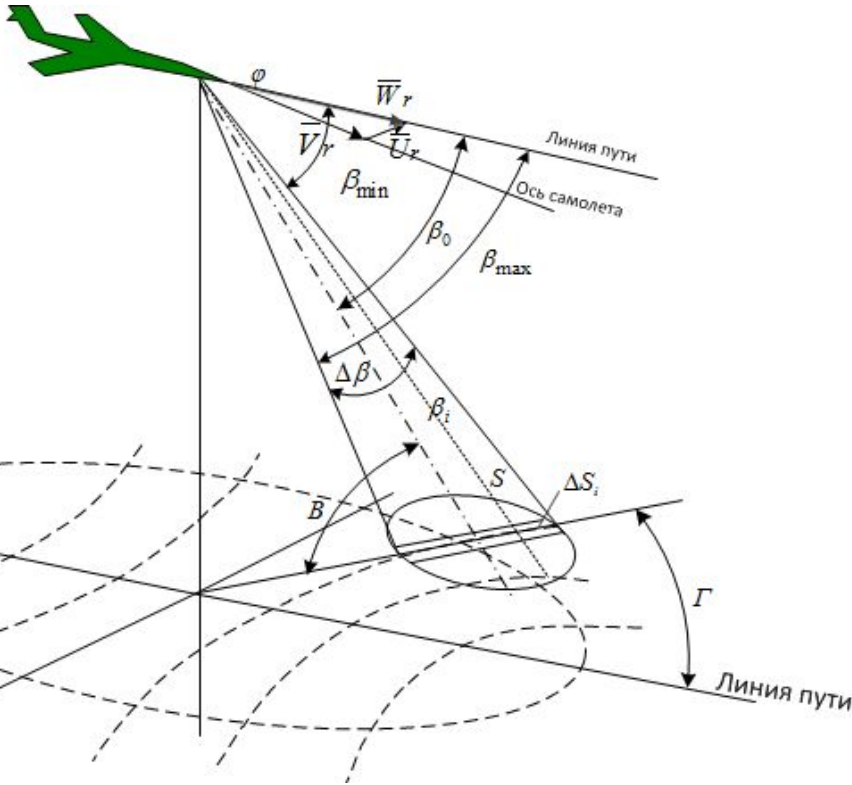


Рис. 1.3

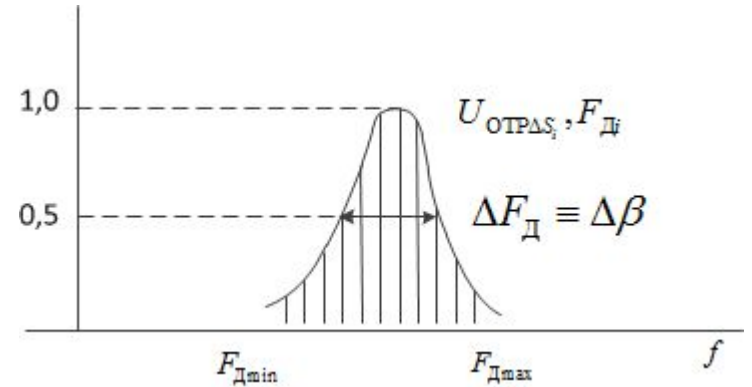


Рис. 1.4

$$u_{OTPS} = \sum_{i=1}^N U_{OTPAS_i} \sin \left[ (\omega_0 + \omega_{di})t - \varphi_i \right] \quad (1)$$

$$\lambda = 0,8 \dots 3 \quad \Delta\beta = \lambda / Da$$

$$Da = 30 \dots 40$$

$$\beta_0 = 65^\circ \dots 75^\circ$$

$$\Delta F_{до,5} = \frac{2W}{\lambda} \left[ \cos \left( \beta_0 - \frac{\Delta\beta}{2} \right) - \cos \left( \beta_0 + \frac{\Delta\beta}{2} \right) \right] = \frac{4W}{\lambda} \sin \left( \beta_0 \cdot \frac{\Delta\beta}{2} \right) \cdot \sin \beta_0 = \frac{4W}{\lambda} \Delta\beta \cdot \sin \beta_0 \quad (2)$$

# ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТРАЖЕНИЯ ЗОНДИРУЮЩИХ СИГНАЛОВ ОТ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

- 1 - пашня
- 2 - лес
- 3 - поле с зеленой травой
- 4 - песчаная пустыня
- 5 - поле, покрытое снегом
- 6 - ледовая поверхность

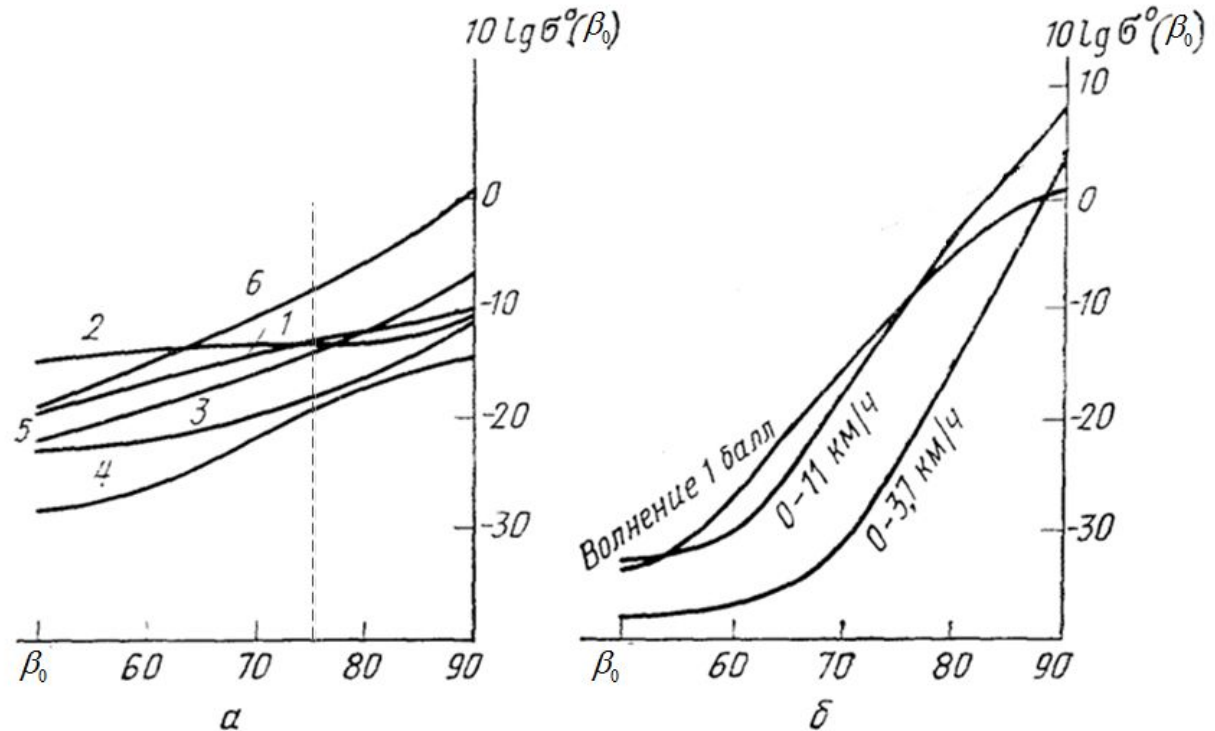


Рис. 1. 5

Величина удельной эффективной площади обратного рассеяния зависит от большего числа параметров: от длины волны и поляризации излучаемых колебаний, вида отражающей поверхности ее характеристик и углов визирования. С увеличением угла визирования растет уровень отраженного сигнала, но это приводит к уменьшению чувствительности доплеровской частоты и минимальный разброс мощности отраженного сигнала. Поэтому компромисс 65 – 75 град.

# ПОГРЕШНОСТИ ОДНОЛУЧЕВОГО ДИСС

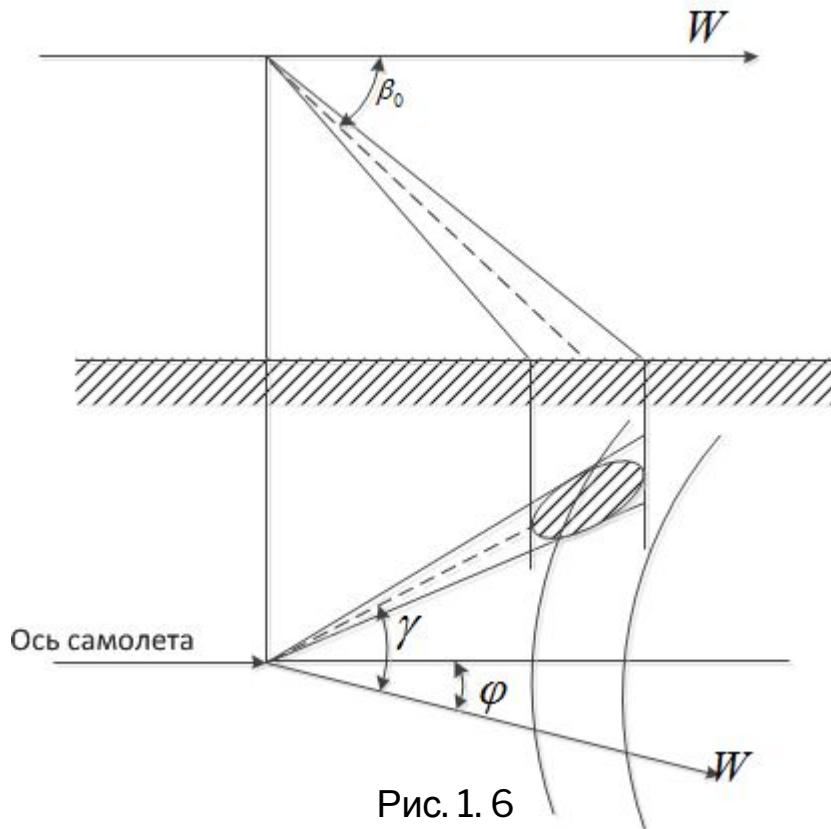


Рис. 1. 6

$$F_{\text{Д}} = \frac{2W}{\lambda} \cos \beta_0 \cdot \cos \gamma \quad (3)$$

$$F_{\text{Д max}} = \frac{2W}{\lambda} \cos \beta_0 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \delta F_{\text{Д}} = F_{\text{Д max}} - F_{\text{Д}} &= \frac{2W}{\lambda} \cos \beta_0 \cdot (1 - \cos \gamma) \quad (5) \\ &= \frac{2W}{\lambda} \cos \beta_0 \cdot \frac{\gamma^2}{2} \end{aligned}$$

Угол сноса равен углу, составленному осью самолета и осью ДНА в момент совмещения с направлением вектора путевой скорости, т.е. при  $F_{\text{Д}} = F_{\text{Д max}}$   
 Однолучевая система не находит практического применения из-за низкой точности измерения

$$\delta \varphi = \gamma \approx \sqrt{\frac{2\delta F_{\text{Д}}}{F_{\text{Д max}}}}$$

(6)

Допустим, если  $\frac{2\delta F_{\text{Д}}}{F_{\text{Д max}}} = 0,01$  то погрешность измерения  $\varphi$  составляет

$$\delta \varphi = 0,1 \text{ рад}$$



# ПОГРЕШНОСТИ ОДНОЛУЧЕВОГО ДИСС

Второй важной погрешностью однолучевых измерителей является крен летательного аппарата. Пусть из-за крена истинное значение угла визирования отличается от расчетного на  $\delta\beta_0$ .

Если продифференцируем максимальную доплеровскую частоту по углу визирования, то получим

$$\frac{dF_{д max}}{d\beta_0} = \frac{2W}{\lambda} (-\sin \beta_0), \text{ что при конечных приращениях равно}$$
$$\delta F_{д max} = \frac{2W}{\lambda} (-\sin \beta_0) \cdot \delta\beta_0$$

Тогда

$$\left| \frac{\delta W}{W} \right| = \left| \frac{\delta F_{д max}}{F_{д max}} \right| = \delta\beta_0 \cdot \tan \beta_0$$

Стабилизация антенны в горизонтальной плоскости или введение поправок на крен при обработке усложняет измеритель, но не устраняет недостатков однолучевого метода, к которым следует отнести высокие требования к стабильности частоты излучаемых колебаний.

Решение проблемы: многолучевые ДИСС

# МНОГОЛУЧЕВОЙ ДИСС

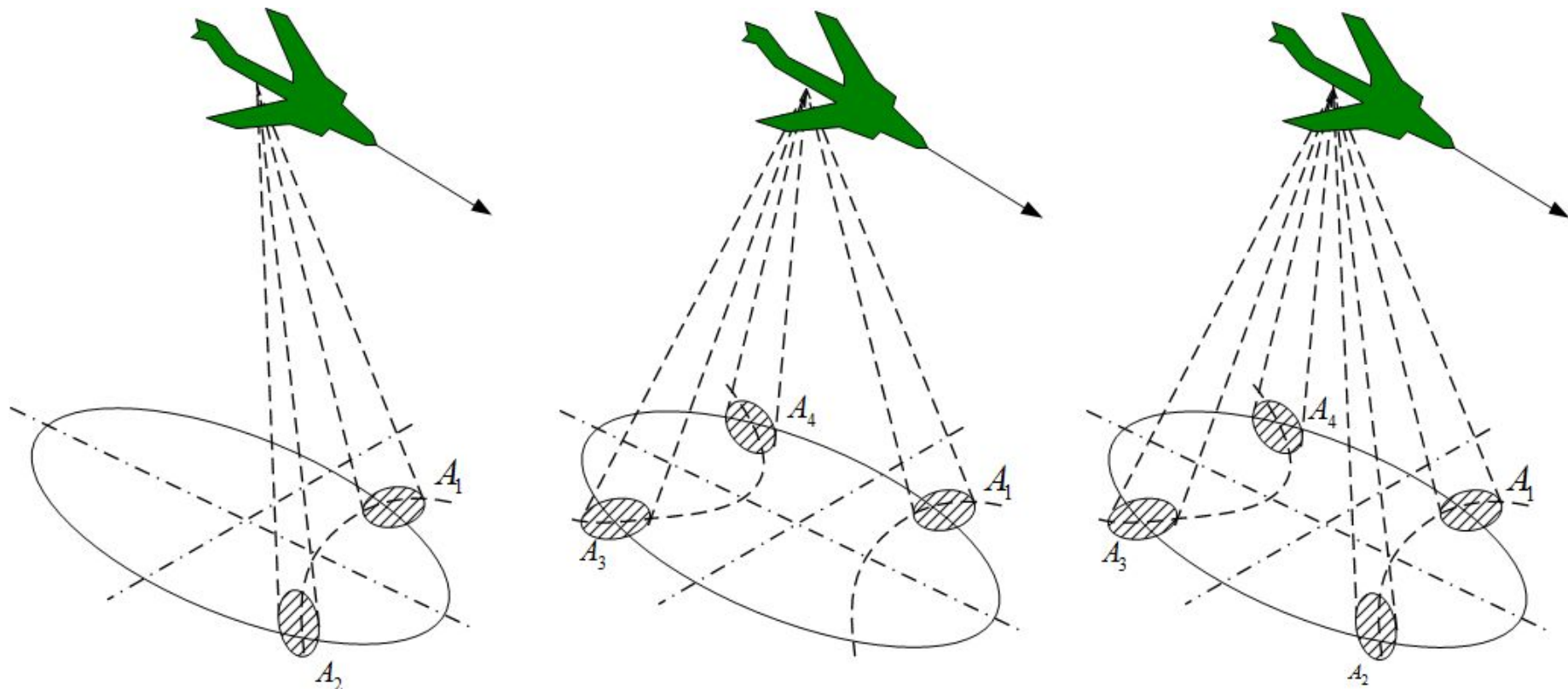


Рис.1.7 Многолучевые ДИСС

По назначению и способу построения измерители вектора скорости ЛА могут быть условно разделены на два основных типа: ДИСС, измеряющие путевую скорость и угол сноса ЛА или продольную и поперечную составляющие вектора путевой скорости (самолетные ДИСС), и ДИСС, измеряющие полный вектор скорости ЛА, т.е. три его составляющие (вертолетные ДИСС)

# ДВУХЛУЧЕВОЙ ДИСС

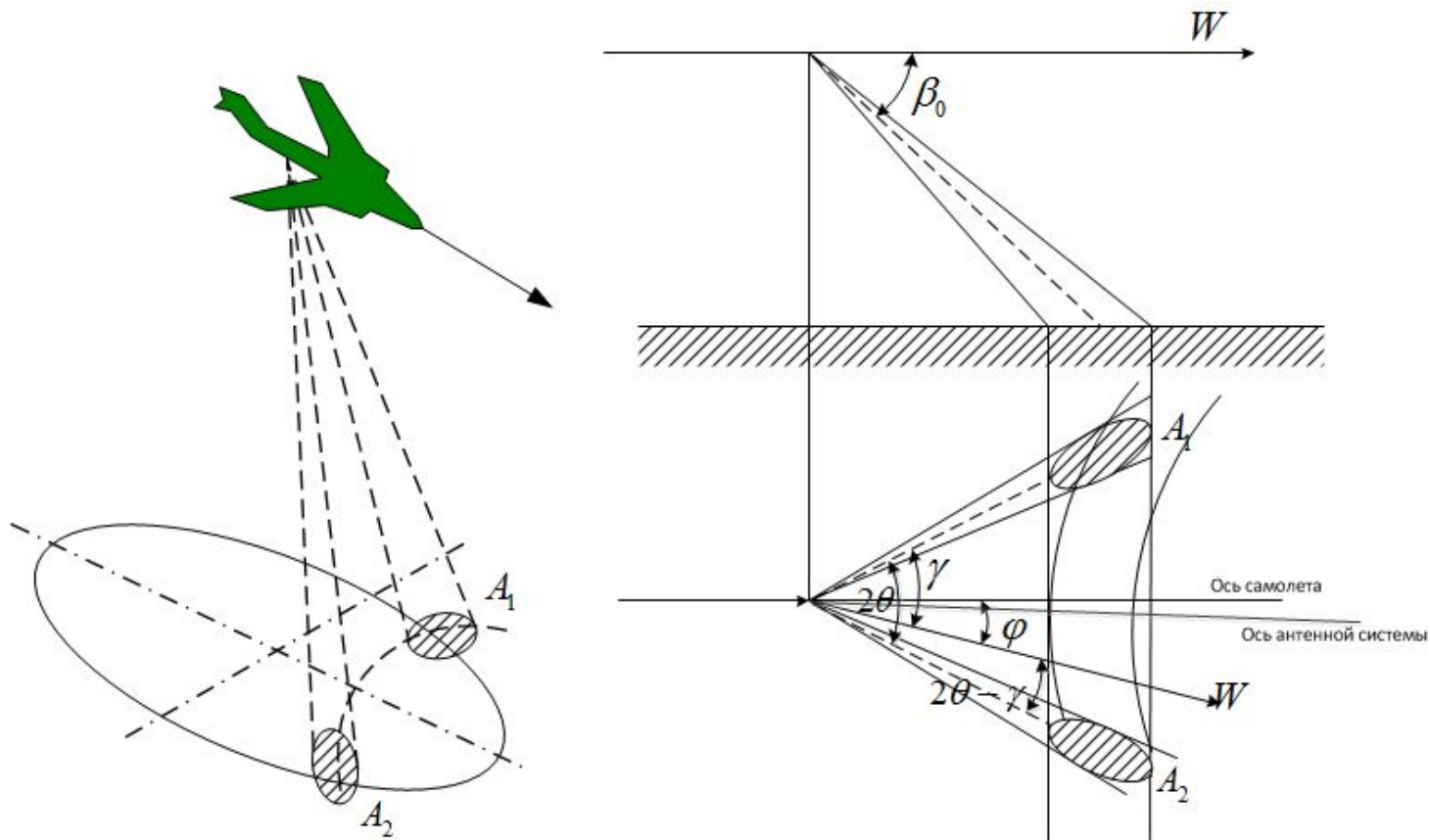


Рис. 1.8 Двухлучевые ДИСС

Точность при этом выше, так как лучи пересекают линии равных частот под углом близким к прямому, и это обеспечивает большую чувствительность. Угол  $\theta$  выбирается равным 45 град.

# ДВУХЛУЧЕВОЙ ДИСС

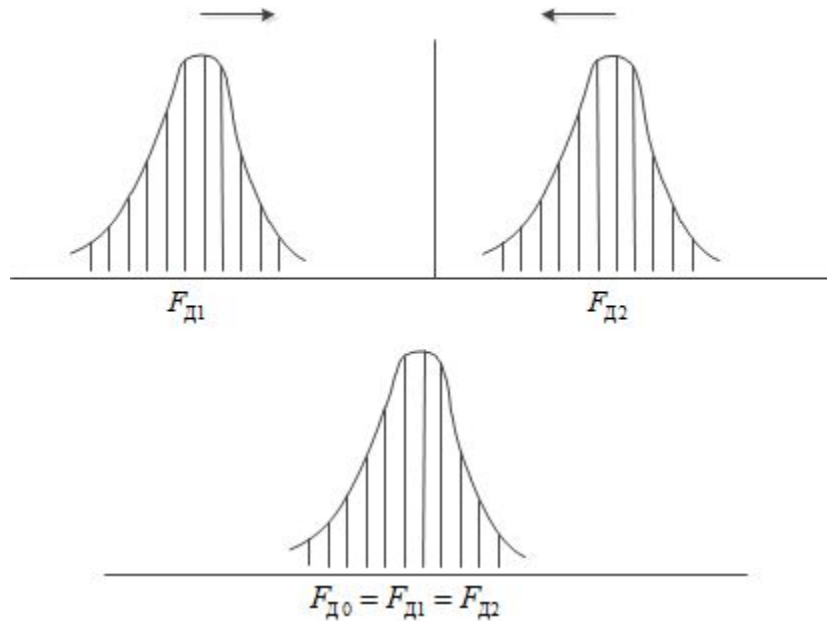


Рис.1.9

Необходимо иметь  $\gamma = \theta$ , но если равенство частот  $F_{д1}$  и  $F_{д2}$  установлено истинно и их Разность, отличаясь от нуля составляет  $\delta F_{д} = F_{д0}$ , то это приводит к погрешности в определении угла сноса  $\delta\varphi = \gamma - \theta$ , т.к. ее значение обычно невелико, то можно принять:

$$\delta\varphi \approx \sin \delta\varphi = \sin(\gamma - \theta) = \frac{-F_{д\text{разн}}}{\frac{4W}{\lambda} \cos \beta \cdot \sin \theta} = \frac{-F_{д\text{разн}}}{2F_{д} \cdot \tan \theta}, \text{ где } F_{д} = \frac{2W}{\lambda} \cdot \cos \beta_0 \cdot \cos \theta$$

Относительная погрешность оценки угла сноса примерно в 30 раз меньше, чем у однолучевых ДИСС, но погрешность из-за крена остается примерно такой же.

$$F_{д1} = \frac{2W}{\lambda} \cdot \cos \beta_0 \cdot \cos \gamma$$

$$F_{д2} = \frac{2W}{\lambda} \cdot \cos \beta_0 \cdot \cos(2\theta - \gamma)$$

$$F_{д\text{разн}} = F_{д1} - F_{д2} =$$

$$\frac{2W}{\lambda} \cdot \cos \beta_0 \cdot (\cos \gamma - \cos(2\theta - \gamma)) =$$

$$-\frac{4W}{\lambda} \cdot \cos \beta_0 \cdot \sin \theta \cdot \sin(\gamma - \theta)$$

# ДВУХЛУЧЕВОЙ ДИСС

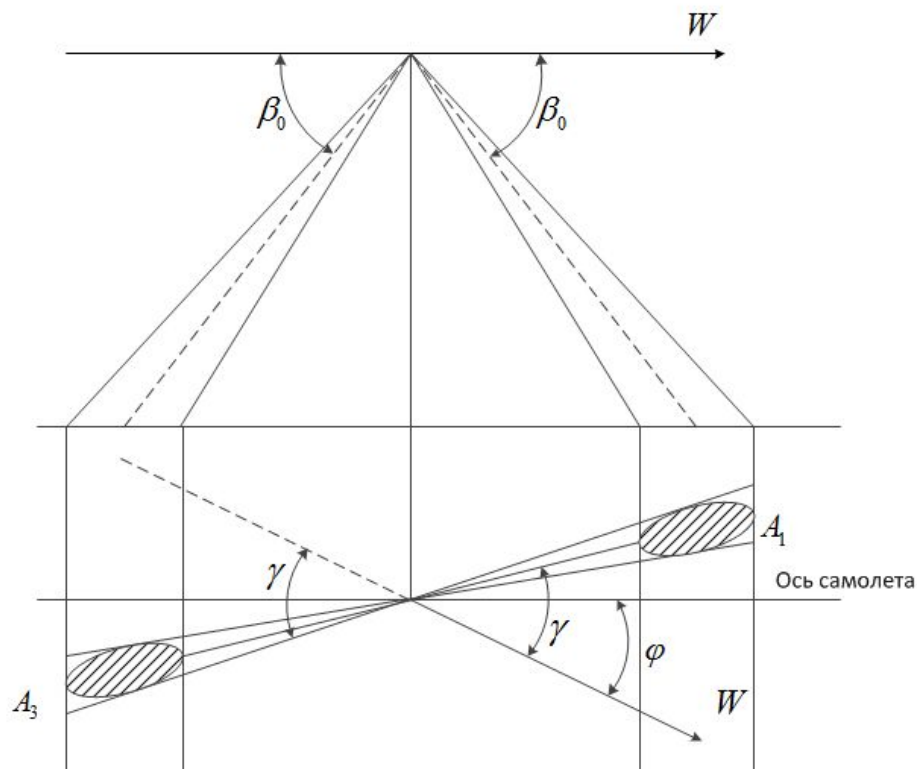
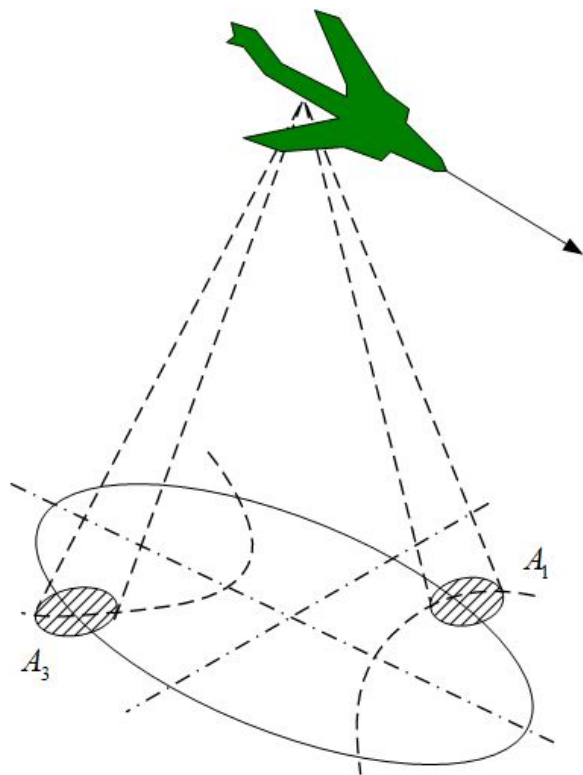


Рис.1.10

Точность измерения путевой скорости существенно повышается при использовании двусторонних систем, имеющих лучи, направленные вперед и назад.

# ДВУХЛУЧЕВОЙ ДИСС

$$F_{д1} = \frac{2W}{\lambda} \cdot \cos \beta_0 \cdot \cos \gamma$$

$$F_{д3} = -\frac{2W}{\lambda} \cdot \cos \beta_0 \cdot \cos \gamma$$

$$F_{д\text{разн}} = F_{д1} - F_{д3} = \frac{4W}{\lambda} \cdot \cos \beta_0 \cdot \cos \gamma$$

Рассмотрим погрешности, обусловленные углом крена

$$F_{д\text{разн}} = \frac{4W}{\lambda} \cdot \cos \gamma \cdot [\cos(\beta_0 - \delta\beta) + \cos(\beta_0 + \delta\beta)] = \frac{4W}{\lambda} \cdot \cos \gamma \cdot \cos \beta_0 \cdot \cos \delta\beta$$

Отклонение разностной частоты от ее максимального значения

$$\delta F_{д\text{разн}} = \frac{4W}{\lambda} \cdot \cos \gamma \cdot \cos \beta_0 \cdot (1 - \cos \delta\beta) \quad \frac{\delta F_{д\text{разн}}}{F_{д\text{разн}}} = 1 - \cos \delta\beta = 2 \sin^2 \frac{\delta\beta}{2} \approx \frac{\delta\beta^2}{2}$$

На каждый градус погрешности угла  $\Delta\beta$  приходится погрешность оценки путевой

скорости 0,00015:  $\frac{\delta W}{W} = \frac{\delta F_{д\text{разн}}}{F_{д\text{разн}}} = \frac{\delta\beta^2}{2}$  (в примерно 300 раз по сравнению с однолучевым), но точность оценки угла

сноса остается такой же

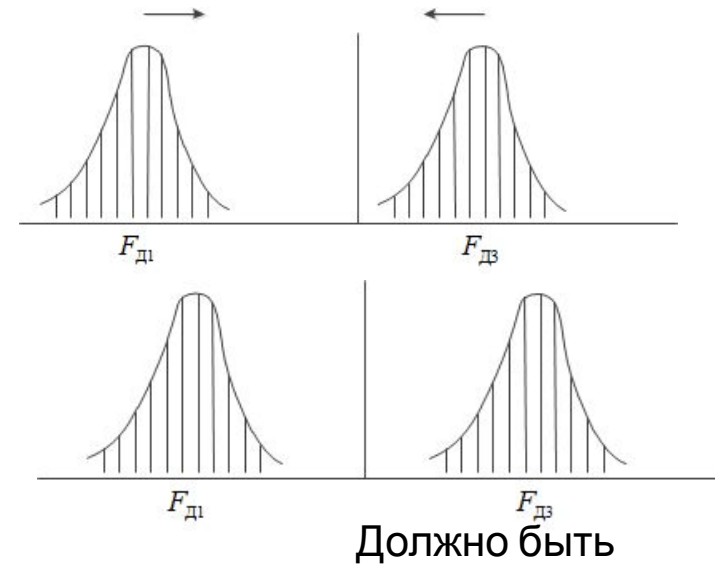


Рис. 1.11

# ТРЕХ-ЧЕТЫРЕХЛУЧЕВОЙ ДИСС

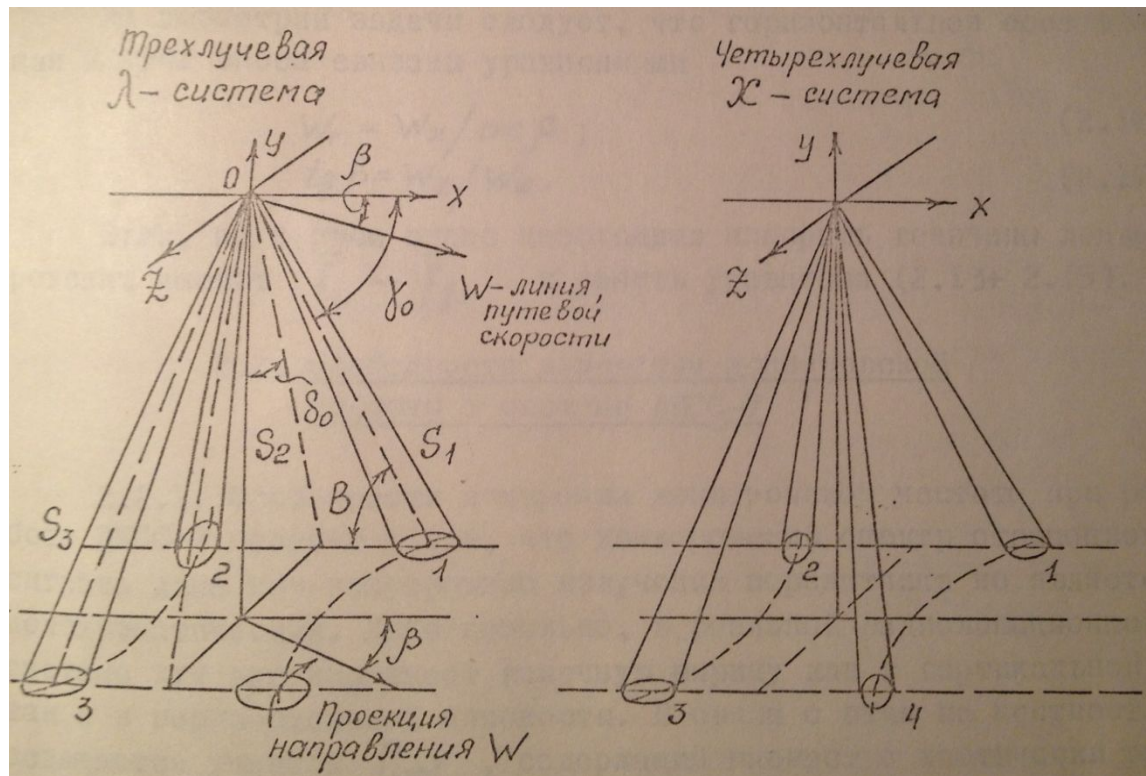


Рис. 1.12

Так как вектор скорости ЛА определяется в общем случае проекциями на три некопланарных направления, то для определения всех трех составляющих необходимо излучать и принимать сигналы минимум по трем значениям доплеровского сдвига частоты определяется равенством

$$\overline{f_D} = \frac{2 \cdot W_s}{\lambda_0}$$

$$W_s = W_x \cdot \cos(\gamma) - W_y \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(90^\circ - \gamma) + W_z \cdot \cos(90^\circ - \delta) \cdot \cos(90^\circ - \gamma) = W_x \cdot \cos(\gamma) - W_y \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\gamma) + W_z \cdot \sin(\delta) \cdot \sin(\gamma)$$

$$\overline{f_D} = \frac{2}{\lambda_0} \cdot [W_x \cdot \cos(\gamma) - W_y \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\gamma) + W_z \cdot \sin(\delta) \cdot \sin(\gamma)]$$

# ТРЕХ-ЧЕТЫРЕХЛУЧЕВОЙ ДИСС

$$\overline{f_{D1}} = \frac{2}{\lambda_0} \cdot [W_x \cdot \cos(\gamma_0) - W_y \cdot \cos(\delta_0) \cdot \sin(\gamma_0) - W_z \cdot \sin(\delta_0) \cdot \sin(\gamma_0)]$$

$$\overline{f_{D2}} = \frac{2}{\lambda_0} \cdot [W_x \cdot \cos(\gamma_0) + W_y \cdot \cos(\delta_0) \cdot \sin(\gamma_0) + W_z \cdot \sin(\delta_0) \cdot \sin(\gamma_0)]$$

$$\overline{f_{D3}} = \frac{2}{\lambda_0} \cdot [W_x \cdot \cos(\gamma_0) + W_y \cdot \cos(\delta_0) \cdot \sin(\gamma_0) - W_z \cdot \sin(\delta_0) \cdot \sin(\gamma_0)]$$

$$\overline{f_{\mathcal{H}}} = \overline{f_{D1}} + \overline{f_{D2}} \boxtimes \frac{4}{\lambda_0} \cdot W \cdot \cos(\gamma_0)$$

$$W_{\mathcal{H}} = \lambda_0 \cdot (\overline{f_{D1}} + \overline{f_{D2}}) / (4 \cdot \cos(\gamma_0))$$

$$\overline{f_{\mathcal{H}}} = \overline{f_{D2}} - \overline{f_{D1}} \boxtimes \frac{4}{\lambda_0} \cdot W \cdot \cos(\delta_0) \cdot \sin(\gamma_0)$$

$$W_{\mathcal{H}} = \lambda_0 \cdot (\overline{f_{D2}} - \overline{f_{D1}}) / (4 \cdot \cos(\delta_0) \cdot \sin(\gamma_0))$$

$$\overline{f_{\mathcal{H}}} = \overline{f_{D2}} - \overline{f_{D3}} \boxtimes \frac{4}{\lambda_0} \cdot W \cdot \sin(\delta_0) \cdot \sin(\gamma_0)$$

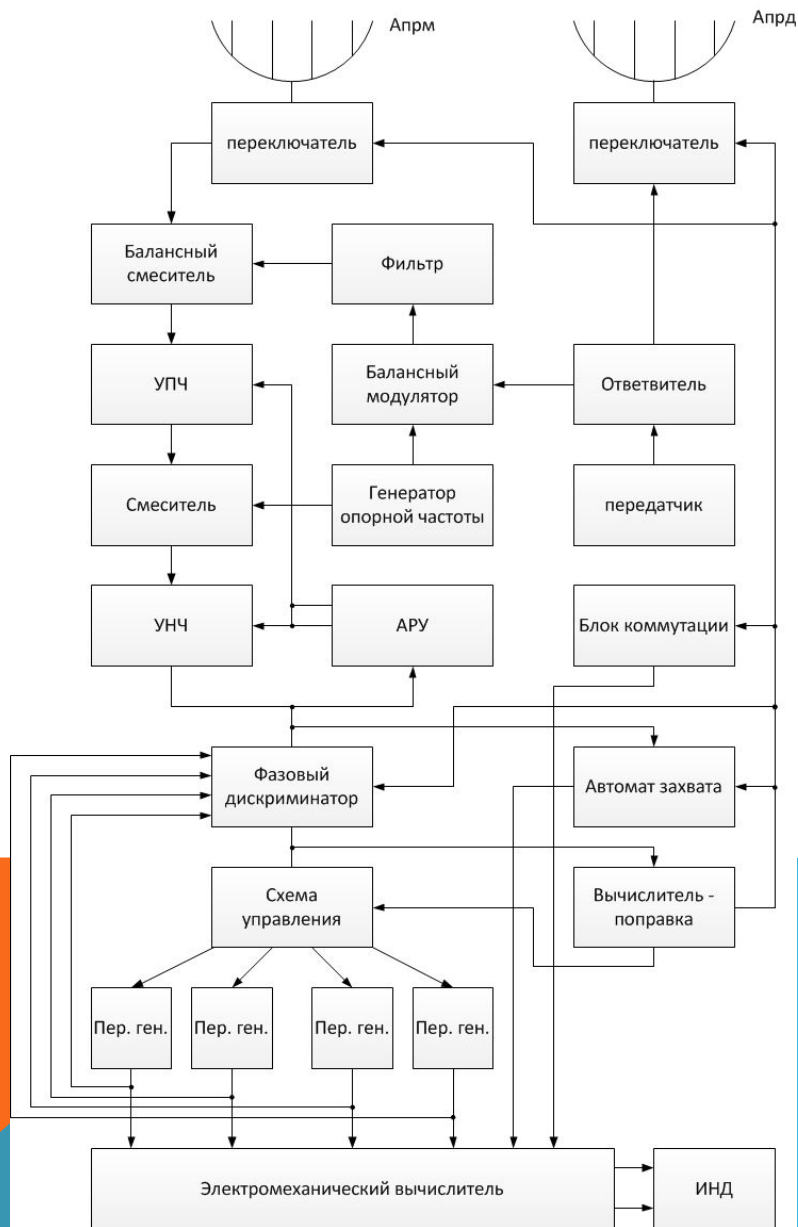
$$W_{\mathcal{H}} = \lambda_0 \cdot (\overline{f_{D2}} - \overline{f_{D3}}) / (4 \cdot \sin(\delta_0) \cdot \sin(\gamma_0))$$

Из геометрии задачи следует, что горизонтальная составляющая и угол сноса связаны уравнениями

$$W_{\Gamma} = W_X / \cos(\beta) \quad \text{tg}(\beta) = W_Z / W_X$$



# ТРЕХЛУЧЕВАЯ СИСТЕМА



$$\sigma_f = k \cdot \sqrt{\frac{F_D}{T_y}}$$

$$\sigma_W = (1/F_D) \cdot \sqrt{\frac{2F_D}{T_y}}$$

$$\sigma_\varphi = c \cdot \tan \gamma \cdot (1/F_D) \cdot \sqrt{\frac{2F_D}{T_y}}$$

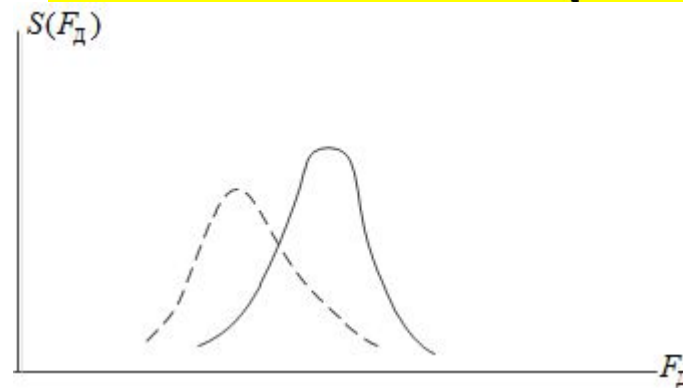


Рис. 1.13

Рис. 1.14