



Занятие 39 Радиотехнические системы предупреждения столкновений и определения скоростей

1. Допплеровский метод измерения скоростей и углов сноса.
2. Принцип построения ДИСС
3. Принцип построения БСПС

Вид занятия: Лекция

Литература:

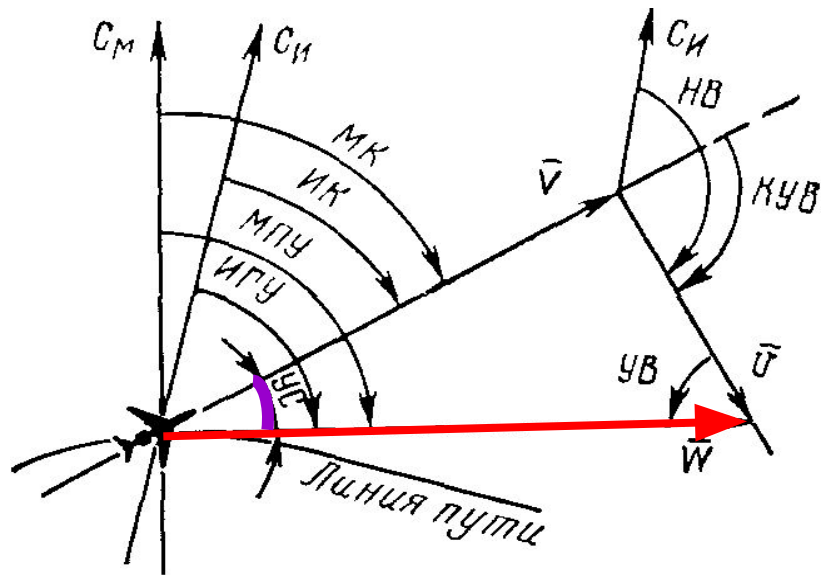
Филимонов Н. П. Радионавигационные системы: учеб. пособие. - Красноярск: Красноярский филиал СпбГУ ГА. -2016. с. 179-196



СИСТЕМЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ

Доплеровский метод измерения скорости и угла сноса (ДИСС)

Навигационный треугольник скоростей



Путевая скорость (W) – это скорость воздушного судна (BC) относительно земной поверхности.

Угол сноса – угол, заключенный между продольной осью BC и линией пути.

Эти два основных элемента полёта необходимы при счислении пути и для автономного определения действительного местоположения ЛА

Доплеровский метод измерения путевой скорости и угла сноса BC основан на эффекте доплеровского смещения частоты принимаемого сигнала относительно частоты излучаемого сигнала, возникающего за счет перемещения источника излучения относительно отражающего или принимающего сигнал объекта за время излучения.

Смещение частоты тем больше, чем больше скорость движения приемника относительно передатчика. Такой же эффект имеет место, если передатчик и приемник неподвижны относительно друг друга и находятся на движущемся объекте, а колебания принимаются после отражения от неподвижного объекта, например, земной поверхности.



СИСТЕМЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ

Доплеровский метод измерения скорости и угла сноса

Доплеровский измеритель скорости и сноса (ДИСС) — бортовое радиолокационное устройство, основанное на использовании эффекта Доплера, предназначенное для автоматического непрерывного измерения и индикации составляющих **вектора скорости, модуля путевой скорости, угла сноса и координат летательного аппарата**, автономно или в комплексе с навигационным оборудованием.

В зависимости от особенностей технической реализации различают следующие основные типы ДИСС:

- самолетные и вертолетные;
- с непрерывным и импульсным излучением;
- с излучением модулированных и немодулированных колебаний;
- с отдельной и попарной обработкой сигналов, принимаемых по лучам антенной системы.

Навигационные элементы полета – путевая скорость и угол сноса в зависимости от располагаемых средств самолетовождения на борту ВС измеряются автоматически непрерывно или дискретно экипажем.



СИСТЕМЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ

Классификация ДИСС

Самолетные ДИСС, как правило, предназначены для определения **путевой скорости и угла сноса**.

Вертолетные ДИСС позволяют определить **три составляющие вектора полной скорости** (продольную, поперечную и вертикальную).

Поскольку **вектор путевой скорости** самолета всегда направлен вперед и отклонен от продольной оси самолета на угол не более 2° - 25° , то знак доплеровского смещения частоты по каждому из лучей известен заранее и его определение в полете не требуется.

Перемещение вертолета в пространстве может быть произвольным. В ряде случаев, например, в режиме висения вектор скорости может быть равен нулю или быть вблизи нуля и изменять направление. В связи с этим, в вертолетных ДИСС необходимо измерять доплеровские частоты вплоть до значений, близких к нулю, а также определять их знак.

*Кроме того, вертолетные ДИСС характеризуются большим объемом выходных данных, поскольку наряду с измерением трех составляющих вектора скорости в полете по маршруту измеряются **путевая скорость и угол сноса**.*

В настоящее время наиболее широко используются трех- и четырехлучевые самолетные и трехлучевые вертолетные ДИСС.



МНОГОЛУЧЕВОЙ ДИСС

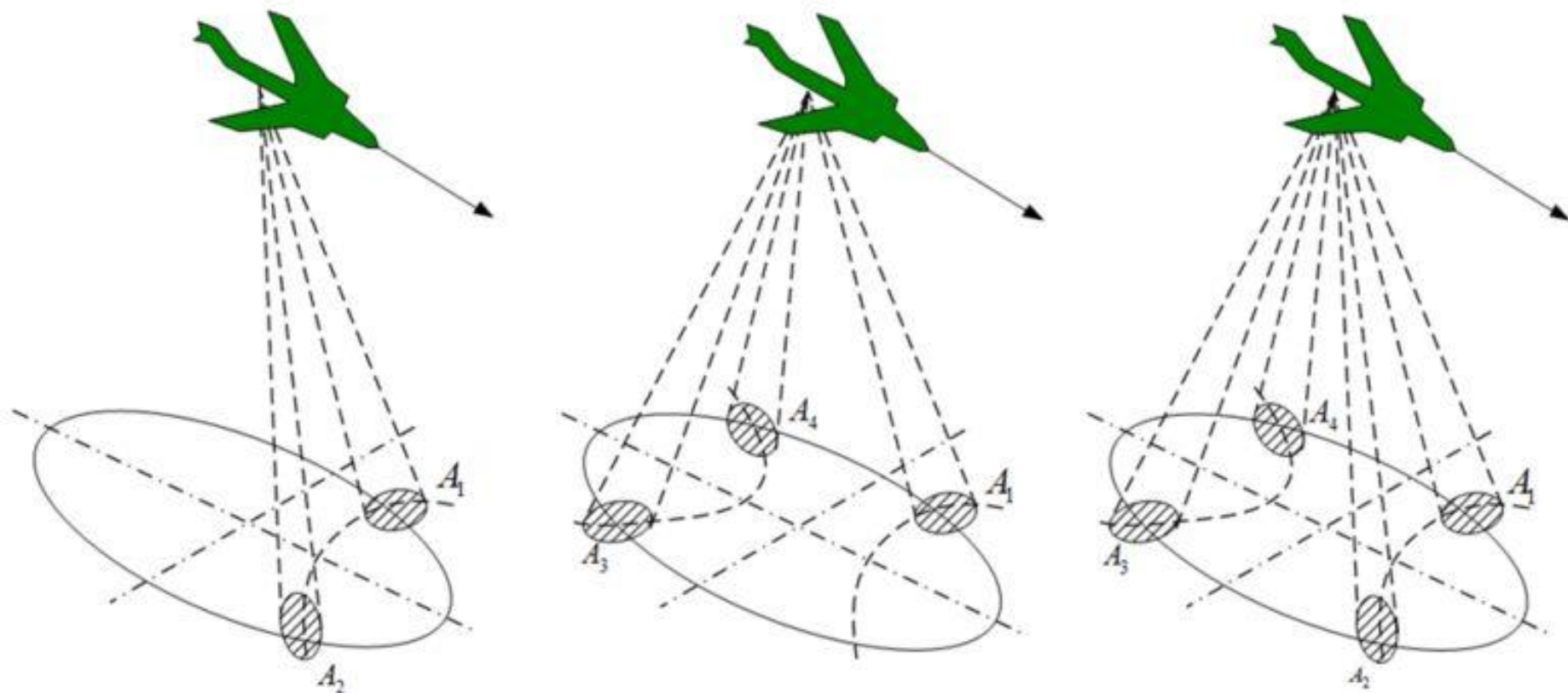


Рис. 7 Многолучевые ДИСС

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)



Теоретические основы радионавигации СИСТЕМЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ

Принцип построения ДИСС

Принцип построения ДИСС существенно зависит от режима излучения и вида модуляции излучаемых колебаний.

Различают когерентный и некогерентный способы выделения в ДИСС доплеровской частоты из отраженного сигнала.

При когерентном приеме частота отраженного сигнала сравнивается с частотой колебания передатчика. При этом возможно определение знака доплеровского смещения частоты. Когерентный прием имеет место при излучении непрерывных, частотно-модулированных и непрерывно-импульсных колебаний.

При излучении импульсных некогерентных колебаний выделение доплеровской частоты путем непосредственного сравнения по частоте излучаемых и отраженных колебаний невозможно, так как они смещены во времени. Поэтому измерения доплеровских частот в этом случае основываются на сравнении фаз (частот) колебаний, одновременно принимаемых по различным лучам антенной системы. Однако при такой обработке знак доплеровского смещения частоты определить не удастся. **Поэтому режим работы с излучением импульсных некогерентных колебаний можно применять только в самолетных ДИСС.**



Для определения трех составляющих вектора полной скорости ДИСС должен иметь не менее трех некопланарных (не лежащих в одной плоскости) лучей антенной системы. Обычно ориентация лучей ДИСС выбирается из условий применения ВС и диапазона возможных значений измеряемых навигационных параметров.

В современных ДИСС применяются жестко связанные с корпусом ВС неподвижные антенные системы. Поэтому первичная навигационная информация (составляющие полной скорости) определяется в самолетной системе координат $Ox_c y_c z_c$, ось Ox_c которой направлена по продольной оси ВС, ось Oz_c направлена в сторону правой полуплоскости, ось Oy_c перпендикулярна плоскости $Ox_c z_c$ и направлена вверх.



Теоретические основы радионавигации СИСТЕМЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ

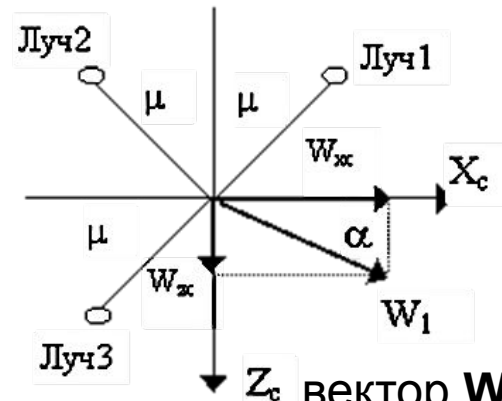
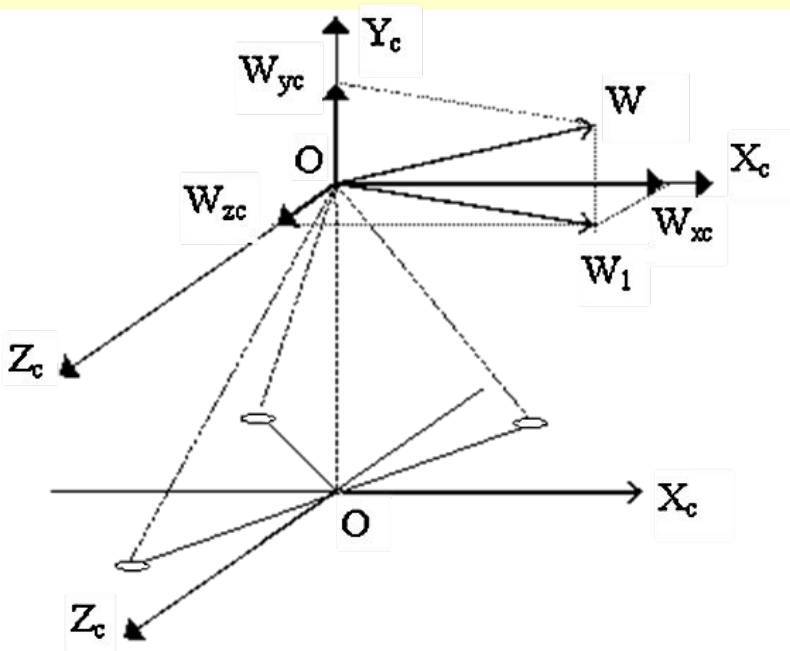
Обобщенная структурная схема и принцип работы ДИСС

В самолетной системе координат вектор полной скорости W раскладывается на три ортогональные составляющие: W_{xc} - продольную, W_{zc} - поперечную и W_{yc} - вертикальную. При этом доплеровский сдвиг частоты сигнала, принятого по каждому из лучей антенной системы, можно представить как результат сложения доплеровских сдвигов, вызываемых каждой составляющей вектора полной скорости, т. е.

$$F_{di} = F_{di}(W_{xc}) + F_{di}(W_{zc}) + F_{di}(W_{yc}),$$

где i - номер луча.

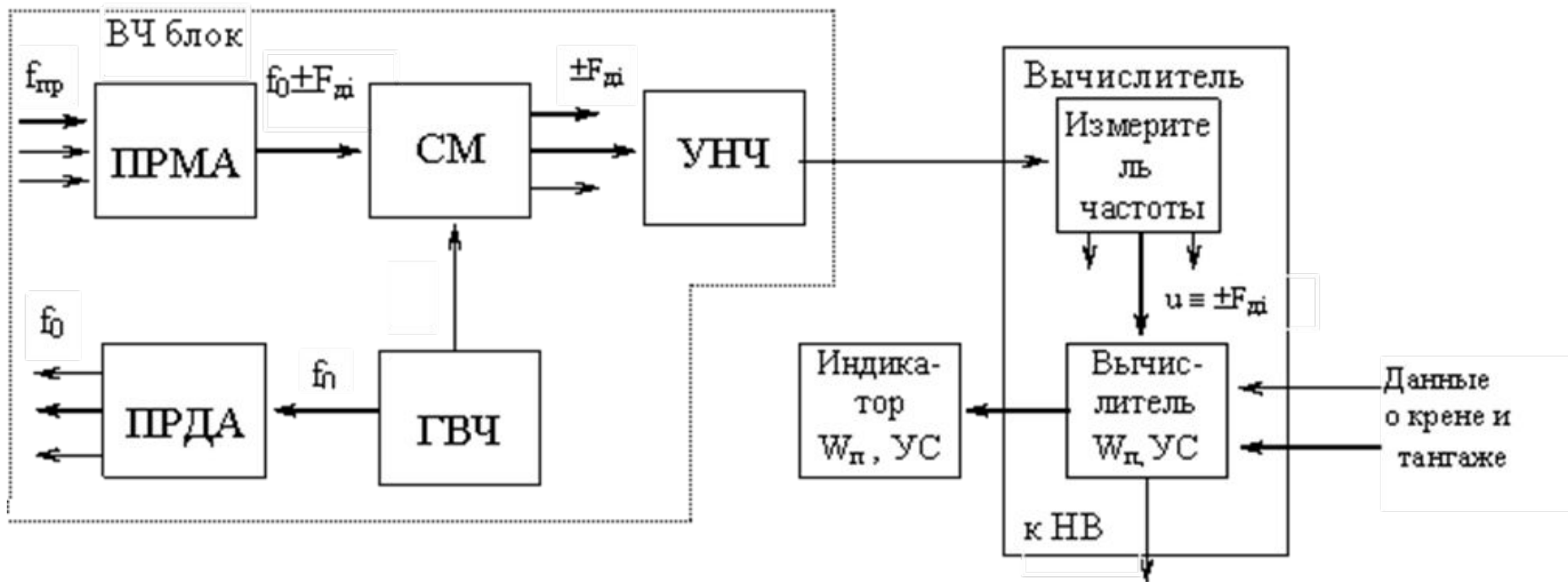
На рис. представлено расположение лучей трехлучевой ДИСС в системе координат $Ox_c y_c z_c$, начало которой совпадает с центром масс ВС.



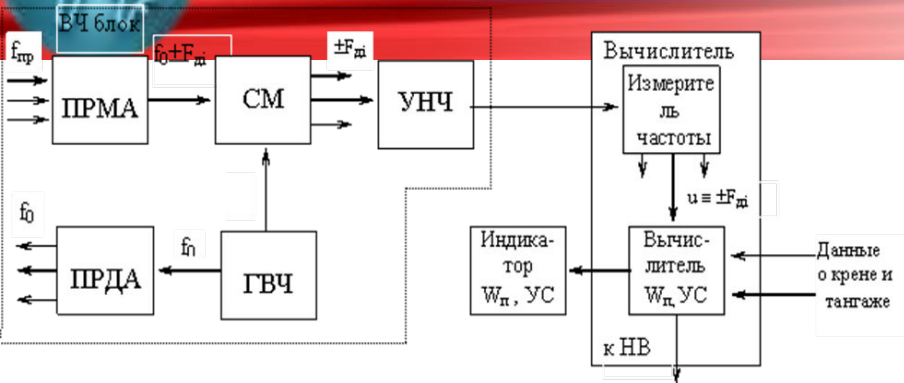
вектор W_1 представляет собой проекцию вектора полной скорости W на плоскость $Ox_c z_c$.

Обобщенная структурная схема и принцип работы ДИСС

В качестве обобщенной рассмотрим структурную схему ДИСС с излучением непрерывных немодулированных колебаний и непосредственным преобразованием отраженных сигналов на низкую частоту.



Обобщенная структурная схема и принцип работы ДИСС



Основными функциональными элементами ДИСС являются:

- генератор высокой частоты (ГВЧ), формирующий сигнал частоты f_0 ;
- передающая и приемная антенны, которые могут формировать до четырех лучей каждая;

- смеситель (СВ), на выходе которого формируется сигнал доплеровской частоты по каждому из лучей;

- усилитель низкой частоты (УНЧ), осуществляющий усиление, фильтрацию от помех и ограничение доплеровского сигнала, а в ряде случаев и определение знака доплеровского смещения частоты относительно излучаемой f_0 .

В современных ДИСС перечисленные блоки конструктивно объединены в моноблок (ВЧ блок).

Доплеровские сигналы с выхода ВЧ блока поступают на вход измерителя частоты. Напряжения, пропорциональные значениям доплеровских частот, с выхода измерителя частоты поступают в вычислитель, где с учетом данных о крене и тангаже ВС, а также данных об угловой ориентации лучей ДИСС вычисляются значения **путевой скорости W** и **угла сноса $УС$** . Полученные данные о $W_{п}$ и $УС$ поступают далее в **навигационный вычислитель (НВ)** для реализации счисления и на индикатор путевой скорости и угла сноса.



Теоретические основы радионавигации

СИСТЕМЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ

Общие сведения о бортовых системах предупреждения столкновений

Бортовая система предупреждения столкновений (БСПС) создана для помощи пилотам в предотвращении столкновений в воздухе и является независимым средством от наземных систем ОВД.

БСПС информирует летный экипаж о воздушной обстановке посредством предоставления визуальной и речевой информации, обеспечивает своевременное обнаружение конфликтных самолетов, осуществляет классификацию степени их опасности и выдает рекомендации на выполнение соответствующего вертикального маневра.

БСПС функционирует в случаях, если находящиеся в полете воздушные суда оборудованы ответчиками международного режима RBS (A/C и S), и эффективна, когда управление воздушным движением осуществляется с использованием этого же режима.

Система выдаст предупреждение о сближении даже тогда, когда приближающийся самолет с ответчиком международного режима RBS не оснащен БСПС или она у него не работает. Система БСПС совместима с наземными системами обслуживания воздушного движения.

БСПС функционирует независимо от работы бортового навигационного оборудования и наземных систем, используемых в обеспечении воздушного движения.

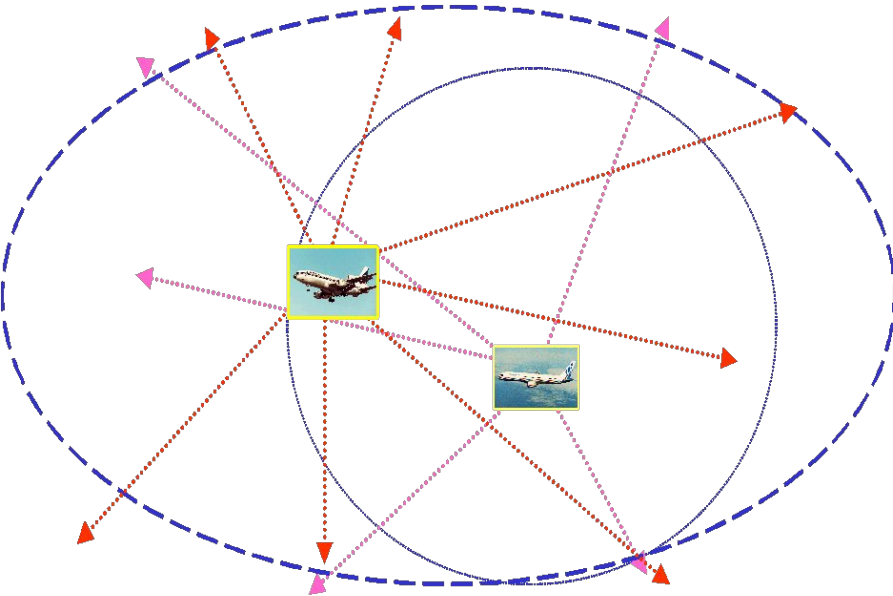


Теоретические основы радионавигации

СИСТЕМЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ

Общие сведения о бортовых системах предупреждения столкновений

Зона действия БСПС



БСПС рассчитывает и анализирует следующие параметры:

- расстояние между своим самолетом и самолетом-нарушителем;
- курсовой угол самолета-нарушителя;
- высоту и вертикальную скорость самолета-нарушителя, если от ответчика поступает сигнал об абсолютной высоте полета;
- суммарную скорость сближения между своим самолетом и самолетом-нарушителем.

Если бортовой компьютер определит, что границы безопасности могут быть нарушены, то система выдаст экипажу **уведомление (TA)** о том, что другой самолет представляет потенциальную угрозу столкновения. Если же самолет-нарушитель продолжает приближаться, то БСПС выдаст **рекомендации по расхождению (RA)** с целью обеспечения безопасного вертикального эшелонирования между своим самолетом и самолетом-нарушителем.

Рекомендации по разрешению конфликтов всегда основываются на наименьшем отклонении от траектории плана полета, при обеспечении безопасного вертикального эшелонирования. Система БСПС вырабатывает RA только в вертикальной плоскости.



Теоретические основы радионавигации

СИСТЕМЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ

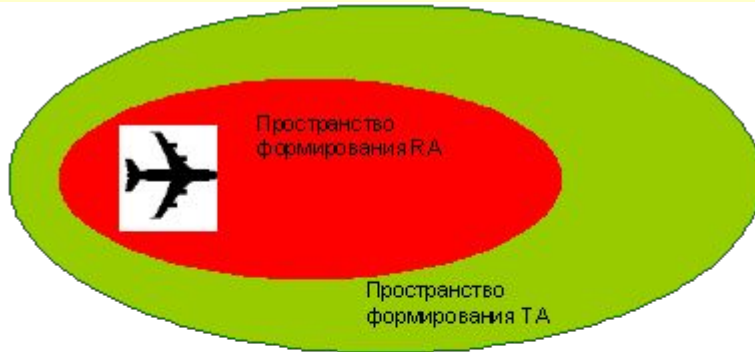
Общие сведения о бортовых системах предупреждения столкновений

БСПС вырабатывает два типа сообщений:

- **ТА**, сообщение о движении, которое помогает пилоту визуально обнаружить самолет-нарушитель и готовит летчика выполнять упреждающие действия;
- **RA**, сообщение о необходимых действиях, выполнение которых обеспечит избежать столкновения с самолетом-нарушителем.

Рекомендации RA вырабатываются только в вертикальной плоскости, при отключенном автопилоте. Пространства формирования сообщений RA и ТА изображены на рис.

Существуют два типа **RA**,
предупредительный и директивный.



Предупредительный тип **RA** дает рекомендации пилоту не изменять высоту полета (либо режим изменения высоты), чтобы избежать столкновения.

Директивный рекомендует пилоту выполнить набор или снижение с установленной вертикальной скоростью до 2500 футов в минуту (13 м/с) для разрешения конфликта.



Теоретические основы радионавигации

СИСТЕМЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ

Общие сведения о бортовых системах предупреждения столкновений

В настоящее время существует четыре вида систем БСПС:

- БСПС I является самой простейшей системой предупреждения столкновения. Она применяется на самолетах авиации общего назначения. Ее передатчик посылает и принимает сигналы ответчика в режиме С. Бортовой компьютер анализирует и представляет на индикаторе пилоту информацию о пеленге и относительной высоте полета всех самолетов в зоне обзора системы, примерно 40 миль (74 км). В системе предусмотрены цветные кодовые знаки для обозначения на дисплее самолетов, представляющих потенциальную угрозу столкновения. **Информация БСПС I получила название «Предупреждение о воздушном движении ТА (Traffic Advisory)».**

Когда пилот получает ТА, он должен попытаться визуально обнаружить конфликтное ВС и самостоятельно выполнить маневры по предотвращению столкновения. В некоторых ситуациях для разрешения конфликта пилоту требуется информация от органа ОВД.



Теоретические основы радионавигации

СИСТЕМЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ

Общие сведения о бортовых системах предупреждения столкновений

- БСПС II более совершенная система. С 1994 года ею стали оборудоваться все коммерческие воздушные суда. Она обладает всеми возможностями предыдущей системы, плюс вырабатывает рекомендации по расхождению с воздушными судами **RA (Resolution Advisory)**. При наличии на ВС БСПС II, пилоту нет необходимости запрашивать информацию у органа ОВД о конфликтном движении, достаточно строго придерживаться рекомендаций БСПС. БСПС способна одновременно отслеживать до 30 самолетов в диапазоне 14 NM (26 км) при работе в режиме A/C и 30 NM (56 км) в режиме S.



Теоретические основы радионавигации

СИСТЕМЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ

Общие сведения о бортовых системах предупреждения столкновений

- **БСПС III** обладает повышенной точностью по сравнению с предыдущими и имеет гораздо меньшие погрешности по измерению пеленга. Это позволило бы, как полагали разработчики, при выработке RA применять не только вертикальные, но и горизонтальные маневры по расхождению. Предполагалось совместить БСПС III с автопилотом. Однако, в связи с техническими трудностями, в частности, недостаточно высокой точностью определения самолета-нарушителя при одновременном осуществлении бокового и вертикального эшелонирования и др., решено было отказаться от дальнейшей разработки данного типа БСПС. Кроме того, эксперты, работающие в области БСПС, считают, что горизонтальное маневрирование не всегда может обеспечить надлежащую безопасность полетов.

- **БСПС IV** – последний вид, который активно разрабатывается в настоящее время. БСПС, контролируя воздушное пространство вокруг своего самолета, запрашивает ответчики соседних воздушных судов и посылает им сообщения о своих полетных данных. Полученные ответы анализируются и определяются те ВС, с которыми возможна вероятность столкновения (так называемые «самолеты-нарушители»).

Применение средств спутниковой навигации и новой технологии SCAN, как полагают разработчики, позволит в ближайшие годы создать систему предупреждения столкновений, обладающую более высоким уровнем эффективности функционирования и, лишенную недостатков первых трех.



Теоретические основы радионавигации

СИСТЕМЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ

Общие сведения о бортовых системах предупреждения столкновений

Для обеспечения работы бортовых систем предупреждения столкновений воздушных судов в воздухе применяются транспондеры.

Транспондер — это приемопередающее устройство, которое посылает свой радиосигнал в ответ на принятый. В английском это будет transponder (от transmitter-responder - передатчик-ответчик).

То есть эти устройства используют принцип вторичной радиолокации.

Суть этого принципа в том, что в отличие от первичной радиолокации, где локатор определяет только азимут и дальность до облучаемого объекта, вторичный локатор в ответном сигнале получает еще и идентификационные данные и параметры положения объекта в пространстве, а также некоторые другие дополнительные сведения.

На всех самолетах гражданской авиации устанавливаются такие приемоответчики. С их помощью диспетчер идентифицирует воздушное судно и имеет возможность следить за его передвижением.

СИСТЕМЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ

Транспондеры могут работать в различных режимах.

Первый и самый простой – **режим А**.

Каждому воздушному судну службой управления движением (попросту диспетчером) присваивается свой четырехзначный цифровой идентификационный код (squawk code), в просторечии «сквок». Если код не выдан диспетчером, то используется один из существующих стандартных, например **1200** – код полета по США или **7000** – код полета по Европе.



Пульт управления транспондером

Этот код пилот вводит в систему через пульт управления транспондером у себя в кабине **см. рис.** Существуют так называемые специальные коды. Например **7500** – захват самолета, **7700** -аварийная ситуация на борту. При отображении на экране радара диспетчера таких кодов автоматически срабатывает оповещение для диспетчеров.

В режиме А в ответном сигнале транспондера закодирован только сквок.

То есть самолет идентифицируется, отметка на экране локатора есть, но никаких других данных (в том числе и о высоте полета) нет. Информации минимум, поэтому для исправления ситуации был разработан **режим С**. Здесь уже вместе с кодом в сигнале присутствует информация о высоте полета. Транспондеры, использующие режим А+С, называют RBS или ATC RBS.



Теоретические основы радионавигации

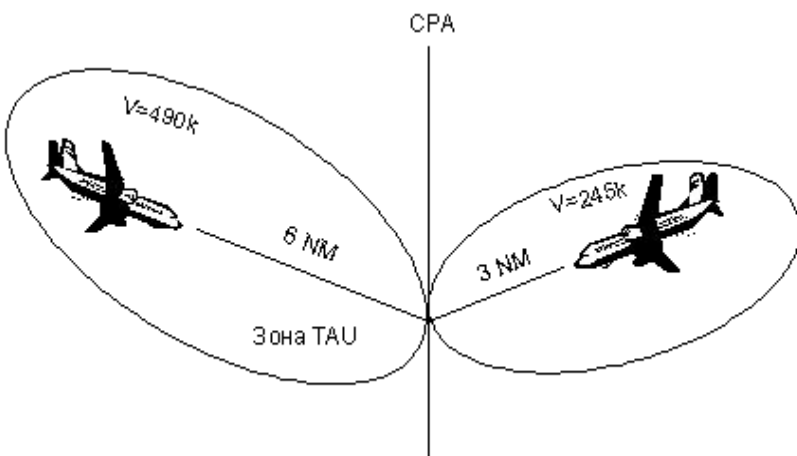
СИСТЕМЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ

Общие сведения о бортовых системах предупреждения столкновений

Следующий режим – это **режим S (selekt)**. Транспондер, работающий в этом режиме отвечает избирательно, когда запрашивают именно его, тогда как работающие в режиме A/C отвечают на любой сигнал облучения локатором. Это позволяет снизить общее засорение эфира ответами. Такой режим работы называется дискретно-адресным. **Преимущество режима S** в основном заключается в отсутствии помех и искажений присущих режиму A/C и наличии возможности осуществлять согласование рекомендаций RA между собственным ВС и самолетом-нарушителем.

Основная функция БСПС, заложенная при разработке системы в 1955 году доктором Джоном Мореллем, – оценка временного критерия, а не расстояния, так называемого порога чувствительности вокруг собственного самолета в секундах (TAU).

Проанализировав несколько соответствующих ответов, БСПС рассчитывает время полета до момента предельного схождения (CPA closest point of approach) с самолетом-нарушителем путем деления расстояния между самолетами и относительной скоростью их сближения (рис.8.6). Это временное значение является основным параметром для выработки предупреждающих сообщений и зависит от скорости ВС.



Зоны чувствительности БСПС



Теоретические основы радионавигации

СИСТЕМЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ

Общие сведения о бортовых системах предупреждения столкновений

Формирование предупреждений

Анализируя данные радиолокационного наблюдения (дальность между самолетами и направление) в обычном режиме, раз в секунду, БСПС рассчитывает относительную скорость сближения каждого ВС в зоне обзора для определения времени в секундах до момента CPA. Сигналы на выходе при выполнении алгоритма слежения (дальность до самолета, уменьшение продольного интервала в моменте CPA) обеспечивают работу алгоритмов по выработке ТА и определения угрозы столкновения.

Для каждого самолета БСПС производит тесты по дальности и по высоте, когда нет данных о высоте полета самолета-нарушителя, система считает, что данное ВС находится на одинаковой высоте с собственным самолетом. Когда результат теста дает положительный результат по дальности и по высоте, БСПС вырабатывает рекомендации ТА. В ситуации, когда нет данных о высоте самолета-нарушителя, RA не вырабатываются.

Тесты по дальности и высоте выполняются по каждому самолету-нарушителю. При положительном результате теста по какому-нибудь одному параметру БСПС начинает вырабатывать рекомендации по расхождению RA.

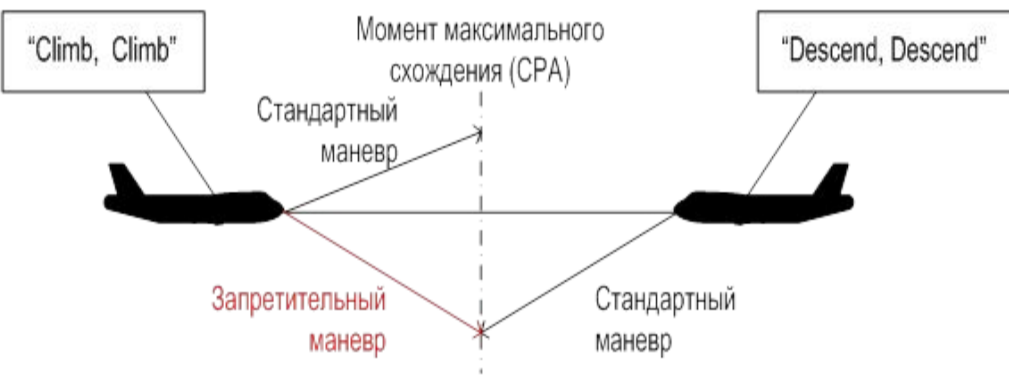


Теоретические основы радионавигации

СИСТЕМЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ

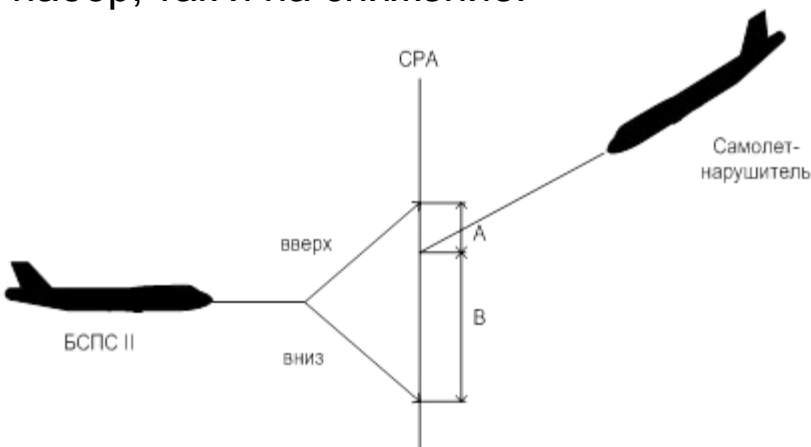
Общие сведения о бортовых системах предупреждения столкновений

Выработка RA происходит в два этапа. Первый – определение направления «вверх или вниз» в зависимости от геометрии конфликта. Второй – определение интенсивности RA. По интенсивности вырабатывается как минимум ускоренный маневр по вертикальной скорости, который обеспечит успешное достижение интервала по высоте.



Пример выработки направления RA

Наша БСПС (на рисунке левое ВС), определив момент CPA для каждого воздушного судна, прогнозируя траекторию самолета-нарушителя, вычисляет место схождения с ним. Далее система определяет возможный диапазон вертикального маневра собственного ВС, как на набор, так и на снижение.



К выбору маневра расхождения

Логика выбора маневра зависит от большей величины интервала между самолетами в момент расхождения. Интервал В в данной ситуации больше интервала А, поэтому система выбирает вариант В на снижение.

Интенсивность RA выбирается в пределах от 1500 до 4400 футов в минуту (от 7,6 до 22,3 м/с) в зависимости от ситуации



Теоретические основы радионавигации

СИСТЕМЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ

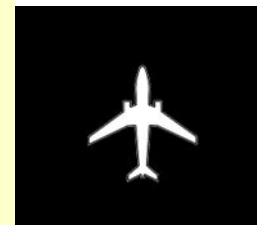
Общие сведения о бортовых системах предупреждения столкновений

Обозначения положения ВС в БСПС

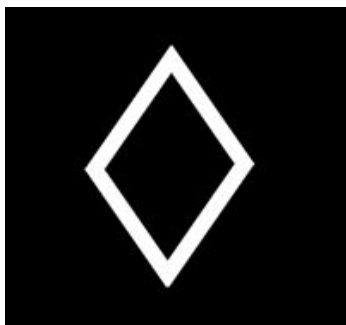


Для помощи пилоту в интерпретации информации на дисплее применяются цвет и форма.

Собственное ВС отображается в виде белого или голубого символа самолета, ориентированного вперед, цвет всегда отличен от цвета других самолетов. Его место зависит от типа применяемого дисплея.



Информация БСПС на индикаторе вертикальной скорости (VSI)



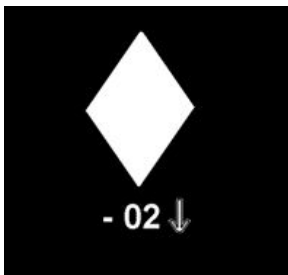
ВС, не представляющее угрозу, не выдающее данные о высоте полета. За пределами 6 NM и 1200 футов. Символ прозрачного ромба белого или голубоватого цвета.



Теоретические основы радионавигации

СИСТЕМЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ

Общие сведения о бортовых системах предупреждения столкновений



ВС, не представляющее угрозу, на 200 футов ниже собственного ВС, знак «-», находящийся в снижении со скоростью более 500 футов в минуту. Данное ВС в пределах 6 NM. Символ сплошного ромба белого или голубоватого цвета. Относительная высота отображается в сотнях футов под символом, когда он ниже собственного ВС.



ВС, по которому выдано сообщение Traffic Advisory и который представляет потенциальную угрозу. Данное ВС находится в горизонтальном полете, выше собственного самолета, знак «+», на 700 футов. Символ сплошного круга желтого или оранжевого цвета. Относительная высота отображается в сотнях футов над символом, когда данный самолет выше собственного ВС.



ВС, по которому выработано сообщение Resolution Advisory и который представляет непосредственную угрозу столкновения, находится ниже полета на 200 футов. Данное ВС, находится в наборе высоты с вертикальной скоростью более 500 футов в минуту. Символ сплошного красного квадрата. Стрелка об изменении высоты появляется справа от значения высоты немедленно после получения сообщения о начале набора или снижения со скоростью более 500 футов в минуту.



Теоретические основы радионавигации

СИСТЕМЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ

Общие сведения о бортовых системах предупреждения столкновений

На данный момент самая последняя версия системы – это TCAS II. Ранее существовала так называемая пассивная система наблюдения, которая активно не обследовала воздушное пространство, а использовала сигналы других воздушных судов, выдаваемые на запросы с земли или с других систем самолета.

Затем появилась система TCAS I, которая анализировала воздушную обстановку в радиусе 30 миль и выдавала экипажу примерную информацию о движении других воздушных судов (высота и направление полета). Эта система могла выдавать сигнал TA (Traffic Advisory), то есть предупреждение о близком прохождении другого самолета.

Однако полным соответствием стандартам ACAS на данный момент обладает только система TCAS II. Она в настоящее время установлена на большинстве коммерческих воздушных судов. Производят ее фирмы Rockwell Collins, Honeywell и ACSS.

В комплект оборудования TCAS входят:

компьютерный блок, который просчитывает варианты развития событий и определяет выдаваемые команды, **две приемопередающие антенны**, устанавливаемые сверху и снизу фюзеляжа (одна из них направленная (сверху), другая всенаправленная), **отдельные антенны** для S- транспондеров (о них далее) и **дисплей-индикатор** в кабине.

Этот дисплей-индикатор выдает информацию о перемещении близколетающих самолетов, а также визуальные команды для предотвращения столкновений (RA).