

УДК.621.396.61

Н.Д. Рысаков, В.В. Куценко, И.В. Титов, С.А. Макаров

Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МОНОИМПУЛЬСНОЙ РЛС АВТОСОПРОВОЖДЕНИЯ САМОЛЕТА НА ЭТАПЕ ПОСАДКИ С РЕАЛИЗАЦИЕЙ АМПЛИТУДНОГО СПОСОБА ПЕЛЕНГАЦИИ, АМПЛИТУДНОЙ ОБРАБОТКИ И ДОПЛЕРОВСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ОТРАЖЕНИЙ

В работе предложены возможные принципы построения моноимпульсной РЛС автосопровождения с реализацией оптимальной доплеровской фильтрации отраженных импульсов и амплитудного способа пеленгации самолета для ее включения в состав радиолокационного посадочного комплекса, обеспечивающего гарантированное управление посадкой самолета на аэродром в сложных погодных условиях. Предложены два способа обеспечения идентичности амплитудных характеристик двух приемных трактов в каждой плоскости пеленгации.

Ключевые слова: посадочный радиолокатор (ПРЛ), радиолокационный посадочный комплекс (РЛПК), взлетно-посадочная полоса (ВПП), расчетная точка посадки (РТП), равносигнальное направление (РСН), амплитудная характеристика (АХ), селекция движущихся целей (СДЦ), (адаптивный) когерентный накопитель ((А)КН), канал автосопровождения (КАС), временная автоматическая регулировка усиления (ВАРУ), автоматическое выравнивание усиления (АВУ).

Вступ

Постановка проблемы. Для обеспечения гарантированного вывода самолета на этапе посадки в расчетную точку посадки (РТП) взлетно-посадочной полосы (ВПП) в сложных погодных условиях можно в качестве высокоточного измерителя координат в составе радиолокационного посадочного комплекса (РЛПК) использовать моноимпульсную РЛС (МРЛС) автосопровождения с реализацией адаптивной доплеровской фильтрацией отраженных импульсов. Реализация в МРЛС амплитудного способа определения угловых координат самолета требует высокой идентичности амплитудных характеристик двух приемных каналов в каждой координатной плоскости. Обеспечение такой идентичности с одновременным осуществлением в приемных каналах доплеровской фильтрацией отраженных импульсов является проблемной задачей.

Анализ последних исследований и публикации. В статье [1] проанализирована возможность и условия реализации моноимпульсных амплитудного и амплитудного суммарно-разностного способов пеленгации самолета в зоне посадки с доплеровской фильтрацией отраженных импульсов в приемных трактах. В статье [2] охарактеризованы и предложены принципы реализации оптимальной доплеровской фильтрации отраженных импульсов на заключительном этапе посадки самолета в моноимпульсной РЛС автосопровождения. В работе [3] предложены возможные принципы построения радиолокационного посадочного комплекса (РЛПК), обеспечивающего гарантированное управление посадкой

самолета на ВПП в сложных погодных условиях за счет включения в состав ПРЛ комплекса канала автосопровождения (КАС), осуществляющего оптимальную доплеровскую фильтрацию отражений в когерентных накопителях (КН). Наличие такого канала СДЦ существенно усложняет работу синхронизатора и других каналов ПРЛ обработки отраженных сигналов. Кроме этого периодичность $T_{\text{изм}} \approx 1$ с измерения координат, зависящая от скорости сканирования антенн, ограничивает минимальную дальность вывода $D_v > 0$ самолета в РТП. В этом заключаются основные недостатки такого КАС в составе ПРЛ комплекса

Формулировка целей статьи. Предложить возможные принципы построения в составе РЛПК моноимпульсной РЛС автосопровождения, обеспечивающей гарантированное управление посадкой самолета на ВПП в сложных погодных условиях с реализацией амплитудного способа пеленгации и доплеровской фильтрации отраженных импульсов.

Основной материал

На рис.1 приведена предлагаемая структурная схема МРЛС автосопровождения самолета с реализацией амплитудного способа пеленгации и оптимальной доплеровской фильтрации отражений, а также устройств функционального взаимодействия с ПРЛ комплекса. В силу идентичности построения приемных трактов в плоскостях курса и угла места на схеме приведена схема построения лишь тракта курса.

Как показано в работе [1], в МРЛС автосопровождения самолета с реализацией амплитудного

способа пеленгации информация об угловом отклонении $\Delta\theta_c$ самолета от РСН в рассматриваемой плоскости заложена в соотношении амплитуд импульсов на выходах двух приемных трактов, обрабатывающих принятые двумя разнесенными по углу лепестками на ширину лепестка θ_l антенны сигналы. Эта информация сохраняется и в соотношении амплитуд накопленных импульсов U_{n1}/U_{n2} на выходах адаптивных когерентных накопителей (АКН) этих приемных трактов:

$$\Delta\theta_c = 0,5\theta_l \frac{1 - U_{f1}/U_{f2}}{1 + U_{f1}/U_{f2}}. \quad (1)$$

Выражение (1) описывает алгоритм работы вычислителя углового отклонения $\Delta\theta_c$ самолета от РСН в рассматриваемой плоскости. При этом, из-за наличия боковых лепестков антенны, расчетное выражение (1) справедливо в допусковом секторе углов $\pm\Delta\theta_d/2$ отклонения самолета от РСН. Такому сектору углов соответствуют нижний $R_{дн}$ и верхний $R_{дв}$ допуск на соотношение U_{n1}/U_{n2} амплитуд импульсов двух трактов. То есть расчетное выражение (1) справедливо при условии:

$$R_{\text{дв}} \geq \frac{U_{f1}}{U_{f2}} \geq R_{\text{дн}}. \quad (2)$$

Показано, что для антенны, диаграмму направленности которой можно описать выражением "sinx/x", допуски углового сектора и соотношения амплитуд имеют значения: $\Delta\theta_d=0,63\theta_l$, $R_{дн}=0,227$, $R_{дв}=4,4$. Эти ограничения выдвигают соответствующие требования к системе контроля и управления положением антенны при вводе нужного самолета в автосопровождение (АС).

При аналоговых принципах построения МРЛС автосопровождения цели при амплитудно-амплитудном способе пеленгации нормировка амплитудных характеристик (АХ) двух приемных трактов осуществляется с помощью логарифмических усилителей на промежуточной частоте (ЛУПЧ). При этом разность амплитуд выходных сигналов при малых углах отклонения цели от РСН оказывается пропорциональной углу отклонения [4]. В этом случае нестабильность и не идентичность АХ ЛУПЧ приводит к дополнительным погрешностям в определении направления на цель. Поэтому в предлагаемой РЛС идентичность АХ УПЧ можно осуществлять специальной схемой автоматического выравнивания усиления (АВУ), а нормировку сигналов по дальности – схемой временного автоматического регулирования усиления (ВАРУ).

Уточним схемные предложения по построению МРЛС (рис.1). Зондирующий сигнал формируется передатчиком (ПРД) с приходом нормированного по длительности импульса запуска "Зап" путем усиления в течение длительности "Зап" непрерывного

колебания синтезатора частот (СЧ) на несущей частоте f_n . СЧ так же формирует сигналы гетеродина на частоте f_r и опорные сигналы на промежуточной частоте $f_{пр}$.

Зондирующий сигнал через направленный ответвитель (НО), делители мощности и антенные переключатели АП1, АП2 подводится к соответствующим облучателям общего зеркала антенны. Отраженные импульсы, принятые парой лепестков, после АП1, АП2 обрабатываются супергетеродинными приемными трактами с фазовым детектированием. Эти тракты включают преселекторы Пр1(2), направленные сумматоры "+", смесители См1(2), усилители УПЧ1(2), два фазовых детектора (ФД) и фазосдвигающую цепочку на 90° опорного колебания на $f_{пр} - 90^\circ$.

Наличие НО в передающих трактах и сумматоров "+" в приемных трактах связано с обеспечением работы схемы АВУ. Для этого в НО доли процента энергии сигнала передатчика ответвляется, поровну делятся с помощью делителей и подаются через сумматоры "+" на рабочие входы смесителей См1(2). Разность амплитуд этих импульсов на выходах УПЧ1 и УПЧ2 свидетельствуют о расхождении АХ двух приемных трактов. Для обеспечения идентичности АХ радиоимпульсы передатчика после УПЧ1 и УПЧ2 детектируются амплитудными детекторами АД1, АД2 и подаются на схему АВУ. Схема АВУ в течении длительности "Зап" по знаку и величине разности амплитуд импульсов АД1, АД2 формирует и поддерживает в течение периода повторения соответствующее регулирующее напряжение, которое подается на управляющие входы УПЧ1 и УПЧ2. Схема же ВАРУ осуществляет нормировку по дальности коэффициентов усиления двух приемных трактов. Такой принцип управления АХ приемных трактов позволит сохранить зависимость амплитуд накопленных импульсов $U_{н\beta 1,2}$ в накопителях АКН $_{\beta 1}$ и АКН $_{\beta 2}$ трактов курса и аналогичных амплитуд $U_{н\epsilon 1,2}$ в накопителях трактов угла места лишь от углового отклонения самолета от РСН. Для обеспечения накопления импульсов $U_{н\beta 1,2}$ и $U_{н\epsilon 1,2}$ нужного самолета накопители открываются стробом автосопровождения по дальности $\tau_{стр}$.

Измерители углового отклонения самолета от РСН " U_{n1}/U_{n2} " по курсу и по углу места в соответствии с выражением (1) вычисляют углы отклонения $\Delta\beta_c$ и $\Delta\epsilon_c$ самолета от РСН при выполнении условия (2). Значения углов $\Delta\beta_c$ и $\Delta\epsilon_c$ подаются на формирователи напряжений управления ФНУ β и ФНУ ϵ и на измерители угловых координат самолета β_c, ϵ_c . Измерители β_c, ϵ_c работают по очевидным алгоритмам:

$$\begin{aligned} \beta_c &= \beta_{\text{дсi}} + \Delta\beta_{\bar{n}}, \\ \epsilon_c &= \epsilon_{\text{дсi}} + \Delta\epsilon_{\bar{n}}, \end{aligned} \quad (3)$$

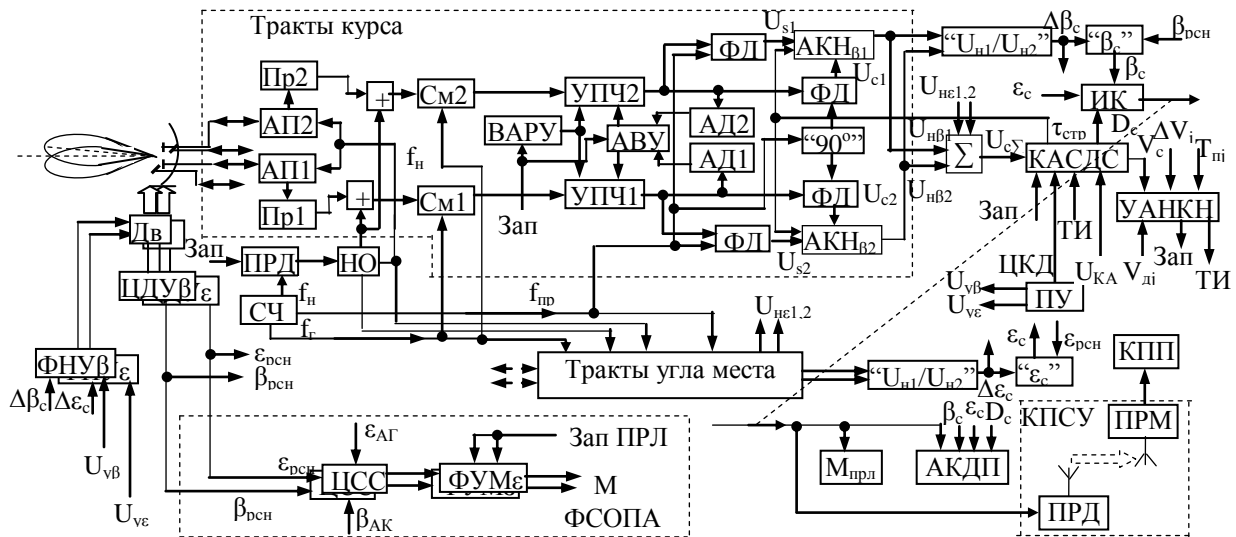


Рис. 1. Структурная схема моноимпульсной РЛС с реализацией амплитудного способа пеленгации самолета на этапе посадки в сложных погодных условиях

где $\beta_{рсн}$, $\epsilon_{рсн}$ – угловое положение РСН антенны в соответствующих плоскостях, измеряемое цифровыми датчиками углов **ЦДУβ** и **ЦДУε**.

Формирователи **ФНУβ** и **ФНУε** преобразуют значения углов $\Delta\beta_c$ и $\Delta\epsilon_c$ в напряжение управления двигателями "Дв". Двигатели обеспечивают изменение положения РСН в стороны уменьшения углов $\Delta\beta_c$ и $\Delta\epsilon_c$. При вводе самолета в АС такое напряжение $U_{уб}$, $U_{уε}$ задается с пульта управления (**ПУ**), которое формирователями **ФНУβ** и **ФНУε** нормируется по величине. В случае не выполнения условия (2) координаты $\Delta\beta_c$ и $\Delta\epsilon_c$ и углы β_c , ϵ_c не вычисляются. Отсутствие координат самолета на мониторе (**М**) **ПРЛ** свидетельствует о необходимости оператором изменить углы $\beta_{рсн}$, $\epsilon_{рсн}$ для ввода самолета в АС моноимпульсной РЛС. Для этого на **ПУ** предусматриваются органы изменения напряжений $U_{уб}$, $U_{уε}$ управления положением РСН в двух плоскостях.

Для контроля оператором за положением РСН используется формирователь сигналов отображения углового положения антенны (**ФСОПА**) на мониторе **ПРЛ**. Такой формирователь может состоять из цифровых схем сравнения (**ЦСС**) цифровых кодов угловых положений РСН антенны $\beta_{рсн}$, $\epsilon_{рсн}$ и текущих положений антенн курса $\beta_{ак}$ и глиссады $\epsilon_{аг}$ **ПРЛ** и формирователей угловых меток **ФУМε** и **ФУМβ** для монитора в очередной период повторения импульсов запуска **ПРЛ** после срабатывания **ЦСС**.

Задача адаптивной настройки периода зондирующих импульсов, существенно (до -46 дБ) снижающий уровень мешающих накоплений пассивных помех в когерентных накопителях, решается устройством адаптивной настройки когерентных накопителей (**УАНКН**) на основе измеренной скорости самолета V_c каналом АС по дальности и по

скорости (**КАСДС**). Возможный принцип построения **УАНКН** и **КАСДС** предложен в работе [2]. Поэтому ограничимся общей характеристикой решаемых задач этими устройствами.

КАСДС включает измерители дальности и скорости, а также формирователь строга АС по дальности $\tau_{стр}$.

Скорость самолета измеряется с периодичностью обновления информации **ПРЛ**, задаваемой напряжением коммутатора антенн $U_{ка}$. Дальность D_c самолета измеряется по результирующим импульсам накопления $U_{с\sum}$, представляющим сумму амплитуд импульсов $U_{н\beta 1}$, $U_{н\beta 2}$, $U_{н\epsilon 1}$, $U_{н\epsilon 2}$ четырех накопителей. Формирователь строга $\tau_{стр}$ первичные строга (строга ввода в АС) формирует по цифровому коду дальности (**ЦКД**), набранной оператором на **ПУ** дальности нужного самолета (дальности, измеренной по монитору **ПРЛ**), а последующие строга АС по **ЦКД** измеренной дальности D_c в **КАСДС**.

УАНКН включает запоминающие устройства, в которые заносятся заранее рассчитанные параметры дискретной настройки периода зондирования. К ним относятся: интервалы ΔV_j возможного изменения скоростей самолета на заключительном этапе посадки и соответствующие им оптимальные значения периода зондирования $T_{пj}$, а также контрольные скорости V_{dj} дискретного изменения $T_{пj}$. При этом по значению измеренной **КАСДС** скорости в **УАНКН** осуществляется первичный выбор и последующие изменения периода $T_{пj}$ по мере снижения посадочной скорости. Синхронизатор в составе **УАНКН** формирует последовательность импульсов запуска "Зап" с выбранным периодом $T_{пj}$ и длительностью, а также тактовые импульсы (**ТИ**) для цифровых устройств РЛС.

Измеритель координат (ИК) преобразовывает измеренные координаты $\beta_c, \varepsilon_c, D_c$ для их отображения на мониторе ПРЛ $M_{прл}$ и пересчитывает угловые координаты β_c, ε_c в линейные отклонения самолета от заданной линии посадки (ЗЛП) по курсу d_o и углу места h_o , а также дальность D_c в удаление D_o самолета от РТП. Для такого пересчета можно пользоваться приближенными выражениями:

$$\begin{aligned} d_o &\approx \pm (D_c \left| \beta_c^\delta \right| - d_{i\delta\varepsilon}), \\ h_o &\approx D_c (\varepsilon_c^\delta - \varepsilon_i^\delta) + l_{i\delta\varepsilon} \varepsilon_i^\delta + h_a, \\ D_i &\approx (D_c \cos \beta_c \cos \varepsilon_{\bar{n}} - l_{i\delta\varepsilon}) / \cos \varepsilon_i, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\beta_{\bar{n}}^\delta, \varepsilon_{\bar{n}}^\delta, \varepsilon_i^\delta$ – значения угловых координат самолета по курсу β_c и по углу места ε_c , а также заданного угла планирования $\varepsilon_{\bar{n}}$ в радианах;

$d_{прл}, l_{прл}$ – удаления МРЛС от оси ВПП и от РТП.

Первое выражение (4) для расчета d_o берется со знаком "+" для размещения МРЛС справа от ВПП относительно направления посадки и со знаком "-" – при размещении слева.

Координаты (4) передаются по каналу передачи сигналов управления (КПСУ) на борт сопровождаемого самолета для исправления экипажем ошибок пилотирования, а также на автоматизированный командно диспетчерский пункт (АКДП) для контроля. КПСУ на схеме представлен передающим ПРД и бортовым приемным ПРМ трактами с антеннами. Возможные принципы построения КПСУ авторы планируют изложить в последующих работах.

Одним из недостатков моноимпульсных РЛС является двухканальность приемных трактов для пеленгации в одной плоскости и необходимость обеспечения идентичности амплитудных и фазовых (кроме РЛС, реализующих амплитудно-амплитудный способ пеленгации) характеристик приемных трактов. Для исключения этого недостатка заслуживает внимания среди известных в теории радиолокации [5] для внедрения частотный способ уплотнения каналов. В нашем случае (решение задачи доплеровской фильтрации отражений) реализация такого способа имеет особенности. На рис.2 приведена структурная схема приемных трактов моноимпульсной РЛС пеленгации в одной плоскости с их частотным уплотнением.

В этом случае отраженные импульсы в двух приемных трактах “разносятся” по частоте на 2-3 ширины спектра Δf_c с помощью смесителей $См1$ и $См2$. Для этого $СЧ$ формирует по две пары гетеродинных f_{r1} и f_{r2} и опорных $f_{пр1}$ и $f_{пр2}$ частот сигналов, которые соответственно подаются на смесители и опорные входы $\Phi Д$. Значения названных частот по отношению к несущей частоте f_n должны удовлетворять условию:

$$\begin{aligned} f_{i\delta 1} &= |f_i - f_{a1}|, \\ f_{i\delta 2} &= |f_i - f_{a2}|, \\ f_{i\delta 2} &= f_{i\delta 1} + (2 \div 3) \Delta f_{\bar{n}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Применительно к длине волны $\lambda = 8$ мм можно порекомендовать среднюю длительность импульсов зондирования $\tau_n = 0,15$ мкс. Ширина спектра таких импульсов составит:

$$\Delta f_c \approx 14 \text{ МГц}.$$

Для обеспечения такой полосы пропускания тракта промежуточной частоты среднее значение промежуточных частот должно существенно превышать ширину спектра сигнала. Можно предложить следующее соотношение:

$$f_{i\delta} = \frac{f_{i\delta 1} + f_{i\delta 2}}{2} \approx 10 \Delta f_c.$$

Тогда в соответствии с выражением (5) можно предложить значения: $f_{пр1} \approx 160$ МГц и $f_{пр2} \approx 120$ МГц.

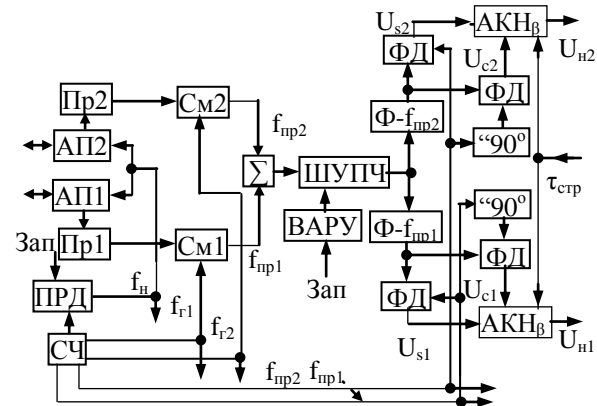


Рис. 2. Принцип частотного уплотнения приемных трактов моноимпульсных РЛС

После смесителей отраженные импульсы суммируются в "Σ" и обрабатываются широкополосным усилителем на промежуточной частоте (ШУПЧ). С учетом предложенных значений $\Delta f_c, f_{пр1}$ и $f_{пр2}$ вытекает следующее необходимое значение полосы пропускания $\Delta f_{пр}$ ШУПЧ: $\Delta f_{пр} \approx 54$ МГц.

Разделение импульсов по “своим” трактам дальнейшей обработки осуществляется с помощью фильтров "Ф- $f_{пр1}$ ", "Ф- $f_{пр2}$ ", настроенных на $f_{пр1}$ и $f_{пр2}$ и имеющих полосу пропускания $\Delta f_{\Phi} \geq \Delta f_c$. Схема ВАРУ, как и в рассмотренной схеме (рис.1), осуществляет нормировку по дальности коэффициента усиления ШУПЧ.

В заключение дадим сравнительную характеристику двум схемам построения приемных трактов МРЛС.

В первом случае (рис. 1) идентичность АХ двух приемных трактов обеспечивается схемой АВУ. Для обеспечения ее работы в фидерный тракт устанавли-

ливається додатково направлений відповідальний і сумуючі елементи "+", забезпечуючі передачу ослабленого зондируючого імпульса в прийомні тракту.

Дані елементи вносять незначительне затухання енергії сигналів як на випромінювання (НО), так і на прийом ("+"). Однак в цьому випадку пропускання каскадів УПЧ обох тракту можна оптимально узгодити з шириною спектра відбитих імпульсів. Во другому випадку в фідерному тракті відсутні додаткові елементи, вносячі затухання енергії сигналів. Але в цьому випадку ускладнюється схема побудови синтезатора частот і застосовується широкополосний УПЧ, який має пропускання в 3-4 рази більше ширини спектра.

Можливо передбачити, що в цьому випадку завдання ослаблення шумів на виходах прийомних тракту з допомогою вихідних фільтрів і фільтрів сумісителя вирішити складніше.

Висновки

В роботі обґрунтовано можливість реалізації моноімпульсного амплітудного способу пеленгації літака в зоні посадки з доплерівської фільтрацією відбитих при двох способах забезпечення ідентичності амплітудних характеристик прийомних тракту. Предложено схеми побудови таких моноімпульсних РЛС автосупроводження.

ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ МОНОІМПУЛЬСНОЇ РЛС АВТОСУПРОВОДЖЕННЯ ЛІТАКА НА ЕТАПІ ПОСАДКИ З РЕАЛІЗАЦІЄЮ АМПЛІТУДНОГО СПОСОБУ ПЕЛЕНГАЦІЇ, АМПЛІТУДНОЇ ОБРОБКИ Й ДОПЛЕРІВСЬКОЮ ФІЛЬТРАЦІЄЮ ВІДБИТТІВ

Н.Д. Рысаков, В.В. Куценко, И.В. Титов, С.А. Макаров

У роботі запропоновано можливі принципи побудови моноімпульсної РЛС автосупроводження з реалізацією оптимальної доплерівської фільтрацією відбитих імпульсів й амплітудного способу пеленгації літака для її включення до складу радіолокаційного посадкового комплексу, який забезпечує гарантоване керування посадкою літака на аеродромі у складних погодних умовах. Запропоновано два способи забезпечення ідентичності амплітудних характеристик обох прийомних тракту в кожній площині пеленгації.

Ключові слова: посадковий радіолокатор, радіолокаційний посадковий комплекс, злітно-посадочна смуга, розрахункова крапка посадки, рівносигнальний напрямок, амплітудна характеристика, селекція рухомих цілей, (адаптивний) когерентний накопичувач, канал автосупроводження, тимчасове автоматичне регулювання посилення, автоматичне вирівнювання посилення.

PRINCIPLES OF CONSTRUCTION MONOPULSE RADAR PLANE AUTOSUPPORTS AT THE LANDING STAGE WITH REALIZATION OF THE PEAK WAY OF DIRECTION FINDING AND PEAK PROCESSING AND OF THE DOPPLER FILTRATION OF REFLECTIONS

N.D. Risakov, V.V. Kucenko, I.V. Titov, S.A. Makarov

In work possible principles of creation of monopulse radar of autosupport with realization of an optimum doplerovsky filtration of the reflected impulses and a peak and peak way of direction finding of the plane for its inclusion in structure of the radar-tracking landing complex providing guaranteed management of plane landing on airfield in difficult weather conditions are offered. Two ways of ensuring identity of peak characteristics of two reception paths in each plane of direction finding are offered.

Keywords: the landing radar, a radar-tracking landing complex, a runway, a settlement point of landing, the bisignal direction, the peak characteristic, selection of moving targets, coherent store, suited autosupports, temporary automatic adjustment of strengthening, automatic alignment strengthening's.

Список литературы

1. Рысаков Н.Д. Анализ возможности реализации в составе радиолокационного посадочного комплекса моноимпульсного канала автосопровождения самолета на заключительном этапе посадки / Н.Д. Рысаков, В.В. Куценко, И.В. Титов, С.А. Макаров // Системи управління, навігації та зв'язку. – К.: ДП“ЦНДІ НУ”, 2011. – Вип. 4 (20). – С. 50 - 61.
2. Куценко В.В. Особенности реализации доплеровской фильтрации отражений в моноимпульсной РЛС автосопровождения самолета на заключительном этапе посадки / В.В. Куценко. – Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України: наук.-техн. журнал. – 2012. – № 1(7) – С. 85 – 89.
3. Рысаков Н.Д. Особенности построения радиолокационного посадочного комплекса для автоматизированного управления посадкой самолета / Н.Д. Рысаков, И.В. Титов, В.В. Куценко, А.П. Кулик // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України: наук.-техн. журнал. – 2011. – №2 (6). – С. 115 – 120.
4. Леонов А.И. Моноимпульсная радиолокация / А.И. Леонов, К.И. Фомичев. – М.: Радио и связь, 1984. – 312 с.
5. Дудник П.И. Авиационные радиолокационные устройства / П.И. Дудник, Ю.И. Чересов. – М.: ВВИА, 1986. – 533 с.

Надійшла до редколегії 12.03.2012

Рецензент: д-р техн. наук проф. Г.В. Ермаков, Академія внутрішніх військ МВД України, Харків.