

AUTOMATED CONTROL SYSTEMS

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 621.396.969:623.618.3

Э.Д. Павлыгин, А.В. Жданов, А.А. Маслов

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ И ОРГАНИЗАЦИИ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ МНОГОПОЗИЦИОННОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Павлыгин Эдуард Дмитриевич, кандидат технических наук, окончил радиотехнический факультет Ульяновского политехнического института, первый заместитель генерального директора по науке ФНПЦ АО «НПО «Марс». Имеет статьи в области статистических методов обработки сигналов. [e-mail: mars@mv.ru].

Жданов Александр Васильевич, окончил факультет «Боевые управляющие системы» Высшего военно-морского училища радиоэлектроники им. А.С. Попова, заместитель генерального директора по науке ФНПЦ АО «НПО «Марс». Имеет статьи в области синтеза и анализа информационных систем. [e-mail: mars@mv.ru].

Маслов Александр Алексеевич, окончил факультет вычислительной техники Московского инженерно-физического института, главный конструктор ФНПЦ АО «НПО «Марс». Имеет статьи в области статистических методов обработки сигналов. [e-mail: mars@mv.ru].

Аннотация

В статье рассмотрены особенности реализации и организации работы многопозиционной радиолокационной системы (МПРЛС). Приведена структура МПРЛС и рассмотрена совместная работа многофункциональных интегрированных радиолокационных комплексов (МФИРЛК) в многопозиционном режиме, режиме обеспечения электромагнитной совместимости и защите от противокорабельных ракет. Рассмотрено решение задачи по временной и пространственной синхронизациям МПРЛС, в том числе и введения единого оперативного времени, произведена оценка точности синхронизации при совместной работе МФИРЛК. Рассмотрены особенности работы МФИРЛК в активном и пассивном синхронных режимах. Приведены формулы для расчета углов положения луча пассивной (приемной) и активной фазированной антенной решетки МФИРЛК. Рассмотрены вопросы и приведены формулы для расчета углов расхождения курсовых систем и повышения точности измерения угловых координат целей. Приведены требования к сети обмена данными между абонентами МПРЛС.

Ключевые слова: многопозиционная радиолокация, временная и пространственная синхронизации, форма ведения единого оперативного времени, требования к сети обмена данными, совместное управление.

FEATURES OF REALIZATION AND ORGANIZATION OF JOINT WORK OF A MULTIPOSITIONAL RADAR SYSTEM

Eduard Dmitrievich Pavlygin, Candidate of Engineering; graduated from the Faculty of Radioengineering of Ulyanovsk Polytechnic Institute; First Deputy Director General for Scientific Affairs at Federal Research-and-Production Center Joint Stock Company 'Research-and-Production Association 'Mars'; an author of articles in the field of statistical methods of signal processing. e-mail: mars@mv.ru.

Aleksandr Vasilevich Zhdanov, graduated from the Faculty of Combat Management Systems of Higher Naval Academy of Radioelectronics named after A.S. Popov; Deputy Director General for Scientific Affairs at Federal Research-and-Production Center Joint Stock Company 'Research-and-Production Association 'Mars'; an author of articles in the field of synthesis and analysis of information systems. e-mail: mars@mv.ru.

Aleksandr Alekseevich Maslov, graduated from the Faculty of Computer Engineering of Moscow Engineering Physics Institute; Chief Designer at Federal Research-and-Production Center Joint Stock Company 'Research-and-Production Association 'Mars'; an author of articles in the field of statistical methods of signal processing. e-mail: mars@mv.ru.

Abstract

The article considers features of realization and organization of the Multipositional Radar System (MRS) functioning. The MRS structure is given. The joint functioning of Multifunctional Integrated Radar Complex (MIRC) in multipositional mode, electromagnetic compatibility (EC) and Anti-Surface Ship Missile defense mode is considered. The solution of MRS time and space synchronization task including unified imaginary time is examined. Accuracy of synchronization in case of joint functioning of MIRC is assessed. The features of MIRC functioning in active and passive synchronous modes are considered. The formulae for calculation of an angle of a passive (receiving) and active phased array position (APHA) of MIRC are given. The issues and formulae for calculation of angles on divergence of heading systems and increasing of accuracy of measuring angular coordinates of a target are considered. Requirements for data-change networks of MRS user nodes are given.

Key words: multipositional radar, time and space synchronization, unified imaginary time form, requirements for data-exchange networks, joint control.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время большие перспективы по улучшению тактико-технических характеристик (ТТХ) радиолокационных систем (РЛС), работающих в сложных условиях применения, связаны с использованием принципов многопозиционной радиолокационной системы (МПРЛС) [1–3], обеспечивающих за счёт разнесения в пространстве передающих и приёмных позиций МПРЛС совместное радиолокационное наблюдение, что позволяет более эффективно по отношению к однопозиционным РЛС извлекать информацию, заключённую в пространственных характеристиках электромагнитного поля. В МПРЛС информация извлекается из нескольких разнесённых в пространстве участков поля рассеяния целей или поля излучения источников сигнала, что позволяет повысить информативность, точность, пропускную способность, помехоустойчивость, электромагнитную совместимость (ЭМС), скрытность, живучесть, надёжность и другие характеристики.

Следует отметить, что у большого разнообразия МПРЛС наибольшее распространение получили пространственно-некогерентные МПРЛС с объединением информации на уровне единичных радиолокационных отметок и траекторий. Во многих случаях такие МПРЛС создаются путём объединения в своём составе существующих однопозиционных РЛС.

РЕШАЕМЫЕ ЗАДАЧИ И СТРУКТУРНАЯ СХЕМА МПРЛС

Основные принципы создания МПРЛС изложены в [1–5], однако в данных работах не рассмотрен ряд вопросов, решение которых позволит обеспечить техническую реализацию и улучшение характеристик МПРЛС. К ним следует отнести решение следующих задач:

- совместного управления излучением и приёмом сигналов в разнесённых подвижных и неподвижных позициях;
- временной и пространственной синхронизаций активной и пассивной составляющих МПРЛС, размещённых на разных позициях;
- реализации сети обмена данными (СОД) и метки времени (МВ) между абонентами МПРЛС;
- взаимной координатной привязки и учёта расхождения курсовых систем мобильных МПРЛС;
- реализации МПРЛС при размещении на подвижных позициях с большой базой.

Рассмотрим решение указанных задач на основе структурной схемы МПРЛС, представленной на рисунке 1.

На данной схеме приведены следующие обозначения:

СРНС – спутниковая радионавигационная система (ГЛОНАСС/GPS), обеспечивающая передачу с помощью спутниковой навигационной аппаратуры (СНА) в многофункциональный интегрированный радиолокационный комплекс (МФИРЛК) информации о координатах расположения корабля, МВ и значении времени на момент их формирования;

РЛМ 1–РЛМ k – радиолокационные модули различных диапазонов работы;

МСОУ – модуль совместной обработки и управления;

МС – модуль синхронизации;

КС – комплекс связи, обеспечивающий между МФИРЛК тактической группы (ТГ) обмен информацией о координатах корабля, планах совместной работы, МВ и значении времени на момент их формирования;

1–11 – виды передаваемой информации;

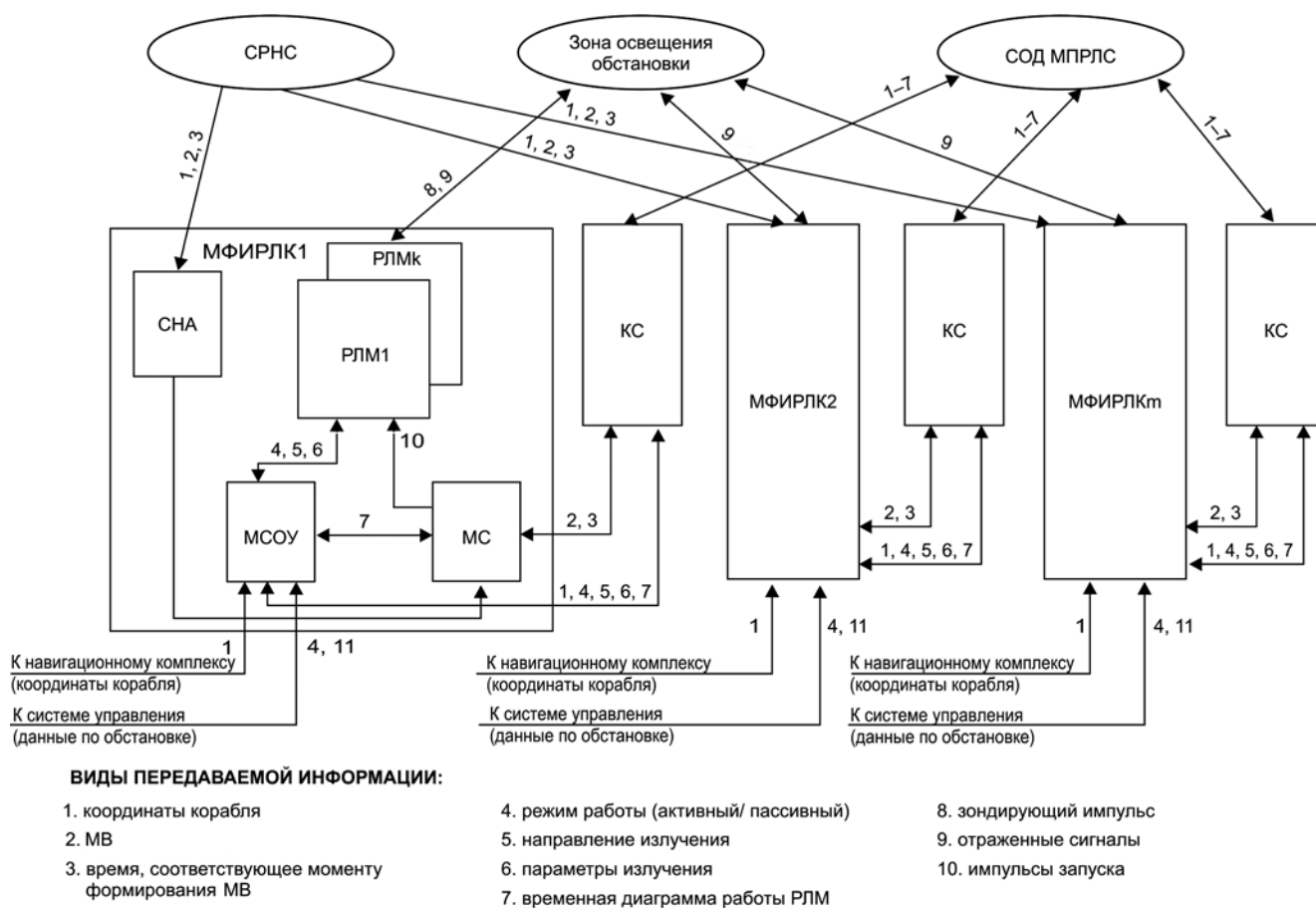


Рис. 1. Структурная схема взаимодействия МФИРЛК в составе МПРЛС

k – число РЛМ, работающих в разных диапазонах;

m – число подвижных систем (кораблей, на которых установлено МФИРЛК);

ФОРМИРОВАНИЕ ПЛАНА СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ МФИРЛК

На ведущем МФИРЛК циклически производится формирование и реализация плана совместной работы всех МФИРЛК ТГ. Длительность цикла обновления плана определяется динамикой изменения обстановки и находится в пределах от доли секунд до десятков минут.

ФОРМИРОВАНИЕ ПЛАНА РАБОТЫ В МНОГОПОЗИЦИОННОМ РЕЖИМЕ

В данном режиме с помощью активных РЛМ МФИРЛК МПРЛС в соответствии с заданным планом происходит засветка заданного пространства и с учетом известных координат, заданных направлений и характера излучений с помощью пассивного МФИРЛК и приемной части активного МФИРЛК происходит прием и обработка отраженных сигналов, на базе которых происходит обнаружение и сопровождение целей с формированием координат и элементов движения целей.

Для организации работы МФИРЛК ТГ в многопози-

ционном режиме при разработке плана формируются следующие данные:

- а) определяются активные и пассивные РЛМ в составе МФИРЛК ТГ, а также координаты кораблей ТГ;
- б) определяются направление и параметры излучения для всех значений времени запуска передающих устройств активных МФИРЛК и моменты начала излучения с привязкой к единому времени, сформулированному на всех МФИРЛК;
- в) сформулированный план для его реализации передается по каналу связи на все МФИРЛК МПРЛС.

ФОРМИРОВАНИЕ ПЛАНА РАБОТЫ МФИРЛК для ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭМС

Для обеспечения ЭМС при формировании плана совместной работы МФИРЛК для всех активных и пассивных радиолокационных и оптоэлектронных модулей формируются временные диаграммы работы, направления и параметры излучения, при которых распределенные пространственный, временной и частотный ресурсы обеспечивают отсутствие взаимовлияния при одновременной работе РЛМ.

Сформулированный план для его реализации передается по каналу связи на все МФИРЛК МПРЛС.

ФОРМИРОВАНИЕ ПЛАНА РАБОТЫ МФИРЛК для защиты ОТ ПРОТИВОКОРАБЕЛЬНЫХ РАКЕТ (ПКР)

Для обеспечения защиты объектов от ПКР на ведущем носителе циклически решается задача по формированию такого распределения в пространстве активных и пассивных МФИРЛК, при котором минимизируется вероятность их поражения. Сформированный план, в состав которого входят режимы работы (активный/пассивный), направление и параметры излучения, временная диаграмма работы, передается для ее реализации по защищенным каналам связи на все МФИРЛК МПРЛС.

ВРЕМЕННАЯ И ПРОСТРАНСТВЕННАЯ синхронизации

При решении задач по временной и пространственной синхронизациям необходимо обеспечить [6]:

- на всех позициях точное ведение единого времени;
- точное синхронное формирование на всех позициях импульсов запуска (ИЗ) активных и пассивных РЛС;
- точное формирование сигналов запуска приёмных устройств пассивных позиций РЛС (стробов приёмных устройств);
- формирование положения приёмных лучей активной фазированной антенной решетки (АФАР) пассивного МФИРЛК, расположенного на подвижных позициях.

Одним из путей решения данной проблемы является применение в составе МПРЛС СРНС, которые являются высокоточными системами навигации и определения времени. С внедрением космических СРНС ГЛОНАСС (Россия) и GPS (США) появилась возможность удовлетворения большинства заданных требований по точности для решения задач функционирования в составе МПРЛС.

Основными достоинствами этих типов СРНС являются:

- высокая точность одновременного определения текущих координат и скорости, не зависящая от продолжительности полёта, времени суток, сезона и погодных условий;
- глобальная зона действия;
- неограниченная пропускная способность;
- скрытность проведения навигационных определений потребителем;

- отсутствие ограничений по высотности для летательных аппаратов, использующих околосреднее пространство;

- возможность при одном и том же радионавигационном поле применять приёмоиндикаторную аппаратуру различных классов точности и оперативности с различным составом определяемых параметров.

Из анализа таблицы 1 следует, что некоторые образцы СНА позволяют получить требуемую точность. Однако необходимо отметить, что при ведении боевых действий использование систем ГЛОНАСС может оказаться затруднительно или невозможно.

С учётом изложенного использование СНА позволяет обеспечить:

- формирование единого времени;
- определение координаты объектов.

Однако при этом следует отметить, что применение СНА не обеспечивает управления положением луча принятой отметки на пассивной позиции с учетом угла расхождения курсовых систем.

Кроме этого, несмотря на высокие точностные характеристики по сравнению с ранее существующими средствами навигации, практическое применение СРНС осложняется значительным временем первоначального поиска и вхождения в синхронизм, возможностью срыва слежения за навигационными параметрами сигналов при их кратковременном пропадании, интенсивных фазовых и амплитудных флуктуациях, а также малых отношениях сигнал/шум на входе приёмного устройства. Помимо этих факторов, достижение заданных значений соответствующих СРНС зависит от исправного функционирования подсистемы навигационных космических аппаратов и наземного командно-измерительного комплекса.

Поэтому в случае использования СРНС в качестве основного средства навигации могут быть не удовлетворены требования потребителей по доступности и целостности. Для достижения требуемой устойчивости в работе РЛС в аномальных условиях, а также в условиях постановки противником радиопомех следует осуществлять другие способы синхронизации, основанные на использовании каналов связи.

ФОРМИРОВАНИЕ ЕДИНОГО ВРЕМЕНИ

Таблица 1

Точностные характеристики СНА

Характеристики	СН-5831	СН-4706	NV08C-MCM NV08C-CSM	СН-5701
Точность определения координат (СКО), м	2,5	5	2,5	10
Точность определения высоты (СКО), м	3	8	3	15
Погрешность определения вектора скорости, м/с	0,05	0,1	0,05	0,1
Погрешность определения времени, нс	25	25	15	25
Количество каналов приёма	32	24	32	64

На всех МФИРЛК осуществляется точное формирование оперативного времени, которое производится с помощью МС в двух режимах:

- с помощью СНА;
- без СНА с использованием каналов связи.

ФОРМИРОВАНИЕ ОПЕРАТИВНОГО ВРЕМЕНИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СНА

При использовании СНА в счетчики времени МС всех МФИРЛК записывается время, принимаемое с упреждением от СНА. Затем принимаемой от СНА МВ производится запуск всех счетчиков времени в МС МФИРЛК. В дальнейшем при поступлении очередных меток и значений времени производится контроль и коррекция времени, формируемого МС. Заполнение сигналов времени осуществляется от высокостабильных генераторов, применение которых позволяет осуществлять формирование точного оперативного времени методом экстраполяции при неустойчивой работе СНА.

Для учета аппаратной и эфирной задержек распространения сигналов производится циклическое формирование времени рассогласования. С этой целью с активного на пассивный МФИРЛК с помощью КС производится передача координат корабля, меток и значений времени на момент их формирования (t_{np}). На пассивном МФИРЛК при приеме МВ производится фиксация времени (t_{np}) её приема и осуществляется вычисление времени рассогласования $t_{pac} = t_{np} - t_{nep}$, которое учитывается при формировании ИЗ модулей пассивного МФИРЛК. Координаты корабля с активных МФИРЛК используются на пассивных МФИРЛК для формирования направления луча АФАР. Кроме этого, время рассогласования можно рассчитать по формуле:

$$t_{pac} = \frac{\sqrt{(Xa - Xn)^2 + (Ya - Yn)^2 + (Za - Zn)^2}}{C} + t_{зд.ан}, \quad (1)$$

где Xa, Ya, Za и Xn, Yn, Zn соответственно – координаты активного и пассивного МФИРЛК;

$t_{зд.ан}$ – аппаратное время задержки;

C – скорость распространения электромагнитных волн.

При длительном замирании и при нестабильной работе в условиях помех точное ведение относительного времени необходимо осуществлять без СНА с использованием помехоустойчивого канала связи.

ФОРМИРОВАНИЕ ОПЕРАТИВНОГО ВРЕМЕНИ БЕЗ СНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДУПЛЕКСНОГО КАНАЛА

При наличии дуплексного канала связи и при необходимости осуществления скрытности работы, а также в целях повышения точности формирования единого времени осуществляется следующим образом:

- на активном МФИРЛК осуществляется запуск счетчика времени, при этом начальное значение времени

может быть задано от системы единого времени вручную или использовано экстраполированное значение времени, сформулированного с помощью СНА;

- на активном МФИРЛК осуществляется формирование и передача по радиоканалу связи на пассивный МФИРЛК меток времени, соответствующего моменту формирования МВ на передачу (t_{nep});

- на приемном МФИРЛК осуществляется прием и обратная передача по радиоканалу на активный МФИРЛК, на котором производится обратный прием МВ с фиксацией времени её приема (t_{np}), и рассчитывается время, вызванное аппаратной и эфирной задержками передачи сигнала, и определяется по формуле:

$$t_{pac} = \frac{t_{np} - t_{nep}}{2}; \quad (2)$$

- на активном МФИРЛК с учетом t_{pac} производится формирование метки и значения времени на запуск счетчика времени на пассивном МФИРЛК;

- осуществляется передача по каналу связи метки и значения времени на момент её формирования, а также t_{pac} , которое необходимо учитывать при формировании ИЗ пассивного МФИРЛК.

На приемном МФИРЛК осуществляется запись приемного времени в счетчик времени, а после прием МВ с последующим запуском и заполнением его сигналами от стабильного генератора. При каждом последующем поступлении метки и значения времени её формирования на пассивном МФИРЛК производится проверка правильности формирования и при необходимости осуществляется коррекция счетчика времени и подстройка частоты высокоточного генератора, дополнительно производятся сглаживание и экстраполяция времени рассогласования. В данном случае в модулях синхронизации осуществляется формирование единого времени, аналогично формируемого с помощью СНА.

ТОЧНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ВРЕМЕНИ БЕЗ СНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИМПЛЕКСНОГО КАНАЛА СВЯЗИ

На активном МФИРЛК осуществляется запуск счетчика времени, при этом начальное значение времени может быть задано от системы единого времени вручную или использовано экстраполированное значение времени, сформулированного с помощью СНА.

На активном МФИРЛК осуществляется формирование и передача на пассивный МФИРЛК следующих величин:

- времени рассогласования (t_{pac}), определяемого по формуле (1) по известным координатам расположения кораблей ТГ и учитывающего время задержки передачи сигналов между кораблями;

- метки и значения времени её расположения на временной оси с учетом t_{pac} .

На пассивном МФИРЛК принятое время записывается в счетчик формирования времени МС, запись которого производится принятой МВ.

Дальнейшее формирование времени осуществляется путем заполнения счетчика импульсами, сформированными с помощью высокостабильного генератора. Для коррекции времени, вызванного движением объектов, выдача МВ и соответствующего им значения времени осуществляется циклически, темп которого зависит от относительного значения радиальной скорости движения объектов и находится в пределах от секунд до десятков минут.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ СИНХРОНИЗАЦИИ

При формировании единого времени с помощью СНА погрешность временного положения ИЗ определяется по формуле:

$$\zeta_{t_{из}} = \sqrt{\zeta_{t_{сна}}^2 + \zeta_{t_{экстр}}^2}, \quad (3)$$

где $\zeta_{t_{сна}}$ – среднеквадратическое отклонение (СКО) определения времени с помощью СНА;

$$\zeta_{t_{экстр}} = \frac{\Delta}{2\sqrt{3}}, \quad (4)$$

где $\Delta=1/F_{кв}$ – шаг и частота квантования временного интервала между сигнальными МВ и поступающими от СНА с периодом 1 с.

Поэтому $\zeta_{t_{из}} \cong \zeta_{t_{сна}}$ и минимальное значение $\zeta_{t_{из}}$ в соответствии с таблицей 1 составляет $\zeta_{t_{из}} = 15$ нс.

При $F_{кв} = 1$ ГГц значение $\zeta_{t_{экстр}} \approx 0,3$ нс.

При формировании единого времени с использованием каналов связи величины t_{np} и t_{nep} , необходимые для расчета $t_{рас}$, согласно (2) определяются по формулам:

$$t_{np} = t_{nep} + t_{3nep} + t_{3np}, \quad (5)$$

$$t_{3nep} = t_{3неpa} + D_{3nep}/C + t_{3npn}, \quad (6)$$

$$t_{3np} = t_{3неpn} + D_n/C + t_{3npa}, \quad (7)$$

где $t_{3неpa}$, t_{3npn} – время аппаратной задержки передачи МВ на активной и пассивной позициях;

t_{3npa} , $t_{3неpn}$ – время аппаратной задержки приёма МВ на активной и пассивной позициях.

C – скорость распространения радиоволн;

D_n – дальность между активной и пассивной позициями.

С учетом (5–7) время рассогласования равно:

$$t_{рас} = 1/2(t_{3неpa} + 2D/C + t_{3npn} + t_{3неpn} + t_{3npa}). \quad (8)$$

На практике $t_{3неpa} \cong t_{3неpn} = t_{3nep}$; $t_{3npa} \cong t_{3npn} = t_{3np}$, тогда

$$t_{рас} = 2D_n/C + 2t_{3nep} + 2t_{3np}. \quad (9)$$

Погрешность определения времени рассогласования определяется по формуле (10):

$$\zeta_{t_{рас}} = \sqrt{\zeta_{D_n}^2 + \zeta_{t_{3np}}^2 + \zeta_{t_{3nep}}^2}. \quad (10)$$

Если ζ_{D_n} составляет 3 м, то $\zeta_{D_n}/C = 8$ нс.

Учёт аппаратных задержек осуществляется программным способом путём вычитания из измеренных значений постоянной величины дальности D_{const} определяемой при юстировке методом сравнения измеренной дальности с известным расстоянием между позициями, или его измерения с помощью отъюстированной РЛС. При практической реализации $\zeta_{D_n} \leq 3$ м и $\zeta_{t_{nep}} = \zeta_{t_{np}} \leq 5$ нс.

В этом случае $\zeta_{t_{рас}} \leq 17,5$ нс, тогда погрешность формирования единого времени в данном случае можно определить по формуле:

$$\zeta_{\delta 17,5} = \sqrt{\zeta_{t_{рас}}^2 + \zeta_{t_{экстр}}^2}, \quad (11)$$

где $\zeta_{t_{экстр}}^2$ – СКО экстраполяции времени между моментами корректировки единого времени,

$$\zeta_{t_{экстр}} = \frac{\delta t_{кор}}{2\sqrt{3}}, \quad (12)$$

где δ – относительный уход частоты высоко стабильного генератора;

$t_{кор}$ – интервал между моментами корректировки единого времени.

Если $\delta \leq 10^{-10}$, $t_{кор1} = 10$ с, $t_{кор2} = 60$ с, $t_{кор3} = 300$ с, то

$$\zeta_{t_{экстр1}} \leq 0,15 \text{ нс}, \quad \zeta_{t_{экстр2}} \leq 0,9 \text{ нс}, \quad \zeta_{t_{экстр3}} \leq 4,5 \text{ нс}.$$

Тогда величина погрешности формирования единого времени с учетом экстраполяции не превышает 18 нс.

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ МФИРЛК В АКТИВНОМ СИНХРОННОМ РЕЖИМЕ

При каждом получении плана в пределах заданного времени работы осуществляется следующее:

- МФИРЛК переводится в ждущий режим работы;
- производится запуск ведения оперативного времени в МС;
- с помощью МСОУ перед каждым формированием ИЗ РЛМ настраивается на излучение в данном направлении с заданными параметрами;
- с помощью МС методом сравнения заданных моментов излучения с текущим значением времени производится формирование ИЗ;
- при поступлении ИЗ РЛМ осуществляет излучение энергии в заданном направлении и производит прием и обработку отраженных сигналов, обеспечивающих обнаружение и сопровождение целей с выработкой по ним координат и элементов движения целей.

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ МФИРЛК В ПАССИВНОМ СИНХРОННОМ РЕЖИМЕ

При каждом получении плана в пределах заданного времени работы осуществляется следующее:

- МФИРЛК переводится в ждущий режим работы;
- производится расчёт начала формирования стро-бы приёмного устройства МФИРЛК по формуле:

$$t_{\text{стро́ба}} = t_{\text{зан}} + t_{\text{рас}} \quad (13)$$

где $t_{\text{зан}}$ – момент формирования i -го ИЗ активного модуля;

- с помощью МСОУ обеспечивается подготовка к формированию положения луча приемной антенны с учетом известных направлений на активный МФИРЛК и заданного направления луча на активном модуле МФИРЛК;

- с помощью МС осуществляется формирование ИЗ пассивного модуля МФИРЛК;

- с помощью ИЗ осуществляется формирование положения луча приемной антенны и обеспечивается прием отраженного сигнала от целей, возникающих от воздействия зондирующего импульса, сформированного активным модулем МФИРЛК;

- по результатам принятых отраженных сигналов осуществляется обнаружение и сопровождение целей и формирование по ним координат и элементов движения.

На пассивной приёмной позиции с помощью ИЗ, формируемых синхронно с ИЗ активной МФИРЛК, производится измерение суммарной дальности.

Дальность до цели определяется по формуле:

$$D_{\text{цп}} = \frac{D_{\text{ацп}}^2 - D_{\text{ан}}^2}{2(D_{\text{ацп}} - D_{\text{ан}} \cdot \cos \gamma_{\text{м}})}, \quad (14)$$

где $D_{\text{цп}}$ – дальность от цели до пассивной позиции;

$D_{\text{ацп}}$ – дальность от активной позиции до цели;

$D_{\text{ан}}$ – дальность между активной и пассивной позициями на момент приёма сигналов от цели;

$\gamma_{\text{м}}$ – угол пассивной фазированной антенной решетки (ФАР) на момент приёма отражённых от цели сигналов.

Значение $D_{\text{ан}}$ можно сформировать любым из следующих методов:

- измерением радиолокационным способом с помощью активного МФИРЛК с последующей передачей по каналу связи значения $D_{\text{ан}}$ на пассивную МФИРЛК;

- методом обнаружения на пассивном МФИРЛК зондирующего импульса, излучаемого активным МФИРЛК.

При известных координатах расположения носителей $D_{\text{ан}}$ рассчитывается по формуле:

$$D_{\text{ан}} = \sqrt{(x_a - x_n)^2 + (y_a - y_n)^2 + (z_a - z_n)^2}, \quad (15)$$

где x_a, y_a, z_a и x_n, y_n, z_n соответственно координаты активного и пассивного МФИРЛК.

Углы положения приёмной антенны формируются на основании следующих известных величин:

- углов расположения луча АФАР активной МФИРЛК;

- относительных значений дальности $D_{\text{ан}}$ и пеленга $\Pi_{\text{ан}}$ между активной и пассивной позициями МФИРЛК;

- величинами расхождения гирокомпасов активной и пассивной позиций;

- дальности расположения зондирующего импульса в луче АФАР, определяемой по формуле: $D_{\text{зи}} = ct$, где t – время, отсчитываемое от момента формирования ИЗ $t_{\text{зи}}$.

Минимальное время переключения луча в очередное положение определяется временем переключения цифровых фазовращателей АФАР, при этом изменения фаз необходимо производить с учётом непрерывности луча, без бросков и других неравномерностей, приводящих к искажённому приёму отражённых сигналов. В настоящее время применяемые в АФАР СВЧ-переключатели обеспечивают время изменения положения луча АФАР в несколько десятков наносекунд.

Для случая, когда изменения положения курсовых систем осуществляются в горизонтальной плоскости на угол $\Delta\beta$, формирование угла места $\gamma_{\text{м}}''$ и азимута γ_{Δ}'' для положения луча пассивной (приёмной) АФАР необходимо производить по формулам [7, 8]:

$$\varphi_{\text{м}}'' = \arctg \frac{z_{\text{ц}}''}{\sqrt{x_{\text{ц}}''^2 + y_{\text{ц}}''^2}}, \quad (16)$$

$$\varphi_{\text{а}}'' = \arctg \frac{y_{\text{ц}}''}{z_{\text{ц}}''}, \quad (17)$$

$$x_{\text{ц}}'' = y_{\text{ц}}' \cdot \sin \Delta\Pi + x_{\text{ц}}' \cdot \cos \Delta\varepsilon, \quad (18)$$

$$y_{\text{ц}}'' = y_{\text{ц}}' \cdot \cos \Delta\Pi - x_{\text{ц}}' \cdot \sin \Delta\varepsilon, \quad (19)$$

$$z_{\text{ц}}'' = z_{\text{ц}}', \quad (20)$$

$$x_{\text{ц}}' = x_0' - x_{\text{ц}}', \quad (21)$$

$$y_{\text{ц}}' = y_0' - y_{\text{ц}}', \quad (22)$$

$$z_{\text{ц}}' = z_0' - z_{\text{ц}}', \quad (23)$$

$$x_{\text{ц}}'' = ct \cdot \cos \varphi_{\text{м}}' \cdot \cos \varphi_{\text{а}}'', \quad (24)$$

$$y_{\text{ц}}'' = ct \cdot \cos \varphi_{\text{м}}' \cdot \sin \varphi_{\text{а}}'', \quad (25)$$

$$z_{\text{ц}}'' = ct \cdot \sin \varphi_{\text{м}}', \quad (26)$$

где $x_{\text{ц}}', y_{\text{ц}}', z_{\text{ц}}'$ – координаты целевой отметки в прямоугольной системе координат активного МФИРЛК;

$x_{\text{ц}}'', y_{\text{ц}}'', z_{\text{ц}}''$ – координаты целевой отметки в поворнутой на угол $\Delta\Pi$ системе координат пассивного МФИРЛК;

$x_{\text{ц}}'', y_{\text{ц}}'', z_{\text{ц}}''$ – координаты целевой отметки в прямоу-

гольной системе координат, повернутой на угол $\Delta\varepsilon$, пассивного МФИРЛК;

$\Delta\varepsilon$ – угол расхождения курсовых систем пассивной и активной платформы в горизонтальной плоскости,

t – время, отсчитываемое от момента формирования ИЗ;

φ_m, φ_a – угол места и азимут положения луча АФАР активного МФИРЛК;

φ'_m, φ'_a – угол места и азимут положения приёмного луча АФАР пассивного МФИРЛК с учётом поворота осей координат на угол $\Delta\varepsilon$.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛОВ РАСХОЖДЕНИЯ КУРСОВЫХ СИСТЕМ И ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ КООРДИНАТ ЦЕЛЕЙ

В навигационных комплексах подвижных объектов возникают ошибки в пространственном положении осей гирокомпасов. Для их учета в современных системах управления применяются комплексы взаимного обмена и взаимного ориентирования, с помощью которых величина расхождения курсовых систем в горизонтальной плоскости определяется по формуле:

$$\Delta\beta(t_3) = \beta_{ан}(t_3) - \beta_{па}(t_3) \pm 180^\circ, \tag{27}$$

где $\beta_{ан}(t_3), \beta_{па}(t_3)$ – соответственно сглаженное и экстраполированное значения азимута в направлении на активную и пассивную позиции.

Величина $\beta_{ан}$ определяется радиолокационным способом, а величина $\beta_{па}$ может быть определена в активном и пассивном режимах работы РЛС и передается на активную позицию по радиоканалу. При этом следует отметить, что определение расхождения углов курсовой системы в вертикальной плоскости не производится.

При совместном сопровождении целей, в соответствии с рисунком 2, углы расхождения курсовых систем можно определить методом совмещения центра принятой отметки, обнаруженной РЛМ позиции 2, с точкой перемещения линий окружности, проходящей через центр отметки цели, обнаруженной РЛМ позиции 1, в го-

ризонтальной и вертикальной плоскостях. Реализация определения углов расхождения курсовых систем и корректирующей величины определения азимута цели для азимутной плоскости приведены на рисунке 2 (а и б).

На рисунке 2 приведены следующие обозначения:

$N1$ и $N2$ – направление осей гирокомпасов на север соответственно на позициях 1 и 2;

$\beta_{ц1}$ и $\beta_{ц2}$ – азимут на цель, измеренный на позициях 1 и 2;

$D_{ц1}^{t3}$ и $D_{ц2}^{t3}$ – дальность до цели, измеренная на позициях 1 и 2;

t_3 – время экстраполяции;

$Ц_1$ – положение цели в системе координат позиции 1 без учета принятых координат целевой отметки, измеренных на позиции 2;

$Ц_{12}$ – положение цели в системе координат позиции 1 с учетом принятых координат целевой отметки, измеренных на позиции 2;

γ_{12} – угол между направлениями на цель с позиций 1 и 2;

b – радиолокационная глубина цели;

α_{12} – угол расхождения курсовых систем позиций 1 и 2;

$$l = 2D_y \cdot \text{Sin}\left(\frac{\varphi_{дна}}{2}\right) - \text{угловой размер целевой}$$

отметки, равный при малых углах диаграммы направ-

ленности антенны $l = D_y \cdot \varphi_{дна} (l \gg l')$;

l' – угловой размер с учетом положения отметок;

β – уточняющая поправка с учетом азимута цели;

O_1 и O_2 – центры целевой отметки, обнаруженной на позициях 1 и 2.

При совмещении отметок в соответствии с рисунком 2а производится определение корректирующей поправки $\Delta\beta$ и уточнение азимута на цель по формуле:

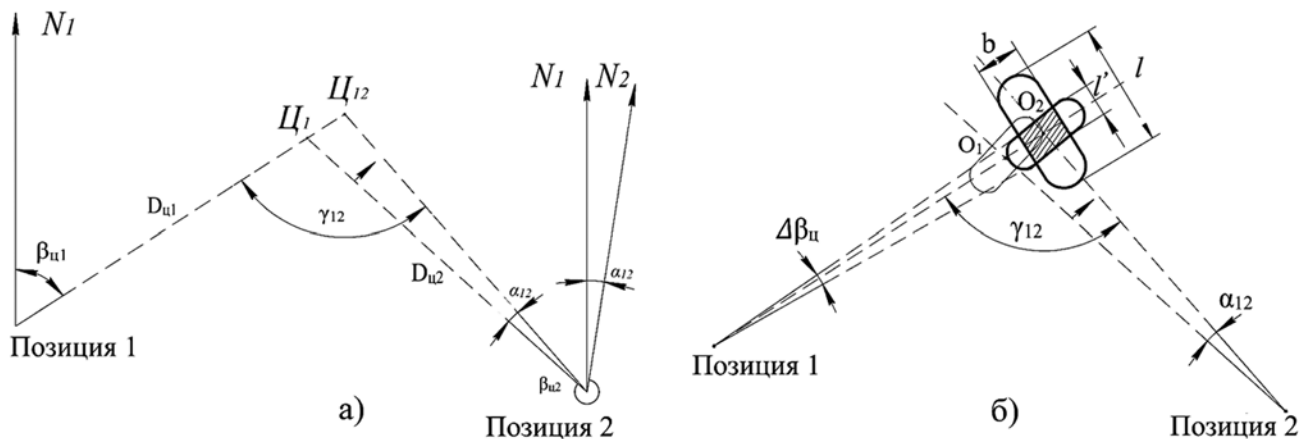


Рис. 2. Схема определения углов расхождения курсовых систем и корректирующей величины определения азимута

$$\beta_{ц,1,2} = \beta_{ц1} + \Delta\beta, \quad \Delta\beta = \frac{l'}{(\sin\gamma)D_{ц1}}. \quad (28)$$

Аналогично формируется величина расхождения курсовых систем и корректирующей поправки по углу места в вертикальной плоскости.

Согласно проведенным расчетам, а также с учетом данных, приведенных в [1], точность оценки координат целей в МПРЛС может быть увеличена в несколько раз.

В соответствии с [1] приближенное значение СКО определения угловой координаты цели можно определить по формуле:

$$\zeta_{\theta} \cong \frac{\zeta_{R\Sigma} \cdot \sqrt{2}}{L \cdot \sin\theta} \cong \frac{2\sqrt{2} \zeta_R}{L_{эфф}}, \quad (29)$$

где ζ_R – СКО измерения дальности до цели;

$\zeta_{R\Sigma}$ – СКО измерения суммарной дальности «передающая позиция – цель – приемная позиция»;

L – база между РЛС;

$L_{эфф} = L \cdot \sin\theta$ – эффективная база;

θ – угол, определяющий направление на цель.

Из (29) следует, что при высокой точности измерения дальности и больших базах ζ_{θ} погрешность определения угловых величин может быть значительно меньше, чем при обычной пеленгации цели. Так при $\zeta_R = 5$ м, $L_{эфф} = 30$ км получается значение $\zeta_{\theta} \cong 1,6'$.

ТРЕБОВАНИЯ К СОД

Для обмена различной информацией в состав МПРЛС должна входить собственная СОД или она должна пользоваться внешней СОД, обеспечивающей передачу следующих данных:

1. В направлении активная МФИРЛК – пассивные МФИРЛК:

- плана и режимов работы;
- направлений и параметров излучения;
- координат положения абонентов группы;
- МВ и времени их формирования;
- пеленга в направлении пассивного МФИРЛК;

2. В направлении пассивные МФИРЛК – активная МФИРЛК:

- МВ (в зависимости от времени синхронизации);
- данные для совместной обработки в зависимости от типа МФИРЛК:

а) координат и элементов движения целей;

б) координат и дополнительных характеристик (доплеровская скорость, угловые размеры, радиолокационные глубина, вес и другие), обнаружения радиолокационных отметок;

в) разнообразных радиолокационных портретов (спектральный, доплеровский, поляризационный, фазовый и другие), необходимых для повышения достоверности обнаружения и классификации целей.

Каналы связи в данной СОД в направлении между активными и пассивными МФИРЛК должны обеспе-

чивать пропускную способность от десятков кбит/с до единиц Мбит/с в зависимости от типа и решаемых задач МПРЛС, в том числе и при воздействии помех. Для обеспечения высокой скорости передачи данных, высокой помехоустойчивости и скрытности (работа на уровне шума) в настоящее время должны использоваться широкополосные радиолинии на основе АФАР с небольшой мощностью излучения. Они могут быть реализованы с помощью шумоподобных сигналов и помехоустойчивых способов кодирования и модуляции с пространственной селекцией с помощью узконаправленных лучей АФАР. Кроме этого, радиотракты между активной и пассивной позициями должны обладать постоянной аппаратной задержкой при передаче меток времени, которая учитывается при определении дальности между объектами. Указанные требования могут быть реализованы в настоящее время с помощью систем взаимного обмена информацией и взаимного ориентирования (ВЗОР-ВЗОИ), обеспечивающих, кроме передачи указанной выше информации, определение взаимных координат, углов расхождения курсовых систем и индивидуальное опознавание абонентов. Указанные системы реализуются на принципах радиолокации с активным ответом с передачей информации и МВ на основе АФАР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены вопросы и приведены решения, связанные с реализацией в составе МПРЛС системы временной и пространственной синхронизаций, ведения единого оперативного времени с высокой точностью, организации синхронной работы в активном и пассивном режимах управления лучом АФАР, определения углов расхождения курсовых систем, требования к сети передачи данных, обеспечивающих по отношению к однопозиционным РЛС повышение информативности, точности оценки координат целей, помехоустойчивости, скрытности, ЭМС, живучести и надежности МПРЛС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. – М. : Радио и связь, 1993. – 416 с.
2. Бакулев П.А. Радиолокационные системы. – М. : Радиотехника, 2004. – 321 с.
3. Зайцев Д.В. Многопозиционные радиолокационные системы. Методы и алгоритмы обработки информации в условиях помех. – М. : Радиотехника, 2007. – 114 с.
4. Создание мобильной многопозиционной радиолокационной системы на основе канала связи РТК-2 и современных методов обработки радиолокационной информации / К.К. Васильев, Э.Д. Павлыгин, Н.В. Лучков, А.Н. Пифтанкин, А.А. Маслов // Автоматизация процессов управления. – 2012. – № 4 (30). – С. 34–39.
5. Проблема создания многопозиционной радиолокационной системы на основе высокоскоростного

помехозащищенного канала связи РТК-2 и современных методов обработки РЛС / Э.Д. Павлыгин, К.К. Васильев, А.А. Маслов, А.С. Гудоров, Н.В. Лучков, А.И. Моисеев, А.Н. Пифтанкин // Матер. науч.-практ. конф. «Радиолокация-2030». – М. : 2012. – 120 с.

6. Титов М.П. Временная синхронизация при бистатическом синтезировании апертуры антенны // Радиотехника. – 2012. – № 10. – С. 78–86.

7. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М. : Наука, 1970. – 720 с.

8. Бронштейн И.И., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВУЗов : учеб. пособие. – СПб. : Лань, 2010. – 608 с.

REFERENCES

1. Cherniak V.S. *Mnogopozitsionnaia radiolokatsiia* [Multiposition Radar]. Moscow, Radio i sviaz Publ., 1993. 416 p.

2. Bakulev P.A. *Radiolokatsionnye sistemy* [Radar Systems]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2004. 321 p.

3. Zaitsev D.V. *Mnogopozitsionnye radiolokatsionnye sistemy. Metody i algoritmy obrabotki informatsii v usloviakh pomekh* [Multipositional Radar Systems. Methods and Algorithms of Data Processing under Noise Conditions]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2007. 114 p.

4. Vasilev K.K., Pavlygin E.D., Luchkov N.V., Piftankin A.N., Maslov A.A. *Sozdanie mobilnoi mnogopozitsionnoi radiolokatsionnoi sistemy na osnove kanala sviazi Rtk-2 i sovremennykh metodov obrabotki*

radiolokatsionnoi informatsii [Creation of Mobile Multipositional Radar System Based on Communications Channel Rtk-2 and Modern Methods of Radar Information Processing]. *Avtomatizatsiia protsessov upravleniia* [Automation of Control Process], 2012, no. 4 (30), pp. 34–39.

5. Pavlygin E.D., Vasilev K.K., Maslov A.A., Gutorov A.S., Luchkov N.V., Moiseev A.I., Piftankin A.N. *Problema sozdaniia mnogopozitsionnoi radiolokatsionnoi sistemy na osnove vysokoskorostnogo pomekhoshchishchennogo kanala sviazi Rtk-2 i sovremennykh metodov obrabotki RLS* [Creation Issues of Multiposition Radar Based on the High Speed Noise Immune Communications Channel Rtk-2 Modern Methods of Radar Information Processing]. *Mater. nauch.-prakt. konf. "Radiolokatsiia-2030"* [Proc. of Sci. Workshop "Radiolokatsiia-2030"]. Moscow, 2012, 120 p.

6. Titov M.P. *Vremennaia sinkhronizatsiia pri bistaticheskom sintezirovanii apertury anteny* [The Time Synchronization for Bistatic SAR]. *Radiotekhnika* [Radioengineering], 2012, no. 10, pp. 78–86.

7. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlia nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Mathematics Handbook for Researcher and Engineers]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 720 p.

8. Bronshtein I.I., Semendiaev K.A. *Spravochnik po matematike dlia inzhenerov i uchaschikhsia VUZov. Uchebnoe posobie* [Mathematics Handbook for Engineers and Students. Tutorial]. St. Petersburg, Lan Publ., 2010. 608 p.