

УДК 621.396.969:623.618.3

К.К. Васильев, Э.Д. Павлыгин, Н.В. Лучков, А.Н. Пифтанкин, А.А. Маслов

СОЗДАНИЕ МОБИЛЬНОЙ МНОГОПОЗИЦИОННОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ КАНАЛА СВЯЗИ РТК-2 И СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

Васильев Константин Константинович, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ, член-корреспондент АН республики Татарстан. Окончил радиотехнический факультет и аспирантуру Ленинградского электротехнического института им. В.И. Ульянова (Ленина). Заведующий кафедрой «Телекоммуникации» Ульяновского государственного технического университета. Имеет монографии, учебные пособия и статьи в области статистического синтеза и анализа информационных систем. [e-mail: vkk@ulstu.ru].

Павлыгин Эдуард Дмитриевич, кандидат технических наук. Первый заместитель генерального директора по науке ФНПЦ ОАО «НПО «Марс». Имеет статьи в области статистических методов обработки сигналов. [e-mail: mars@mv.ru].

Лучков Николай Владимирович, кандидат технических наук. Окончил радиотехнический факультет и аспирантуру на кафедре «Телекоммуникации» УлГТУ. Инженер-исследователь 1 категории ФНПЦ ОАО «НПО «Марс». Имеет статьи в области статистических методов обработки сигналов. [e-mail: nik-lnv@mail.ru].

Пифтанкин Александр Николаевич, кандидат технических наук. Главный специалист ФНПЦ ОАО «НПО «Марс». Имеет статьи в области статистических методов обработки сигналов. [e-mail: mars@mv.ru].

Маслов Александр Алексеевич, главный конструктор ФНПЦ ОАО «НПО «Марс». Имеет статьи в области статистических методов обработки сигналов. [e-mail: mars@mv.ru].

Аннотация

Представлен интегрированный подход к созданию мобильной многопозиционной радиолокационной системы (ММПРЛС), рассмотрены алгоритмы совместной обработки данных, полученных от различных источников информации.

Ключевые слова: радиолокация, статистические методы, единое информационное пространство, обнаружение, различение, оценивание, случайное поле.

Konstantin Konstantinovich Vasilyev, Doctor of Engineering, Professor; honoured worker in Science and Engineering of the Russian Federation; correspondent member of Tatarstan Academy of Sciences; graduated from the Faculty of Radioengineering and completed his post-graduation at the 'LETI'; holds the Chair 'Telecommunications' at Ulyanovsk State Technical University; author of monographs, textbooks and articles in the field of statistic synthesis and analysis of information systems. e-mail: vkk@ulstu.ru.

Eduard Dmitrievich Pavlygin, Candidate of Engineering; Deputy First Director General for Science at Federal Research-and-Production Association 'Research-and-Production Association 'Mars'; author of articles in the field of statistic methods of signal processing. e-mail: mars@mv.ru.

Nikolay Vladimirovich Luchkov, Candidate of Engineering; graduated from the Faculty of Radioengineering and completed his post-graduation at the Chair 'Telecommunications' of Ulyanovsk State Technical University; research engineer at Federal Research-and-Production Center Open Joint-Stock Company 'Research-and-Production Association 'Mars'; author of articles in the field of statistic methods in signal processing. e-mail: nik-lnv@mail.ru.

Alexander Nikolaevich Piftankin, Candidate of Engineering; chief specialist at Federal Research-and-Production Center Open Joint-Stock Company 'Research-and-Production Association 'Mars'; author of publications in the field of statistic methods in signal processing. e-mail: mars@mv.ru.

Alexander Alexeevich Maslov, chief designer at Federal Research-and-Production Center 'Research-and-Production Association 'Mars'; author of articles in the field of statistic methods in signal processing. e-mail: mars@mv.ru.

Abstract

The article presents an integrated approach to the creation of mobile multi-position radar system, considers algorithms of joint data processing, received from different information sources.

Key words: radiolocation, statistic methods, common information space, detection, identification, evaluation, random field.

ВВЕДЕНИЕ

Непрерывное и устойчивое освещение обстановки театра военных действий и обладание актуальной информацией об обстановке каждой боевой единицей являются основой выполнения боевой задачи [1-3].

В направлении создания и поддержания в реальном масштабе времени единого информационного поля оперативно-тактической группировки Военно-морского флота (ВМФ) сделаны первые шаги путем создания и установки на ряде кораблей комплекса ВЗОИ-ВЗОР (изделие «Трасса»), обеспечивающего:

- работу высокоскоростного защищенного скрытного помехоустойчивого узконаправленного канала ВЗОИ-ВЗОР между надводными кораблями ВМФ с применением шумоподобных сигналов в X-диапазоне;
- обмен всеми видами информации о воздушной, надводной, подводной обстановках, командах боевого управления, данными целеуказания;
- телефонную и видеоконференцсвязь;
- индивидуальное опознавание своих кораблей с определением углов расхождения их курсовых систем;
- создание единого информационного поля группировки ВМФ на основе отождествления вторичной (формулярной) информации, формируемой средствами мониторинга сил группировки;
- взаимный обмен информацией с береговыми пунктами управления ВМФ в реальном масштабе времени с целью формирования единого информационного пространства (ЕИП) ВМФ как составной части ЕИП автоматизированной системы управления вооруженных сил (АСУ ВС).

Данный комплекс устанавливается на строящихся основных кораблях ВМФ. Однако до настоящего времени не решены следующие вопросы:

- на действующих кораблях ВМФ не установлен данный комплекс и не произведена его интеграция в схему корабля;
- требуется дальнейшее совершенствование алгоритма совместной обработки формулярной информации с учетом средств мониторинга действующих кораблей;
- не реализованы алгоритмы совместной некогерентной обработки первичной информации от средств мониторинга всех сил группировки ВМФ с целью создания устойчивого к радиоэлектронным помехам, электромагнитному излучению и противорадиолокационному оружию противника информационного поля реального времени, обеспечивающего применение всех видов вооружения по данным любого из кораблей;
- не обеспечено повышение скорости передачи информации между кораблями группировки и береговыми пунктами управления до 20 Мбит/с (вместо имеющихся 1,5-5 Мбит/с);
- не созданы авиационные ретрансляторы данного комплекса ВЗОИ-ВЗОР X-диапазона с целью обеспечения

обмена информацией с береговыми пунктами управления.

Указанные вопросы предлагается решать в рамках создания многопозиционной радиолокационной системы на основе комплекса «Трасса» и современных методов обработки радиоэлектронной информации.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПЛЕКСА ВЗОИ-ВЗОР:

- диапазон частот X с широкой полосой пропускания;
- время переключения узконаправленных лучей не более 10 мкс;
- дальность действия - радиогоризонт, а с учетом ретрансляции дальность определяется количеством ретрансляторов;
- для обеспечения высокой помехоустойчивости используются узконаправленные лучи, шумоподобные сигналы, помехоустойчивое кодирование. Кроме этого, для повышения достоверности информации используются принципы синхронного накопления передаваемых данных;
- скорость передачи данных (информационная скорость) изменяется в пределах от 1,5 до 5 Мбит/с в зависимости от уровня помех, при этом обеспечивается высокое значение вероятности правильной передачи сообщений при низком значении вероятности необнаруженной ошибки;
- передача информации осуществляется с применением высокоскоростных средств криптозащиты;
- величины среднеквадратичных ошибок измерения координат: $B_{\delta} \leq 5 \text{ м}$, $B_n \leq 4 \text{ м.д.}$, $5_{\text{KV}} \leq 2 \text{ м.д.}$

СИНХРОНИЗАЦИЯ РАЗНЕСЕННЫХ ПОЗИЦИЙ

Для организации эффективной совместной обработки информации и управления элементами многопозиционной системы наблюдения необходима точная синхронизация времени разнесенных позиций [1-3]. Высокой точности синхронизации временных отметок в мирное время и угрожаемый период возможно достичь путем использования спутниковых навигационных систем.

В условиях подавления спутниковой связи предлагается использовать систему синхронизации шкал времени в пространственно разнесенных пунктах методом запросной радиолокации [1, 2].

В процессе синхронизации шкал времени центральный пункт (ЦП) излучает запросный зондирующий сигнал, и начинается счет времени устройством, измеряющим задержку (рис. 1). После прохождения расстояния R запросный сигнал принимается в периферийном пункте (ПП), и после выполнения необходимых процедур синхронизируется шкала времени в этом пункте. В свою очередь, ПП излучает соответствующей шкале времени ответный зондирующий сигнал, который при его приеме в ЦП синхронизирует дополнительную шкалу времени и останавливает счет времени устройством, измеряющим задержку.

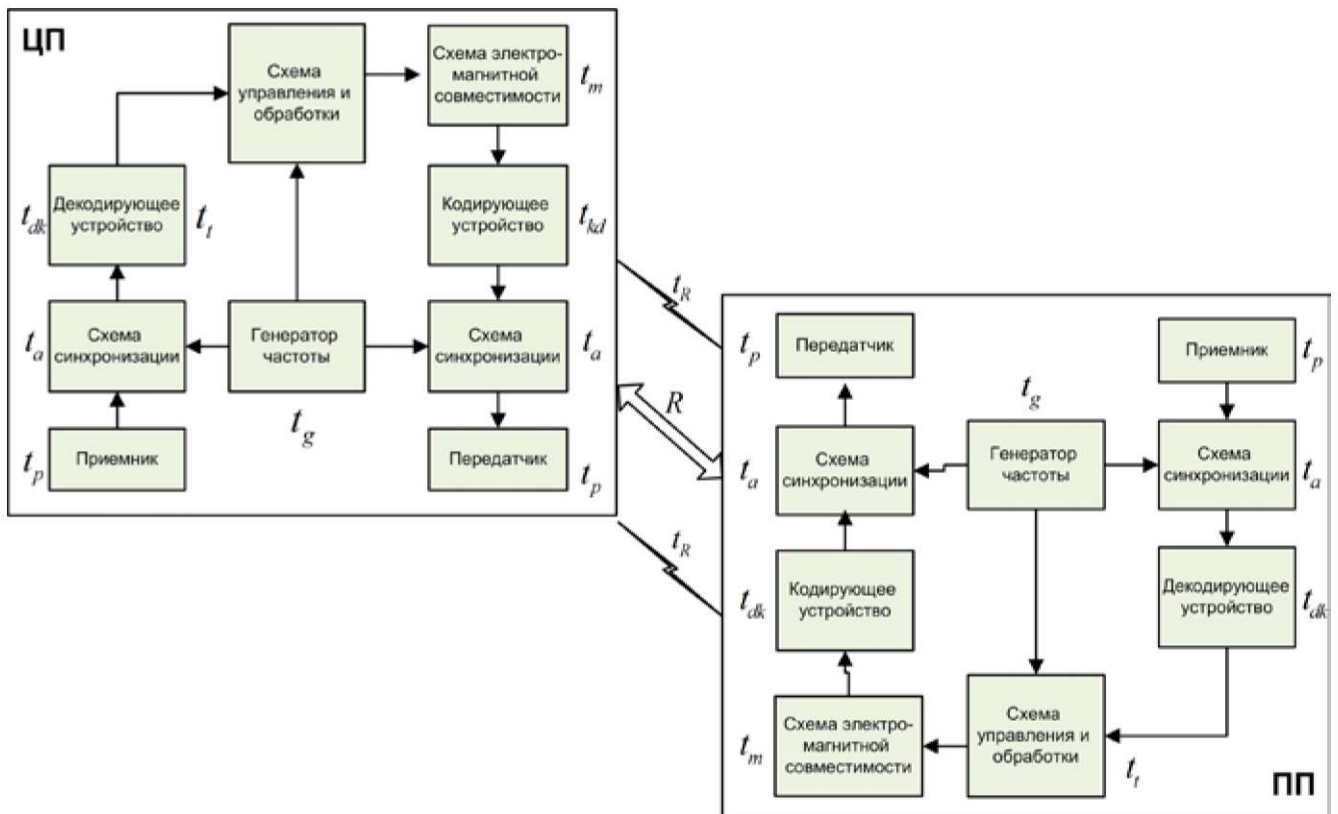


Рис. 1. Метод запросной радиолокации

Суммарное время задержки при прохождении запросного и ответного сигналов определяется соотношением:

$$t_z = {}_R t_R + {}_n I_s, t_R = \frac{2R}{v},$$

где v - скорость распространения радиоволн; t_n - время задержки сигнала в цепях аппаратуры ЦП и ПП. Величина аппаратной задержки t_n устанавливается предварительно путем калибровки.

Величина поправки t_s шкале времени в ПП по отношению к шкале времени ЦП рассчитывается по формуле

$$\frac{\pm K}{2} \frac{K}{K}$$

и затем передается в ведомый пункт по каналу связи для определения точного времени.

Аппаратура ЦП и ПП функционально устроена одинаково, отличается только настройкой и коммутацией некоторых цепей в зависимости от того, работает ли пункт как ведущий или как ведомый.

Реализация данного метода позволит обеспечить формирование единого времени на каждой боевой единице соединения с точностью до 5 нс.

ОБЪЕДИНЕНИЕ ДАННЫХ РАЗЛИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Несмотря на большое число работ, посвященных проблеме объединения данных многопозиционных РЛС [1-3], в настоящее время практически отсутствует общая методология построения системы обработки информации ММПРЛС. Определим некоторые важные задачи создания такой системы и возможные пути их решения.

Выбор системы координат. Каждая РЛС получает данные, как правило, в сферической системе координат (СК). Однако объединение нескольких сферических систем для построения траекторий множества целей в трехмерном пространстве оперативно-тактической группировки приведет к множеству разнородных криволинейных траекторий даже при линейном перемещении объектов. Для проведения объединения данных, отождествления траекторий, сопровождения и распознавания целей потребуются очень большая скорость информационных потоков и быстродействие вычислительных средств. Поэтому СК, используемая для построения траекторий и распознавания всех целей, должна быть общей для всей группировки и выбираться таким образом, чтобы прямолинейное движение объектов описывалось линейными зависимостями. При надежном функционировании спутниковой навигационной связи может использоваться земная базовая СК [4]. В условиях отсутствия спутниковой связи целесообразно выбрать промежуточную земную или полусвязанную СК [4], характеризующуюся тем, что ее начало совмещено с центром масс одного из кораблей группировки и перемещается вместе с ним в пространстве. Координатные оси параллельны соответствующим осям базовой СК. Построенные объединенные траектории должны пересчитываться каждым кораблем в собственную сферическую СК. Это легко достигается с учетом действующего комплекса «ВЗОИ-ВЗОР».

Траекторная обработка. Необходимо организовать процесс последовательного формирования базы траекторий, имеющих общие для группировки номера и сведения о типе целей. Для этого каждая РЛС передает на все платформы типовые данные - дальность, азимут, угол места и

доплеровскую скорость, а также результаты их обработки - параметры траектории и тип цели. Все эти данные должны сопровождаться характеристиками точности и достоверности (среднеквадратичное отклонение (СКО), вероятность правильного распознавания, вероятность ложной тревоги). На каждой платформе организуется самостоятельная обработка всех потоков данных, выполняются операции по завязке, слиянию, расхождению и удалению траекторий с идентификацией типа цели.

Алгоритмы сопровождения - различения целей.

Известно множество подходов к решению задачи объединения данных разнородных РЛС. Решение задачи байесовского одновременного обнаружения (различения) и оценивания параметров сигналов на фоне помех обычно конкретизируется для аддитивных или мультипликативных комбинаций стоимостей ошибок различения с квадратичными функциями потерь при оценивании. Такой подход позволяет получить сравнительно простые и пригодные для технической реализации алгоритмы совместного обнаружения сигнала и оценки одномерного параметра. Вместе с тем при синтезе ряда информационных систем возникают проблемы одновременного различения многих сигналов и оценивания векторных параметров, изменяющихся в процессе наблюдений. Подобные проблемы связаны, например, с пространственно-временной обработкой сигналов, распознаванием образов или идентификацией систем. В отмеченных ситуациях особый практический интерес представляют рекуррентные методы обработки последовательности наблюдений, пригодные для построения относительно простых вычислительных программ.

Необходимые рекуррентные соотношения находятся с помощью принципа инвариантного погружения в предположении, что последовательности параметров являются марковскими [5]. Основой для выводов служит байесовское правило различения - оценивания, оптимальное в смысле максимума среднего выигрыша при равномерной функции выигрыша для оценок векторных параметров.

Пусть в момент завязки траектории выдвинута $M+1$ гипотеза о принадлежности вектора изменяющихся параметров $\bar{x}_i, i = 1, 2, \dots, k$ к одному из M стохастических разностных уравнений

$$\bar{x}_i = \Phi / (H(i-1) > 0 + \Psi / (\wedge / (i-1) > * - \dots, \dots)$$

$$l = 1, 2, \dots, M.$$

В ряде случаев возможна линеаризация и приведение этих уравнений к виду:

$$\bar{x}_i \cong R_{ii} \bar{x}_i(i-1) + \xi_{ii},$$

где $R_{ii} = dt y(-*/(;\cdot !), \wedge y \wedge (\gamma _1), \Phi$, и $\dots - m \times m$ - матрицы, вычисленные в точке \bar{X}_{3i} . При этом каждое из приведенных уравнений описывает изменение параметров для конкретных типов целей. Так, например, $l = 1$ - фрегат, $l = 2$ - бомбардировщик, $l = 3$ - крылатая ракета и т. д. Компоненты вектора \bar{x} представляют собой координаты объекта, их производные, а также параметры признаков цели (протяженность сигнала по координатам, уровень сигнала, характеристики спектра и др.).

На основе объединенной совокупности наблюдений всех имеющихся источников

$$\bar{z}_i = \dots, i=0, i, \dots, M,$$

необходимо принять совместное решение $\hat{\{ \bar{z}_i \}}$ и $\hat{X}_{j,k} (l=1)$ относительно номера гипотезы и траекторных параметров. Качество совместного решения определим в смысле максимума среднего выигрыша с помощью функции выигрыша [5]:

$$G = b_k (I-l) G_{x_i} (x_{lk} - \hat{X}_{lk}),$$

где $\delta_k ()$ - символ Кронекера, а $G_{x_i} = g_{x_i}$, если $X_{i,k} = \hat{X}_{i,k} \in D_{i,k}$ и $G_{i,k} = 0$. Таким образом, ненулевая премия назначается лишь при верном решении \hat{l} и хорошем оценивании траекторных параметров $X_{lk} = \hat{X}_{lk} \in D_{i,k}$.

В общем случае полученное правило предполагает построение оценок $x_{1i}, X_{2i}, \dots, x_{ki}$ на основании всей выборки Z_k . Известно, что осуществление такой нелинейной интерполяции потребует большого объема дополнительных вычислений после фильтрации параметров. В связи с этим целесообразно рассмотреть рекуррентные методы вычисления.

Квазиоптимальные рекуррентные оценки при условии справедливости гипотезы l находятся по формуле [5]:

$$\hat{x}_i = \hat{x}_i u + P_{i,i} Y^{-1} (z_i - \hat{x}_i u) \wedge i = i - k,$$

где условные ковариационные матрицы ошибок определяются с помощью соотношений:

$$P = P * (E + V^{-1} P, n)^{-1}, P_{3li} = P_{i,i} P n - \Pi + V u.$$

В этом случае существуют квазиоптимальные рекуррентные процедуры [5] вычисления решающей статистики:

$$J_u = J_i(i-1) + \dots / (4 > z) P_{i,i} \dots f(4 > u) \sim - E_i(\hat{x}_{ii}, \bar{z}_i),$$

$$\hat{J}_w = 0, l = 0, 1, \dots, M,$$

где $E_j(\hat{x}_{ii}, \bar{z}^{\wedge} = \text{Into} \{ \bar{z} J x^{\wedge} M i \}, l = 0, 1, \dots, M$ - логарифм условной плотности распределения наблюдений;

\hat{X}_i - квазиоптимальные условные оценки параметров

движения и признаков цели в предположении, что ее динамика и признаки описываются стохастическим уравнением с номером l ;

P_{3i} - ковариационные матрицы ошибок условного оценивания параметров при гипотезе M_l .

Заметим, что при линейной модели наблюдений

$$\bar{z}_i = C_u \bar{x}_i + \bar{0}i, i = 1, 2, \dots, k, l = 0, 1, \dots, M$$

функция

$$f(\hat{x}_{ii}, \bar{z}_i) = C_u^T e^{-\dots} (\wedge i - C_u \hat{x}_{ii})$$

осуществляет «сортировку» рассогласований по различным каналам оценивания и вычисления решающего правила [5]. На каждом шаге может быть принято совместное решение \hat{I}_j, \hat{x}_i о типе цели и ее траекторных параметрах, если величина \hat{J}_h заметно меньше всех остальных статистик.

Действительно, пусть две РЛС измеряют один и тот же параметр, например координату x_{fi} для 1-го типа объекта. Наблюдения первой РЛС $z^1 = Xc + Q^1$, где Q^1 - случайная погрешность оценивания координат с дисперсией σ_{01}^2 . Для второй РЛС $z_i^2 = Xc + Q^2$, где случайная по-

грешность Q_i^2 имеет дисперсию σ_{2i}^2 . Тогда векторные наблюдения

$$\bar{z}_i = \begin{pmatrix} z_i^1 \\ z_i^2 \end{pmatrix} = Cx_{fi} + \bar{Q}_i$$

где $C = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$, $\bar{Q}^T = (0 \quad 0 \quad 2)$ с ковариационной матрицей

$$V_{01} = \begin{pmatrix} \sigma_{1i}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{2i}^2 \end{pmatrix}$$

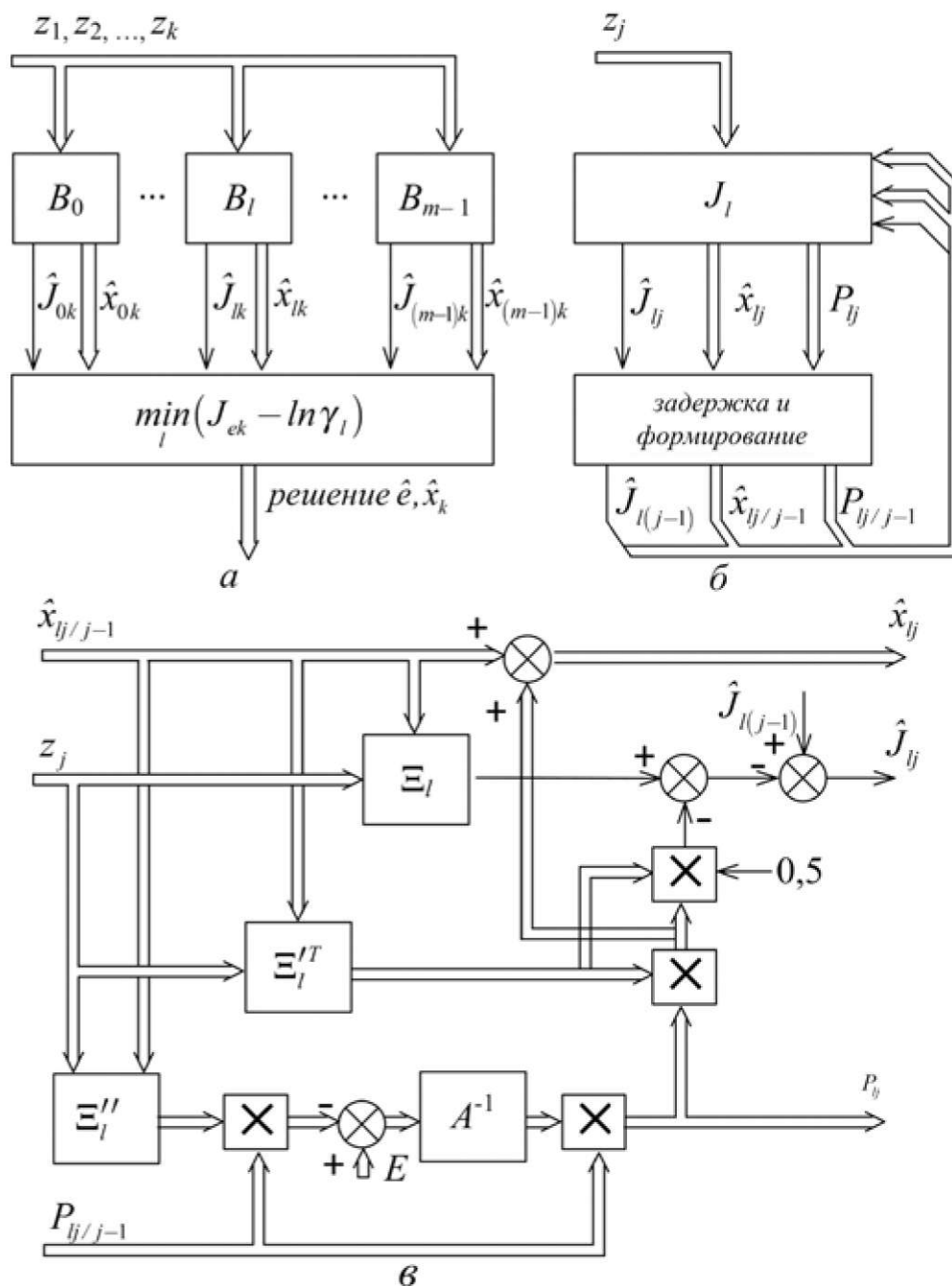


Рис. 2. Структурные схемы алгоритма различения сигналов и оценивания параметров (а); блока Б, (б); блока J (в)

Таким же образом осуществляется комплексирование любого числа наблюдений одного и того же параметра траектории. В случае частичных наблюдений матрица C позволяет выделить оцениваемые параметры из всего вектора состояния \bar{x}_i . Пусть, например, РЛС измеряет только координату x_u , а скорость V_i ненаблюдаема. Тогда

$$\bar{x}_i = \begin{pmatrix} x_{li} \\ V_{li} \end{pmatrix}$$

и наблюдения $z_i = x_i + \theta_i$ запишутся в стандартном виде: $z_i = C x_i + \theta_i$, где $C = (1 \ 0)$. Применяя операции комплексирования и выделения наблюдаемых координат, можно объединить данные всех РЛС для завязанных траекторий.

Таким образом, в процессе последовательной обработки поступающих наблюдений принимаются решения об отсутствии $\hat{l} = 0$ или наличии $\hat{l} \neq 0$ траектории с одновременной классификацией цели по динамическим, спектральным и другим признаковым характеристикам, описываемым одной из M векторных стохастических моделей.

Полученные выражения определяют структурную схему устройства (рис. 2, а) для принятия решения после анализа последовательности наблюдений \bar{z}_i . В каждом из блоков B_i осуществляются рекуррентные вычисления (рис. 2, б). Основу вычислений составляет формирование прогнозируемых значений \hat{x}_i, P_i, J_i , задержка на один такт и переоценка этих величин в блоке J_i (рис. 2, в) с учетом очередного наблюдения \bar{z}_i .

Полученные результаты могут быть использованы при разработке вычислительных программ многоканального обнаружения, а именно при измерении координат целей и их идентификации. После обнаружения цели осуществляется ее сопровождение. Расширяя вектор состояния \bar{x}_i , легко учесть производные координат цели, промежуточный характер флуктуаций амплитуды, изменение дисперсии помехи и другие параметры принимаемого сигнала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предложенные методы и алгоритмы позволяют реализовать интегрированный подход к освещению обстановки театра военных действий с использованием всех имеющихся в наличии средств и могут стать основой при разработке протоколов единого информационного управляющего пространства реального времени ВС РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондратьев В.С., Козлов А.Ф., Марков Л.Н. Многопозиционные радиотехнические системы / под ред. проф. В.В. Цветнова. - М. : Радио и связь, 1986. - 264 с.
2. Зайцев Д.В. Многопозиционные радиолокационные системы. Методы и алгоритмы обработки информации в условиях помех. - М. : Радиотехника, 2007. - 96 с.
3. ChaLLa S., Evans R., Wang X. A Bayesian solution to the OOSM problem and its approximations // Journal of Information Fusion. - 2003. - № 4(3).
4. Лукомский Ю.А. Управление морскими подвижными объектами. - СПб. : Элмор, 1996. - 320 с.
5. Васильев К.К. Применение статистических методов при проектировании корабельных систем связи и автоматического управления движением // Автоматизация процессов управления. - 2011. - № 1(23). - С. 72-77.