
**ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ
ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ**

УДК 621.317.382

**МЕТОД СОВМЕСТНОГО ПРИЕМА
И МОНОИМПУЛЬСНОГО ПЕЛЕНГОВАНИЯ СИГНАЛОВ
РАДИОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ**

© 2020 г. Н. Ю. Музыченко*

*Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи,
ул. Нансена, 130, Ростов-на-Дону, 344038 Российская Федерация*

*E-mail: *Muzichenko_n@mail.ru*

Поступила в редакцию 12.11.2019 г.

После доработки 12.11.2019 г.

Принята к публикации 18.02.2020 г.

Предложен метод совместного приема и моноимпульсного пеленгования сигналов радиоизлучающих динамических объектов, базирующийся на выравнивании коэффициентов передачи в пеленгационных каналах по дисперсиям шумов. В качестве математического аппарата, используемого при поиске решения, применена теория нечетких множеств. Эффективность метода подтверждена результатами натуральных испытаний.

DOI: 10.31857/S0033849420080094

ВВЕДЕНИЕ

Задачи приема и пеленгования сигналов радиоизлучающих динамических объектов (ДО) не являются новыми, и сталкиваясь с их решением приходится множеству разработчиков радиотехнических систем. В качестве элементов, выполняющих функции приема и пространственной селекции принимаемых сигналов, в зависимости от выбранной структуры, используются отдельные или совмещенные антенные системы (АС). В первом случае в качестве устройства первичной обработки сигналов используется диаграммообразующее устройство (ДОУ) на основе гибридных соединений [1] либо перекрестных переключателей [2], во втором случае ДОУ не требуется и сигналы рассогласования выделяются при вторичной обработке [3]. Компенсация ухода равносигнального направления (РСН) от геометрической оси АС в [1, 2] производится автоматически, а в [3] — путем периодически выполняемого выравнивания коэффициентов передачи в пеленгационных каналах по сигналу от источника контрольного сигнала. Это приводит к основному недостатку совмещенной амплитудной моноимпульсной АС — зависимости от контрольной антенны — и делает актуальным проведение исследования, направленного на его устранение. Предложенный в [4] порядок определения центральной точки группировки шумовых выборок и дисперсии шума открывает для этого новые возможности.

В данной работе предпринята попытка разработать метод совместного приема и моноимпульсного пеленгования сигналов радиоизлучающих ДО, базирующийся на выравнивании коэф-

фициентов передачи в пеленгационных каналах по дисперсиям шумов.

1. ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Пусть АС комплекса радиомониторинга ДО выполнена по схеме, приведенной на рис. 1.

Параметры элементов схемы обеспечивают синфазное сложение сигналов, принимаемых излучающими элементами ИЭ1...ИЭ4 в динамическом диапазоне принимаемых сигналов, что при выполнении условия наведения АС на ДО обеспечивает решение задачи приема сигналов.

Пусть также по результатам приема радиоизлучения с направления на контролируемый объект, его регистрации и обработки в полосе параллельного анализа ΔF в каждом информационном канале ИК1...ИК4 построены усредненные периодограммы, соответствующие смещенным на ширину диаграммы направленности относительно геометрической оси направлениям в вертикальной $j = 1, j = 3$ и горизонтальной $j = 2, j = 4$ плоскостях:

$$[f_i, P_{ji}], \quad j = \overline{1, 4}, \quad i = \overline{1, N},$$

где N — число частотных каналов, P_{ji} — спектральная плотность мощности сигнала в i -м частотном канале j -й периодограммы.

Динамический диапазон изменения P_{ji} в устройстве обработки согласован с динамическим диапазоном сигналов на выходах ИК1...ИК4. Априорная информация о числе каналов с сигналом и шумом задана неравенствами $N1 \gg 1, N1 \ll N - N1$, где

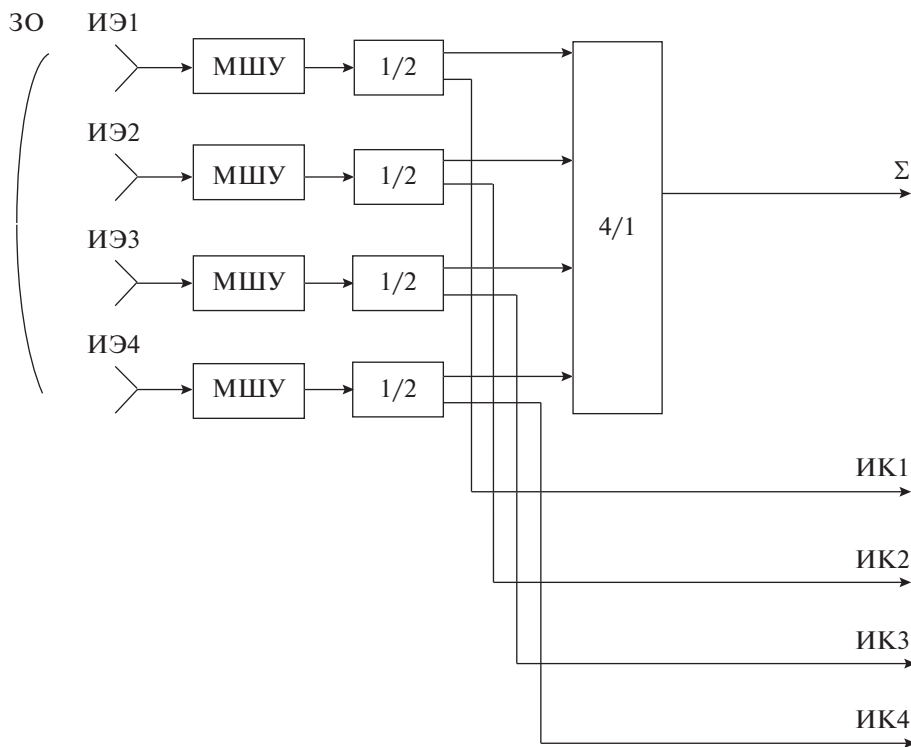


Рис. 1. Структурная схема антенной системы радиомониторинга динамических объектов: ЗО – зеркальный отражатель; ИЭ1...ИЭ4 – излучающие элементы; МШУ1... МШУ4 – малошумящие усилители; 1/2 – разветвители сигнала на два; 4/1 – четырехканальный сумматор; Σ – суммарный канал; ИК1...ИК4 – информационные каналы.

N_1 – число частотных каналов, занимаемых сигналом. Известно также, что присутствующий в периодограмме сигнал является единственным, полностью находится в ее пределах, а его расположение на частотной оси не определено.

В качестве показателя, характеризующего качество решения задачи пеленгования, примем выраженное в процентах изменение значения ухода РСН в разрабатываемом методе $\Delta РСН_{рм}$ по отношению к известному $\Delta РСН_{и}$

$$I = \frac{|\Delta РСН_{рм} - \Delta РСН_{и}|}{\Delta РСН_{и}} \times 100\%. \quad (1)$$

Требуется разработать метод совместного приема и моноимпульсного пеленгования сигналов радиоизлучающих динамических объектов, позволяющий за счет незначительного увеличения $\Delta РСН_{рм}$ по отношению к значению, найденному в [3], отказаться от необходимости использования контрольной антенны.

Уменьшение ухода РСН относительно геометрической оси АС требует периодического выравнивания коэффициентов передачи в пеленгационных каналах ИК1...ИК3 и ИК2...ИК4 в процессе эксплуатации комплекса, что при линейности приемных трактов после нормировки разностных сигналов к суммарным в идеале обеспечит минимально возможный уход РСН от геометрической оси антенны и независимость крутизны форми-

руемых дискриминационных характеристик по азимуту и углу места от уровня принимаемого сигнала. В качестве параметров, позволяющих выполнить такую операцию в условиях отсутствия источника контрольного сигнала, по аналогии с [3] используем дисперсии шумов в пеленгационных каналах $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \sigma_3^2, \sigma_4^2$.

Для каждого j -го информационного канала по аналогии с [4] определим максимальное значение P_{ji} :

$$P_{j \max} = \max_{i \in [1, \dots, N]} P_{ji}. \quad (2)$$

Сформируем на интервале $[0, \dots, P_{j \max}]$ множество из M точек, отстоящих друг от друга на интервал Δ :

$$P_{jm} = [0, \Delta, 2\Delta, \dots, M\Delta], \quad \Delta \ll P_{j \max}. \quad (3)$$

Априорная неопределенность по числу накоплений h при построении усредненных периодограмм $[f_i, P_{ji}]$ позволяет высказать предположение о стремлении законов распределения шумовых выборок к гауссовскому с ростом h .

По аналогии с [4] введем в рассмотрение функцию, характеризующую степень близости элемента P_{ji} к точке P_{jm} из множества $[0, \Delta, 2\Delta, \dots, M\Delta]$:

$$\mu(P_{jm}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{1 + m(P_{jm} - P_{ji})^2}, \quad (4)$$

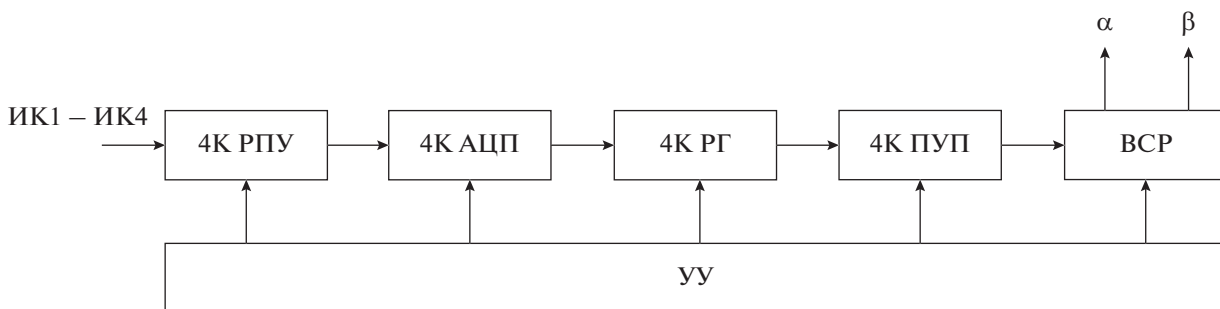


Рис. 2. Структурная схема формирователя сигналов рассогласований в плоскостях пеленгации: 4К РПУ – четырехканальное радиоприемное устройство; 4К АЦП – четырехканальный аналого-цифровой преобразователь; 4К РГ – четырехканальный регистратор; 4К ПУП – четырехканальный построитель усредненных периодограмм; ВСП – вычислитель сигналов рассогласований по азимуту и углу места; УУ – устройство управления.

где m – формоопределяющий параметр, характеризующий степень концентрации элементов P_{ji} вблизи точки P_{jm} .

При соответствующем выборе m функция принадлежности (4) обладает фильтрующими свойствами к сильно отклоненным от P_{jm} параметрам P_{ji} и не обладает таковыми к слабо отклоненным, что позволяет предварительно оценить центральную точку шумового кластера P_{jm^*} как абсциссу ее локального максимума по алгоритму

$$P_{jm^*} = \arg \max_{m \in [1, \dots, M]} \mu(P_{jm}). \quad (5)$$

При разработке алгоритма определения центральной точки шумового кластера воспользуемся следующими положениями:

- оценивание центральной точки шумового кластера P_{jm^*} по максимуму функции $\mu(P_{jm})$ из-за низкой ее крутизны вблизи точки локального максимума неэффективно;

- максимально правдоподобную оценку P_{jm^*} при симметричной относительно максимума форме функции $\mu(P_{jm})$ обеспечивает ее оценивание по методу центра тяжести;

- симметричность формы функции $\mu(P_{jm})$ может нарушаться из-за наличия «хвоста» в законе распределения шумовых выборок в построенных усредненных периодограммах.

С учетом сказанного определим уточненное значение P_{jm^*} по абсциссе центра тяжести фигуры, ограниченной кривой $\mu(P_{jm})$ в пределах от $P_{jE(0.5m^*)}$ до $P_{jE(1.5m^*)}$:

$$\bar{P}_{jm^*} = \frac{\sum_{v=E(0.5m^*)}^{E(1.5m^*)} \mu(P_{jv}) P_{jv}}{\sum_{v=E(0.5m^*)}^{E(1.5m^*)} \mu(P_{jv})}, \quad (6)$$

где $E(*)$ – целая часть от числа, стоящего в скобках.

Переформируем исходные периодограммы путем вычитания из каждого ее элемента \bar{P}_j и по полученным массивам $[f_i, P_{ji} - \bar{P}_{jm^*}]$ определим дисперсии шумов в каналах $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \sigma_3^2, \sigma_4^2$ путем селекции и усреднения отрицательных элементов $P_{ji} - \bar{P}_{jm^*}$.

Знание $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \sigma_3^2, \sigma_4^2$ позволяет определить коэффициенты, характеризующие степени неидентичности третьего канала относительно первого, а второго относительно четвертого:

$$k_{31} = \sigma_1^2 / \sigma_3^2, \quad k_{24} = \sigma_4^2 / \sigma_2^2. \quad (7)$$

Коэффициенты k_{31} и k_{24} показывают, во сколько раз необходимо увеличить коэффициенты передачи третьего и второго каналов, чтобы они сравнялись соответственно с коэффициентами передачи первого и четвертого.

Выделение сигнального кластера в каждом информационном канале произведем путем селекции и усреднения положительных элементов $P_{ji} - \bar{P}_j$, превышающих порог:

$$P_0 = 2\sigma_j^2 \ln \frac{1}{P_{лт}}, \quad (8)$$

где $P_{лт}$ – заданная вероятность ложных тревог при обнаружении сигнала.

Обозначая через \hat{P}_j усредненную мощность сигнала в каждом информационном канале, сигналы рассогласований в азимутальной α и угломестной β плоскостях запишем в виде

$$\alpha = \frac{\hat{P}_2 - \hat{P}_4 k_{24}}{\hat{P}_2 + \hat{P}_4 k_{24}}, \quad \beta = \frac{\hat{P}_1 - \hat{P}_3 k_{31}}{\hat{P}_1 + \hat{P}_3 k_{31}}. \quad (9)$$

Структурная схема формирователя сигналов рассогласований в плоскостях пеленгации приведена на рис. 2.

Формирователь сигналов работает следующим образом. Сигналы ИК1...ИК4 с моноимпульсной антенной системы поступают на входы четырех-

канального устройства обработки, в котором последовательно соединены: четырехканальное радиоприемное устройство 4К РПУ, четырехканальный аналого-цифровой преобразователь 4К АЦП, четырехканальный регистратор 4К РГ и четырехканальный построитель усредненных периодограмм 4К ПУП. Они выполняют функции селекции принимаемых сигналов в согласованной полосе частот и их преобразования на промежуточную частоту (ПЧ), аналогово-цифрового преобразования, регистрации и построения усредненной периодограмм $[f_i, P_{ji}]$. Построенные периодограммы поступают на входы вычислителя сигналов рассогласований по азимуту и углу места (ВСП), где производится вычисление дисперсий шумов в каналах $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \sigma_3^2, \sigma_4^2$, степеней неидентичности третьего канала относительно первого $k_{31} = \sigma_3^2 / \sigma_1^2$ и второго относительно четвертого $k_{24} = \sigma_2^2 / \sigma_4^2$, усредненных мощностей сигналов в каналах $\hat{P}_1, \hat{P}_2, \hat{P}_3, \hat{P}_4$ и сигналов рассогласования в плоскостях пеленгации α, β . Управление работой четырехканального устройства обработки и ВСП осуществляется с устройства управления УУ.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Для проверки эффективности разработанного метода были проведены натурные испытания контура слежения, собранного по схеме: моноимпульсная АС—формирователь сигналов рассогласований—электропривод наведения по азимуту и углу места. В качестве объекта для сравнения был выбран метод, базирующийся на выравнивании коэффициентов передачи в пеленгационных каналах по контрольному источнику сигнала [3], в качестве сравниваемого параметра — уход РСН от геометрической оси АС. Имитация неидентичности производилась путем введения в каналы ИК1 и ИК2 аттенюаторов с затуханием 1 дБ. Определение входящих в (1) $\Delta РСН_{рм}$ и $\Delta РСН_{и}$ производилось путем выполнения следующей последовательности операций:

- однократное оценивание коэффициентов k_{31} и k_{24} в разработанном методе и объекте сравнения производилось путем вычисления $k_{31} = \sigma_3^2 / \sigma_1^2, k_{24} = \sigma_2^2 / \sigma_4^2$ для разработанного метода и $k_{31} = \hat{P}_3 / \hat{P}_1, k_{24} = \hat{P}_2 / \hat{P}_4$ для объекта сравнения;
- механическое совмещение геометрической оси АС с направлением на контрольный источник сигнала;
- отклонение геометрической оси АС по азимуту и углу места на ширину ДН от ранее установленного направления;

- обработка рассогласований контурами слежения, оценивание $\Delta РСН_{рм}$ и $\Delta РСН_{и}$;
- вычисление I ;
- десятикратное повторение приведенных выше операций и вычисление усредненного значения I .

Параметры источника контрольного сигнала выбиралась таким образом, чтобы отношение сигнал/шум в каналах с сигналом составляло 13 дБ, а в построенных усредненных периодограммах выполнялись заданные при постановке задачи условия по числу каналов с сигналом и шумом.

По результатам проведенных измерений полученное значение выбранного показателя качества по азимутальной и угломестной координате не превысило 12%, что, по-видимому, явилось той ценой, которую пришлось заплатить за отказ от использования источника контрольного сигнала.

Это позволило определить область определения разработанного метода — т.е. системы слежения за динамическими объектами, в которых требование к отсутствию источника контрольного сигнала доминирует над требованием к показателю точности определения ухода РСН и допускается незначительное ухудшение данного показателя при условии полного обеспечения первого требования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе предложенной методики выравнивания коэффициентов передачи в пеленгационных каналах получена возможность ценой незначительного (12%) ухудшения значения ухода РСН по сравнению с полученным значением в [3] обеспечить независимость системы слежения за ДО на базе совмещенной моноимпульсной АС от источника контрольного сигнала.

Характерной чертой разработанного метода является компенсация неидентичности коэффициентов передачи в пеленгационных каналах по результатам сравнения дисперсий шумов.

Областью применения разработанного метода являются системы слежения за ДО с повышенными требованиями к скрытности работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лайлс Ж.Ф. // Зарубеж. радиоэлектроника. 1970. № 6. С. 43.
2. Ларионов Б.А., Музыченко Н.Ю., Фоминченко Г.Л. и др. Способ обработки сигналов при амплитудной псевдомоноимпульсной пеленгации Пат. РФ № 2157549. Оpubл. офиц. бюл. "Изобретения. Полезные модели" № 28 от 10.10.2000. С. 8.
3. Фомичев К.И., Леонов А.И. Моноимпульсная радиолокация. М.: Сов. радио, 1969.
4. Музыченко Н.Ю. // Радиотехника. 2012. № 5. С. 41.