

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.3.8>

УДК: 621.396

## ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ РАДИООБМЕНА С ПРИМЕНЕНИЕМ ПСП

С.В. Абышев

ФГБОУ ВО «МИРЭА – РОССИЙСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
119454, Москва, пр. Вернадского, 78

Статья поступила в редакцию 30 января 2023 г.

**Аннотация.** Структура радиообмена показывает схему взаимосвязи беспилотных летательных аппаратов с центром управления. Для защиты от несанкционированного доступа к каналам управления и навигации следует скрыть такие данные и повысить их помехоустойчивость. Цель работы заключается в использовании сигналов с псевдослучайной последовательностью и дублировании управляющих и навигационных блоков в информационном канале малоразмерного летательного аппарата. В начале работы представлена общая структурная схема радиообмена между беспилотным летательным аппаратом и центром управления. Рассмотрена модель 2-элементной антенной решетки, состоящая из двух ненаправленных антенных элементов. На основе которой можно сделать вывод о приходе сигнала с фазовым сдвигом, с учетом которого можно определить выходной сигнал решетки. Важным фактором является синхронизация и шифрование сигнала. Синхронизация данных может быть использована путем синхронной передачи сигналов между беспилотным летательным аппаратом и центром управления. Для снижения вероятности перехвата синхронного сигнала содержащие его пакеты данных передаются в псевдослучайной последовательности. Синхронизация достигается за счет использования микро навигационной системы посредством непрерывной

радиопередачи от наземного источника и одновременного приема и записи сигнала на беспилотном летательном аппарате. В качестве шифрования или скремблирования может быть использован одноразовый шифроблокнот с обратимым симметричным преобразованием закодированной информации. С помощью генератора случайных чисел генерируется последовательность случайных данных, на основе которых создается массив ключевой информации, привязанный к определенному периоду использования. Для обработки сигнала можно использовать фазовый метод. Измеряя сдвиг фазы с помощью фазового детектора, можно определить местоположение источника радиосигнала по отношению к нормали базы. Измерения возможно проводить цифровой приемной антенной решеткой. Обработка сигнала с помощью цифровой приемной антенной решетки осуществляется диаграммообразующим устройством и блоком адаптивного процессора. В результате все данные с применением такого подхода заносятся в информационный блок с применением псевдослучайной схемой изменения кодирования, псевдослучайной перестановкой навигационного и управляющего блоков.

**Ключевые слова:** МРЛА, псевдослучайная последовательность, ПИК, ПСПБ, схема радиообмена.

**Автор для переписки:** Абышев Станислав Владимирович,  
[svabyshev@gmail.com](mailto:svabyshev@gmail.com)

## **Введение**

Малоразмерные летательные аппараты (МРЛА) широко используются в гражданских и оборонных целях для решения различных задач. В последнем случае существуют возможности перехвата управления МРЛА или создания помех каналам управления, передачи информации и навигации в результате применения различных средств радиопротиводействия. Для перехвата управления МРЛА можно использовать навигационный канал и канал управления. Повышение помехозащищенности каналов связи между МРЛА и

центром управления (особенно по навигационному каналу) является важной актуальной радиотехнической задачей.

## 1. Структура радиообмена

Рассмотрим общую структурную схему радиосвязи МРЛА и центра управления (рисунок 1).



Рис. 1. Структурная схема радиосвязи центра управления и МРЛА

Для повышения помехоустойчивости, предлагается использовать новую структуру радиообмена. Маскировать информацию о местоположении МРЛА, размещая ее в общем информационном потоке данных с применением псевдослучайной последовательности (ПСП). Использовать псевдослучайную перестройку частоты радиоканалов, псевдослучайную схему изменения кодирования (ПИК) передаваемой информации с псевдослучайной перестановкой блоков (ПСПБ) управляющей информации в блоках радиообмена. Для этого надо рассмотреть модель сигнала, синхронизацию и шифрование сигнала, обработку сигнала. На рисунке 1 представлена общая схема взаимодействия МРЛА и центра управления.

## 2. Модель сигнала

Одной из важнейших характеристик решетки является ее разрешающая способность, т. е. минимальное угловое расстояние между направлениями

прихода сигналов, при котором возможно их различение по пространственным параметрам – угол места и азимут.

Разрешающая способность возрастает с увеличением расстояний между элементами антенной решетки. За счет этого становится возможным выделение полезного сигнала на фоне шумов и помех даже тогда, когда угловое разнесение источников сигнала и помех оказывается невелико.

Ниже представлена 2-элементная антенная решетка, состоящую из двух ненаправленных антенных элементов (АЭ), расположенных на расстоянии  $d$  друг от друга (рисунок 2).

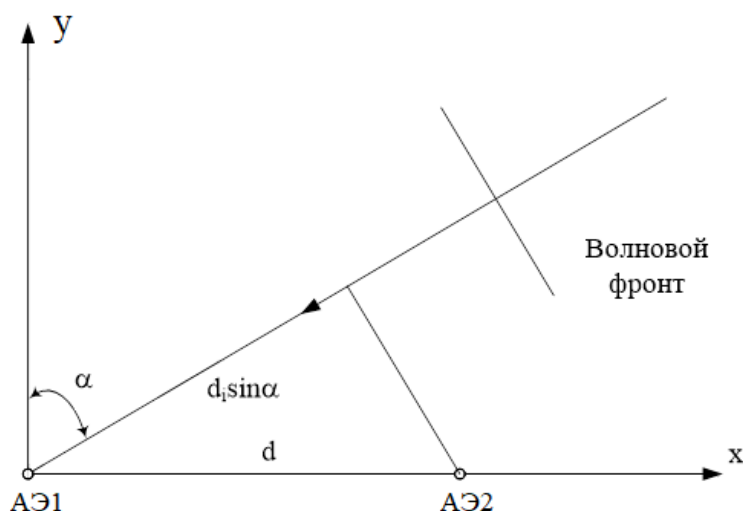


Рис. 2. Воздействие плоского фронта на 2-элементную антенную решетку

Из рисунка видно, что если фронт электромагнитной волны, воздействующей на решетку, расположен под углом  $\alpha$  относительно нормали, то сигнал на выходе 1-го антенного элемента задержан относительно второго на величину:

$$\tau = \frac{(d \sin \alpha)}{c}, \quad (1)$$

где  $\tau$  – время задержки сигнала,  $d$  – расстояние между АЭ,  $c$  – скорость распространения электромагнитной волны.

В предположении, что сигнал, воздействующий на решетку, является узкополосным с длиной волны  $\lambda_0$ , задержка по времени сводится к фазовому сдвигу  $\Delta\varphi$  равному:

$$\Delta\varphi(\alpha) = 2\pi \left( \frac{d}{\lambda_0} \right) \sin \alpha. \quad (2)$$

При взвешивании сигналов с выходов АЭ с единичными весовыми коэффициентами выходной сигнал решетки  $y(t)$  будет представлять собой сумму сигналов с выходов АЭ с учетом фазового сдвига:

$$y(t) = \sum_{i=1}^2 x(t) e^{j(i-1)\Delta\varphi(\alpha)}. \quad (3)$$

### 3. Синхронизация и шифрование сигнала

Для синхронизации сигнала между МРЛА возможно использовать синхронную передачу данных. Данная система передачи имеет высокую пропускную способность и скорость передачи. Для предотвращения или уменьшения вероятности перехвата синхросигнала пакеты данных с синхросигналом выставлены в ПСП. Синхронизация осуществляется с помощью системы микронавигации (СМН) путем непрерывного радиоизлучения от источника, установленного на земле и одновременного осуществления приема и регистрации сигнала на борту МРЛА. Синхронизация измеренного радиосигнала и данных, полученных от СМН, осуществляется с помощью импульса секундной метки времени (СМВ), который поступает от приемника спутниковой навигационной системы (СНС), входящего в состав бортовой навигационной системы. Для осуществления синхронизации используются следующие шаги алгоритма: формируется траекторный сигнал, опорно-траекторный сигнал и определяется погрешность позиционирования. Для выделения траекторного сигнала радиосигнал, принятый на борту МРЛА, умножается на комплексно-сопряженный радиосигнал, принятый на Земле. Для полученного в результате сигнала можно записать:

$$s_{\Delta}(t) = s_1(t) s_2^*(t) = U_m e^{j\{kr_m(t) + 2\pi\Delta f_{12}t + \delta\varphi_1(t) - \delta\varphi_2(t) + \Delta\varphi\}}, \quad (4)$$

где  $s_1(t)$  – сигнал, принятый первым приемником;  $s_2(t)$  – сигнал, принятый вторым (неподвижным) приемником;  $U_m$  – амплитуда результирующего сигнала;

$r_m(t)$  – расстояние от источника радиоизлучения (ИРИ) до траектории перемещения фазового центра антенны (ФЦА) на борту МРЛА;  $\Delta f_{12}$  – отстройка по частоте между двумя приемниками;  $\delta\varphi_1(t)$  и  $\delta\varphi_2(t)$  – нестабильности фазы, вносимые в сигнал приемниками;  $\Delta\varphi$  – постоянный фазовый сдвиг.

После пропускания сигнала  $s_\Delta(t)$  через фильтр низких частот его частота дискретизации понижается до значения  $F_d$ , превышающего удвоенную максимальную доплеровскую частоту траекторного сигнала. В результате формируется траекторный сигнал  $s_m(t)$ , который используется для оценки точности позиционирования ФЦА на борту МРЛА.

Для формирования опорного сигнала используются координаты движения ФЦА:

$$s_0(t) = U_0 e^{jk r_0(t)}, \quad (5)$$

где  $r_0(t)$  – счисление координат движения ФЦА,  $U_0$  – амплитуда сигнала.

Для определения погрешности позиционирования ФЦА вычисляется сигнал рассогласования:

$$e(t) = s_m(t) s_0^*(t) = U_m(t) U_0 e^{j[\varphi_m(t) - \varphi_0(t)]} = U_m(t) U_0 e^{jk[r_m(t) - r_0(t)]}. \quad (6)$$

Тогда погрешность фазы траекторного сигнала в радианах равна:

$$d\varphi(t) = \text{unwrap}\{\text{angle}(e(t))\}, \quad (7)$$

где  $\text{unwrap}\{\}$  – функция, корректирующая фазу на  $\pm 2\pi$ , если возникают разрывы фазы по модулю, превышающие значение  $\pi$ .

В качестве шифратора можно использовать скремблер в виде одноразовых шифроблокнотов с обратимым симметричным преобразованием кодируемой информации. Во время предполетной подготовки при помощи генератора случайных чисел генерируется последовательность случайных данных, из которых формируется массив ключевой информации, привязанной к допустимому времени использования. Т.е. каждая часть массива предназначена для использования в определенный промежуток времени и подлежит

безвозвратному автоматическому стиранию по завершению времени актуальности данных. Подготовленная ключевая информация загружается во все узлы сети (МРЛА, ретрансляторы, центр управления). Все узлы сети производят синхронизацию внутренних часов по СНС. Запускаются встроенные алгоритмы стирания устаревшей ключевой информации. Защищенный обмен полезной информацией осуществляется путем обмена сообщениями, прошедшими процедуру скремблирования с ПСП. Приемные устройства производят декодирование принятых сообщений при помощи известного набора ключей из одноразового шифроблокнота.

#### 4. Обработка сигнала

Одним из способов обработки сигнала является фазовый метод пеленгации при использовании пары антенн, разнесенных в пространстве, называемых дуплетом. Разность фаз принятого сигнала, при условии, что расстояние до ИРИ много больше  $d$  можно определить из выражения (3). Измеряя сдвиг фаз  $\Delta\varphi$  с помощью фазового детектора, представляется возможным определить местоположение ИРИ относительно нормали к базе

$$\alpha = \sin^{-1}(\Delta\varphi / kd). \quad (8)$$

Для определения местоположения ИРИ по азимуту и углу места необходимо произвести измерения не только для базы  $d_1$ , но и для базы  $d_2$  (рисунок 3).

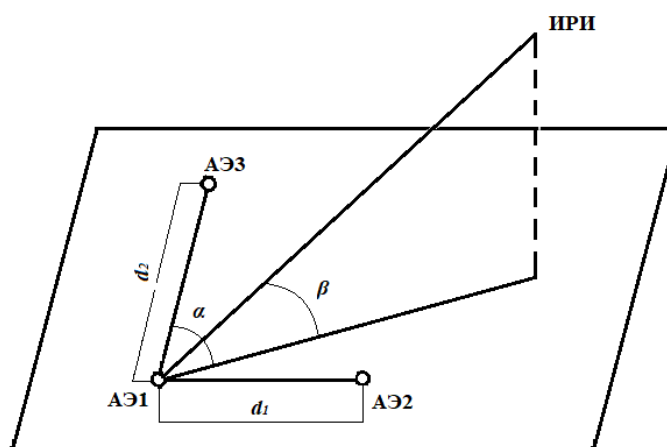


Рис. 3. Фазовая пеленгация радиоисточников

Тогда разность фаз  $\Delta\varphi_1$  и  $\Delta\varphi_2$  будет определяться как:

$$\Delta\varphi_1 = kd_1 \sin \alpha \cos \beta, \quad (9)$$

$$\Delta\varphi_2 = kd_2 \cos \alpha \cos \beta, \quad (10)$$

где  $\beta$  – угол места ИРИ.

Решив оба уравнения, можно определить азимут и угол места ИРИ. Однако стоит учесть факторы, влияющие на точность определения.

При известной длине волны  $\lambda$  и базы  $d$  ошибки пеленгации будут возникать при измерении  $\Delta\varphi$ . Следовательно, из (8) можно записать, что:

$$\Delta\alpha = \Delta_{\Delta\varphi} / kd \cos \alpha, \quad (11)$$

где  $\Delta\alpha$  – ошибка пеленгации,  $\Delta_{\Delta\varphi}$  – ошибка разности фаз.

Максимальная точность местоопределения ИРИ будет определяться при  $\alpha = 0$ . Точность определения будет зависеть от  $2\pi d / \lambda$ . Если  $d > \lambda / 2$  – будет возникать неоднозначность пеленгации.

Неоднозначность пеленгации может быть устранена путем применения направленных приемных антенн, ширина ДН которых не превышает ширины зоны однозначности или построением нескольких баз антенн различной величины (рисунок 4).

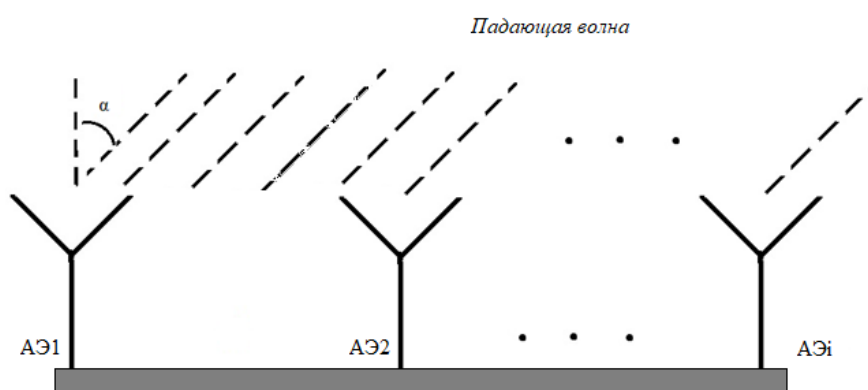


Рис. 4. Фазовая пеленгация радиосигналов нескольких баз

При наличии дополнительных аддитивных помех на выходах антенн картина определения разности фаз в дуплете сигналов усложняется и будет иметь вид, показанный на рисунке 5.



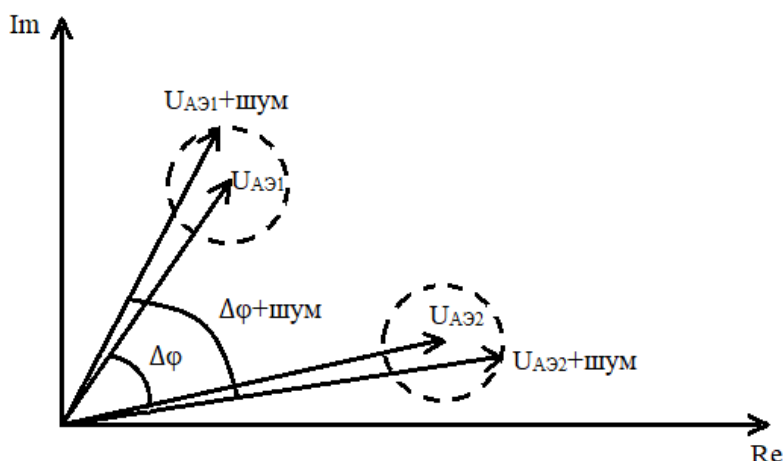


Рис. 5. Векторная диаграмма формирования выходных сигналов

Ввиду того, что шум имеет случайное значение, то при сложении сигналов/шумов, принимаемыми приемниками АЭ цифровой приемной антенной решеткой (ЦПАР), можно получить необходимую точность измерения. Обработку сигнала с помощью ЦПАР осуществляет диаграммообразующее устройство (ДОУ) и блок адаптивного процессора. Сигналы с выходов АЭ поступают в ДОУ, где они взвешиваются:

$$X(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)]^T, \text{ при } 0 < t < T, \quad (12)$$

где  $T$  – интервал наблюдения. Совокупность весовых коэффициентов образуют вектор:

$$W = [w_1, w_2, \dots, w_N]^T. \quad (13)$$

Далее включается адаптивный процессор, который реализовывает некоторый алгоритм адаптации на основе имеющейся априорной информации о сигнально-помеховой обстановке.

Тогда сигнал на выходе адаптивной антенной решетки может быть записан в виде линейной комбинации вектора  $X(t)$ :

$$y(t) = W^T X(t) = X(t) W^T. \quad (14)$$

Полагая, что сигналы на выходах АЭ представляют собой аддитивную сумму полезного сигнала, помех и шумов, вектор входных сигналов может быть записан в виде:

$$X(t) = S(t) + \sum_{i=1}^k P_i(t) + n(t), \quad (15)$$

где  $S(t)$  – вектор полезного сигнала;  $P_i(t)$  – вектор  $i$ -ой помехи;  $n(t)$  – шумовой вектор;  $k$  – число помех.

## 5. Структурная схема

Формирование новой структурной схемы радиообмена, как было сказано выше, заключается в дублировании навигационного и управляющего каналов в информационном канале с применением ПСП. Преимуществом такой реализации является надежность данных, простота исполнения, безопасность. (Рисунок 6).

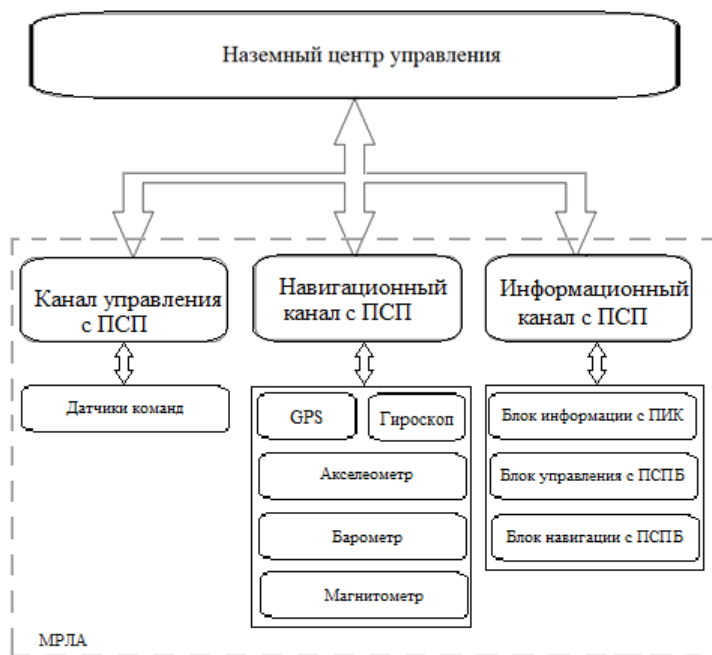


Рис. 6. Структурная схема радиообмена

В информационный канал включаются следующие блоки: блок информации с ПИК передаваемой информацией, блок управления и блок навигации с ПСПБ управляющей и навигационной информацией соответственно. В случае воздействия на канал управления или навигационный канал, представляется возможным использовать информационный канал в качестве резервного канала для завершения поставленной задачи или возврата на базу. Этот метод дублирования блоков управления и навигации в

информационном канале обеспечивает сохранность и безопасность данных. Недостатки такой структуры могут быть в ограничение пропускной способности, задержка обработки данных и помехи. В этом случае можно применить сжатие данных и для снижения помех можно передавать данные на разных частотах и поочередно. Также, возможно использовать методы коррекции ошибок, например, прямая коррекция ошибок или автоматический запрос повтора. В некоторых случаях для передачи информации с малых МРЛА и передачи команд управления используются промежуточные ретрансляторы, расположенные на других воздушных средствах.

## **Заключение**

В заключении можно сделать вывод о применимости такой схемы в нынешних реалиях. Дублирование каналов связи в информационном канале помимо их реализации с ПСП способствует дополнительной защите МРЛА от воздействия различных помех. Так, в случае воздействия на навигационный канал связи МРЛА сможет обратиться к информационному каналу, где заложены данные о местоположении и точки отправления. В целом, структура информационного канала с данными навигации и управления обеспечивает ряд преимуществ, но также имеет свои ограничения, которые необходимо учитывать при реализации такой структуры радиообмена.

## **Литература**

1. Абышев С.В. Обработка сигналов адаптивными антенными решетками. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2021. №7. С.69-74. <https://doi.org/10.18127/j20700784-202107-06>
2. Абышев С.В. Методы локализации малоразмерных летательных аппаратов. *Антенны*. 2022. №2. С.47-52. <https://doi.org/10.18127/j03209601-202202-06>
3. Абышев С.В., Трефилов Н.А. Пеленгационные методы определения местоположения малоразмерных БПЛА. *V Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы и перспективы*

*развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем». 2021. С.79-82.*

4. Ayshev S.V. Methods for locating UAVs and radio control system devices. *Scientific Israel - Technological Advantages*. 2021. №1, 2. P.185-187.
5. Ayshev S.V., Trefilov N.A. Antenna element interposition. *International Scientific – Practical Conference «INFORMATION INNOVATIVE TECHNOLOGIES», Information Innovative Technologies: Materials of the International scientific – practical conference*. 2020. P.226-230.

**Для цитирования:**

Абышев С.В. Формирование структурной схемы радиообмена с применением ПСП. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2023. №3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.3.8>

Web of Science Researcher ID: A-4456-1231

ORCID: 0000-1112-4456-1235

Scopus ID: 12846578598