

СИНХРОНИЗАЦИЯ ЭКВИДИСТАНТНОЙ SDR-РЕШЕТКИ НА БПЛА ПРИ ВЛИЯНИИ ФЛУКТУАЦИОННЫХ ПОМЕХ И АЭРОДРЕЙФА

DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-10-4-12

Демин Олег Александрович,
МИРЭА – Российский технологический университет,
Москва, Россия, demin_o@mirea.ru

Костин Михаил Сергеевич,
МИРЭА – Российский технологический университет,
Москва, Россия, kostin_m@mirea.ru

Manuscript received 10 August 2025;
Accepted 11 October 2025

Ключевые слова: эквидистантная SDR-решетка на БПЛА, синхронизация, опорный радиоимпульс, разнесенный прием, флуктуационная помеха, аэродрейф, корреляционная обработка

Целью исследования является создание алгоритма синхронизации сигналов, принятых разнесенными элементами эквидистантной SDR-решетки на БПЛА, по установленному опорному радиоимпульсу. В работе описана структура эквидистантной системы разнесенного приема и разработана программная модель, учитывающая квази-случайное положение – аэродрейф приемных элементов в пространстве в заданном радиусе и направлении с которого приходит опорный сигнал. На базе программной модели реализован алгоритм, позволяющий вычислить матрицу временных задержек системы. Приведена оценка влияния шумов и квазислучайных пространственных перемещений элементов SDR-решетки, составляющих научную проблематику в области обеспечения стабильного приема распределенной системы. Разработан алгоритм определения направления прихода сигнала и пространственных смещений под воздействием квази-случайных аэродрейфов в заданном радиусе. Показано, что предложенный алгоритм синхронизации позволяет определить азимутальный угол прихода опорного сигнала с точностью до 1° в угловом секторе от -60° до 60° и определить пространственные смещения (аэродрейф элементов SDR-решетки) в одной из плоскостей с абсолютной ошибкой менее 1 см при отношении сигнал-шум 0 дБ и частоте передискретизации 10 ГГц, относительно исходного положения в заданной плоскости. Получены результаты исследований максимальной амплитуды суммарного сигнала при изменении частоты и относительной задержки между принятыми сигналами. Произведена оценка абсолютной величины ошибки определения местоположения элементов SDR-решетки при изменении периода дискретизации системы, величины предельного аэродрейфа и варьируемом отношении сигнал/шум. Результаты исследования подтверждают, что рассмотренный опорный радиоимпульсный сигнал обеспечивает устойчивую синхронизацию при итеративной компенсации ошибок, а предложенный алгоритм матричного вычисления временных задержек позволяет сформировать режим квази-эквидистантного приема.

Информация об авторах:

Демин Олег Александрович, аспирант кафедры радиоволновых процессов и технологий, Института радиоэлектроники и информатики, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия. <http://orcid.org/0000-0002-9864-5338>

Костин Михаил Сергеевич, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой радиоволновых процессов и технологий, заместитель директора Института радиоэлектроники и информатики, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия. Scopus Author ID 57208434671, SPIN-код РИНЦ 5819-2178, <http://orcid.org/0000-0002-5232-5478>

Для цитирования:

Демин О.А., Костин М.С. Синхронизация эквидистантной SDR-решетки на бпла при влиянии флуктуационных помех и аэродрейфа // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №10. С. 4-12.

For citation:

O.A. Demin, M.S. Kostin, "Synchronization of the equidistant sdr array signals on the UAV under the influence of fluctuation interference and aerodrift," T-Comm, 2025, vol. 19, no. 10, pp. 4-12. (in Russian)

Введение

Среди известных решений повышения устойчивости канала радиосвязи в сложной помеховой обстановке, применяются методы:

– *повышения энергии в канале радиосвязи.* Повышение энергии в этом случае достигается не только увеличением мощности передатчика, но и применением направленных антенных систем в передающей подсистеме для уменьшения побочных излучений, а также в приемной подсистеме – для уменьшения уровня помех и повышения уровня полезного сигнала на входе приемника [1];

– *манипуляций радиосигнала, устойчивых к помехам.* Например, можно выделить PSK, QAM или же OFDM [2-4]. При этом совмещение 1-го и 2-го решений является основным способом повышения устойчивости в цифровых системах связи и передачи информации;

– *MIMO или пространственного мультиплексирования.* Пространственное мультиплексирование предполагает использование системы антенн для формирования пространственных каналов передачи между пользователями. За счет использования нескольких каналов передачи и системы антенн, влияние случайных помех усредняется. Кроме того, система приемных антенн позволяет использовать алгоритмы пространственной фильтрации и подавлять направленные источники помех [5];

– *адаптивного приема.* Самым перспективным решением является применение алгоритмов, которые позволяют адаптировать текущую конфигурацию системы к изменяющимся электродинамическим и помеховым условиям. Причем адаптивный алгоритм может быть применен в разных частях системы для обеспечения адаптивной пространственной [6], частотной [7] или временной [8] фильтрации сигналов, управляемых по определенным критериям.

Так, одной из впервые предложенных в работе [9] реализаций построения адаптивных систем, является конфигурируемая антенная SDR-решетка, сформированная БПЛА-группировкой. Так, квази-эквилидистантная SDR-решетка на БПЛА со сверхширокополосными элементами имеет управляемые возможности пространственного перераспределения главного лепестка диаграммы направленности, частотной перестройки, пространственной фильтрации многолучевых помех, а также формирования нестационарных релейных узлов сетей связи, в т.ч. промежуточных. При этом, алгоритмы управления SDR-решеткой требуют создания специальных методов синхронизации и меширования элементов антенной системы для обеспечения ее стабильной работы в условиях пространственного аэродрейфа и влияния флуктуационных помех [10]. В работе рассматриваются вопросы синхронизации системы разнесенного приема.

1. Применение опорных радиоимпульсов для обеспечения разнесенного приема антенной SDR-решеткой

Система разнесенного приема на основе БПЛА-группировки представляет собой приемно-передающие устройства (ППУ), состоящее из приемной антенны (A₁), SDR-приемника (РПУ), вычислительного устройства (ВУ), передатчика (РПДУ) и передающей антенны (A₂), размещенных на

каждом БПЛА [9]. Антенна A₁ и SDR-приемник необходимы для приема полезной информации и выделения сигналов синхронизации; ВУ – обеспечивает промежуточную обработку принятой информации и формирования импульсных последовательностей для передатчика РПДУ, а также управляющих сигналов для полетного контроллера БПЛА. При обработке опорный сигнал синхронизации заносится в буфер для его представления в виде пакета цифровых данных. Структура системы представлена на рисунке 1.

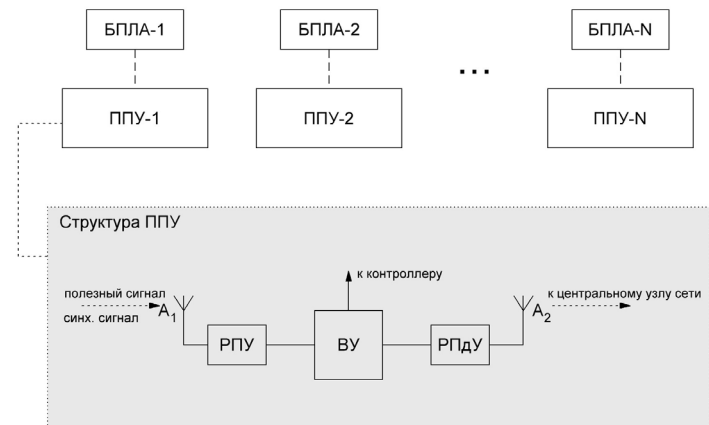


Рис. 1. Структура системы разнесенного приема и бортового радиомодуля ППУ на БПЛА (БПЛА-1...БПЛА-N – эквидистантная группировка SDR-решетки)

В связи с аэродрейфом и взаимной нестабильностью позиционирования БПЛА, крайне важным является решение двух задач: синхронизации РПУ и навигационное определение реального местоположения БПЛА. Так, ранее в работе [11] предложен способ синхронизации по непрерывному сигналу, отличающегося энергозатратной во времени ретрансляцией, а также представляющего нефлуктуационную помеху для ППУ и других радиосистем [12]. Для компенсации указанных проблем предлагается применение радиоимпульсных сигналов синхронизации с периодом следования более 1 с, поскольку такие сигналы позволяют обеспечить хороший динамический диапазон и точность синхронизации.

В случае выбора опорного радиоимпульсного сигнала, параметрами, определяющими условия синхронизации, могут быть фронт, спад и длительность импульса, формируемого каскадами РПУ [13, 14]. В зависимости от выбранной длительности импульса будет зависеть размер буфера для записи сигнала, а также максимальная возможная задержка во времени между принятыми сигналами. Так, в работе длительность импульса выбрана равной четырем периодам гармонического колебания заданной частоты в опорном радиоимпульсе. Отсюда опорный радиоимпульс $u(t)$ можно представить как

$$u(t) = u_0(t) \cdot \sin(\omega t + \phi_0) \tag{1}$$

где ϕ_0 – случайная фаза несущего сигнала, $u_0(t)$ – импульс, формируемый каскадами РПУ, принимающий значения

$$u_0(t) = \begin{cases} 1, & \text{при } 0 < t < 4T \\ 0, & \text{при } t > 4T \end{cases}$$

Опорный радиоимпульс может быть сформирован при помощи удаленного трансивера, либо одним из передатчиков ППУ. Причем в общем виде передатчик может находиться с любого направления относительно приемной системы.

Поскольку опорный сигнал, принятый РПУ в целом зависит от положения БПЛА, целесообразно перейти к упрощенному представлению SDR-решетки в виде системы приемных элементов (рис. 2). В идеальном случае, эквидистантная модель системы представляет собой равноудаленные антенны, находящиеся на одной прямой (при конфигурации системы разнесенного приема в виде линейной антенной решетки). Так, например, при шаге расположения антенн $d = 0,6$ м и выборе опорной частоты радиоимпульса 1 ГГц, расстояние между элементами системы будет соответствовать двум длинам волн.

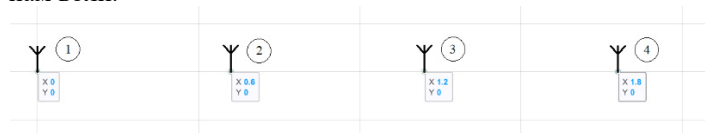


Рис. 2. Эквидистантная система, состоящая из четырех приемных антенн

В результате приема эквидистантной системой антенных элементов, получены следующие сигналы, показанные для случая отсутствия аддитивных шумов на рис. 3 (а) и для случая с наличием шумов и отношением сигнал/шум (ОСШ) на входе приемника 0 дБ на рис. 3 (б). Сигналы на рисунках нормированы по уровню полезного сигнала. Как можно заметить по временным эпюрам, в связи с равноудаленным расположением антенн, опорные сигналы, принятые каждой антенной, смещены во времени относительно соседних на равное время 0,742 нс.

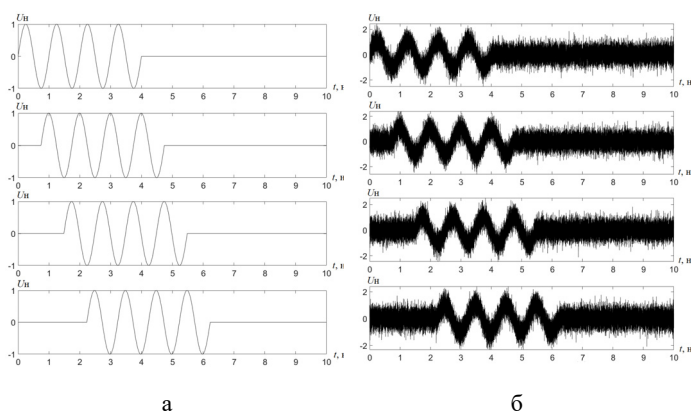


Рис. 3. Семейство нормированных опорных сигналов при ОСШ $\rightarrow \infty$ (а) и при ОСШ = 0 дБ (б), соответственно

Для определения направления на источник и синхронизации сигналов во времени применяется двойная взаимная корреляция.

Первая корреляционная функция определяется между принятым опорным сигналом и сформированным гетеродинным сигналом той же частоты [15]. Необходимо отметить наличие особых точек корреляционной функции, возникающих в связи с интервальным определением пилот-сигнала. Таким образом, для получения корреляции используются численные методики расчета, приведенные в [16]. При этом стоит учесть, что опорный сигнал обладает случайной фазой

ϕ_0 , вследствие чего результаты первой взаимной корреляции могут отличаться. Так, один из возможных результатов решения корреляционной функции показан на рисунке 4. Как можно заметить из графика функции коэффициента взаимной корреляции K_{r1} от отчетов взаимного сдвига, за счет некоррелируемости АБГШ в разные моменты времени, аддитивные шумы слабо влияют на результат конечной корреляции с сигналом гетеродина. Также стоит отметить, что в зависимости от времени приема сигнала, результат корреляции с сигналом гетеродина сдвигается во времени на величину соразмерную времени задержки, что более наглядно продемонстрировано на рисунке 5.

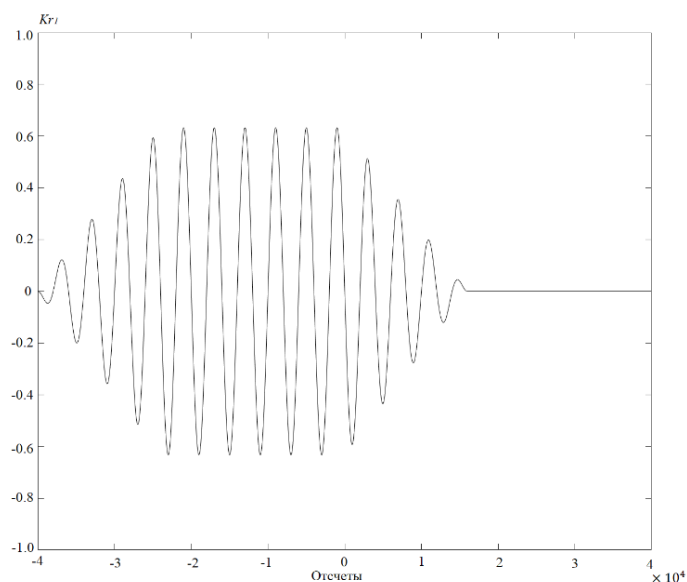


Рис. 4. Функция распределения коэффициента взаимной корреляции K_{r1} от выборки отчетов

Для соотношения принятых сигналов между собой и определения относительной задержки во времени, применяется вторая взаимная корреляция K_{r2} , которая решается численным методом ввиду наличия особых точек у функции корреляции K_{r1} . В результате приема сигнала четырьмя антеннами получены сигнальные отклики семейства функции K_{r2} , показанные на рисунке 5. Максимумы огибающих (не приведены на графиках) сигнальных откликов отмечены маркерами.

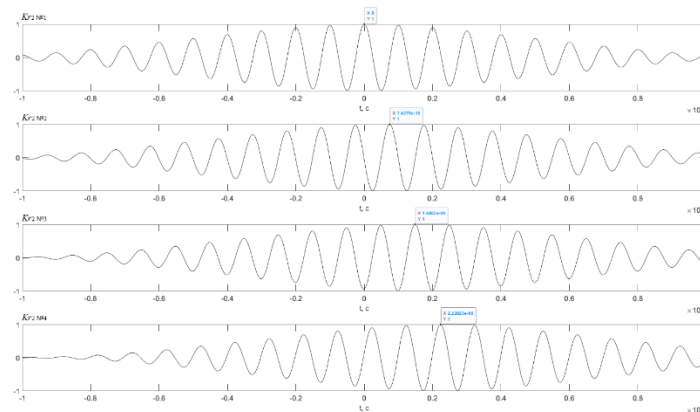


Рис. 5. Функции распределения коэффициента взаимной корреляции K_{r2} для четырех сигнальных откликов: $K_{r2 \text{ №1}}$, $K_{r2 \text{ №2}}$, $K_{r2 \text{ №3}}$, $K_{r2 \text{ №4}}$

Так, на основе выявленных максимумов сигнальных откликов построена матрица временных задержек ΔT , состоящая из N^2 элементов, где $N = 4$ – количество приемных антенн.

$$T = \begin{bmatrix} 0 & 7,438 & 14,870 & 22,293 \\ -7,428 & 0 & 7,433 & 14,855 \\ -14,870 & -7,433 & 0 & 7,423 \\ -22,2825 & -14,855 & -7,423 & 0 \end{bmatrix} \cdot 10^{-10} \quad (2)$$

Матрица (2) содержит взаимные задержки между принятыми сигналами для линейной эквидистантной антенной системы (рис. 2). Номер столбца n матрицы ΔT соответствует опорному сигналу $u_n(t)$, сформированному в соответствии (1) и принятом антенной под номером n , который сравнивается с опорным сигналом $u_m(t)$, соответствующим номеру строки m .

Используя усреднение по элементам матрицы ΔT можно рассчитать угол α прихода сигнала (3).

$$\alpha = \arcsin\left(\overline{\Delta t} \cdot \frac{c}{d}\right), \quad (3)$$

где c – скорость распространения волны (для упрощения скорость света), $\overline{\Delta t}$ – усредненное значение элементов матрицы временных задержек, полученное по формуле

$$\overline{\Delta t} = \frac{1}{N} \sum_{n>m} \frac{\Delta t_{mn}}{n-m}$$

где N – число элементов матрицы, значение столбца которых больше значения строки.

Для значений, полученных в (2), рассчитанный угол $\alpha = 21^\circ 40'$, при этом изначально заданный угол прихода сигнала $\alpha_0 = 21^\circ 48'$. Порядок ошибки определения угла не превышает 1° в секторе от -60° до 60° , при моделировании с частотой передискретизации. $f_d = 10$ ГГц. Точность измерения угла прихода может быть повышена за счет повышения частоты дискретизации оцифрованных сигналов, что показано на рисунке б(а).

Также можно использовать полученную матрицу для сопоставления принятых сигналов во времени и получения суммарного сигнала, обеспечивающего выигрыш по мощности и повышенную устойчивость к пространственным помехам. Итоговый суммарный сигнал показан на рисунке б(б). Видно увеличение амплитуды суммарного сигнала в четыре раза по сравнению с исходным пилот-сигналом.

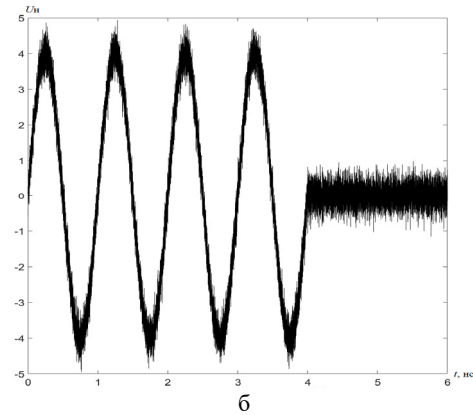
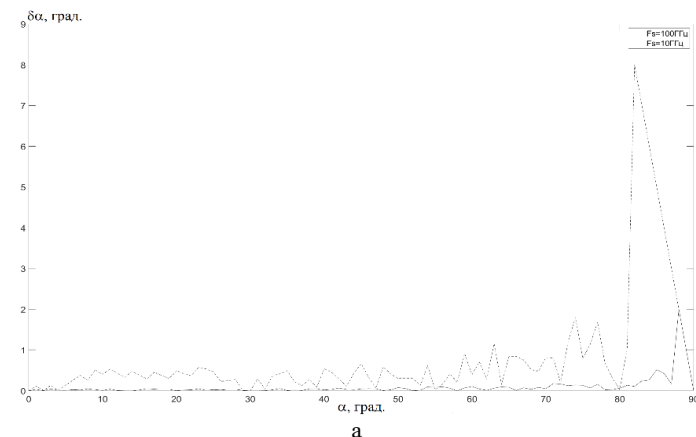


Рис. 6. Результаты моделирования: а) ошибка определения угла прихода от угла прихода, б) суммарный пилот-сигнал

Матрица временных задержек ΔT соответствует пространственному смещению антенных элементов на БПЛА относительно исходных референсных положений. Для оценки пространственных смещений элементов необходимы данные об априорных положениях элементов и направлении, с которого пришел сигнал синхронизации. Определим пространственные смещения для ранее описанной системы приемных антенн (рис. 2), при использованном ранее направлении на источник сигнала синхронизации $\alpha = 21^\circ 40'$. В этом случае необходимо рассчитать априорную временную задержку между принятыми сигналами, как

$$\Delta t_{\text{апр}} = \frac{d \cdot \sin(\alpha)}{c} \quad (4)$$

Принимая во внимание (4) по аналогии с (2) построим априорную матрицу задержек

$$\Delta T_{\text{апр.м.}} = \begin{bmatrix} 0 & 7,428 & 14,856 & 22,283 \\ -7,428 & 0 & 7,428 & 14,856 \\ -14,856 & -7,428 & 0 & 7,428 \\ -22,283 & -14,856 & -7,428 & 0 \end{bmatrix} \cdot 10^{-10} \quad (5)$$

Вычитая из матрицы (2) матрицу априорных задержек (5) получим разностную матрицу вида

$$\Delta T_{\text{разн}} = \begin{bmatrix} 0 & 5,722 & 1,444 & -2,834 \\ -5,722 & 0 & -4,278 & -8,556 \\ -1,444 & 4,278 & 0 & -4,278 \\ 2,834 & 8,556 & 4,278 & 0 \end{bmatrix} \cdot 10^{-11} \quad (6)$$

Значения в разностной матрице на порядок меньше, чем значения матрицы задержек (2). Фактически это значит, что смещение элементов крайне мало и не превышает 2 см при частоте передискретизации 10 ГГц.

2. Определение положений элементов SDR-решетки с использованием разностной матрицы

Добавим псевдослучайное смещение элементам антенной системы, имитирующее аэродрейф трех БПЛА (2, 3 и 4) из заданной позиции под воздействием внешних факторов. Один из случайных вариантов смещения элементов в пределах радиуса $\delta R = 0,35$ м показан на рисунке 7.

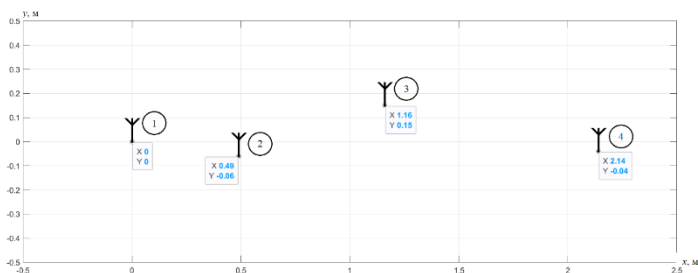


Рис. 7. Аэродрейф система приемных антенн с псевдослучайным смещением

Если не учитывать изменение точек приема, принимаемые сигналы будут расфазированы относительно друг друга. При этом амплитуда суммарного пилот-сигнала будет меньше, чем представленный на рис. 6(б), а матрица уходов утратит симметрию. На рисунке 8 (а) представлен суммарный пилот сигнал, полученный с помощью показанной на рисунке 7 системы приемных антенн с направления $\alpha = 21^\circ 40'$ без учета изменения положений элементов антенн (словно они находятся в соответствии с рис. 2). При этом уровень суммарного сигнала практически не превышает уровня шумов для ОСШ = 0 дБ. Таким образом теряется преимущество использования системы приемных антенн перед применением одной приемной антенны. Разностная матрица в этом случае, определяется аналогично (6)

$$\Delta T_{\text{разн}} = \begin{bmatrix} 0 & -3,238 & 4,154 & 2,969 \\ 3,238 & 0 & 7,392 & 6,207 \\ -4,154 & -7,392 & 0 & -1,185 \\ -2,969 & -6,207 & 1,185 & 0 \end{bmatrix} \cdot 10^{-10} \quad (7)$$

Из элементов матрицы (4) добавим дополнительные временные задержки к опорным сигналам для их синхронизации во времени. Результирующий суммарный опорный сигнал показан на рисунке 8(б).

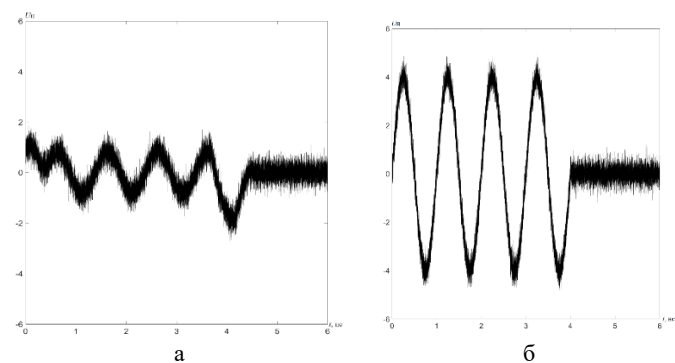


Рис. 8. Суммарный пилот-сигнал: а) без компенсации аэродрейфа, б) с компенсацией пространственных уходов

Используя разностную матрицу (7), выражение (3) и зная направление прихода опорного сигнала, определим нормальные составляющие взаимных смещений (аэродрейфов) элементов разнесенной системы приема в пространстве как

$$\Delta d_{\text{норм}} = \begin{bmatrix} 0 & -0,1028 & 0,1243 & 0,0815 \\ 0,1028 & 0 & 0,2272 & 0,1843 \\ -0,1243 & -0,2272 & 0 & -0,0428 \\ -0,0815 & -0,1843 & 0,0428 & 0 \end{bmatrix}$$

Тангенциальные составляющие смещений не учитываются ввиду рассмотрения случая приема опорных сигналов с одного направления. Так, смещение каждого из БПЛА в плоскости, ортогональной направлению на источник опорного сигнала не влияет на результат расчета матрицы задержек.

Зная заранее установленные псевдослучайные смещения, оценим абсолютную ошибку измеренных нормальных составляющих смещений как

$$\delta d_{\text{норм}} = \begin{bmatrix} 0 & -0,0063 & 0,0001 & -0,0076 \\ 0,0063 & 0 & 0,0062 & -0,0014 \\ -0,0001 & -0,0062 & 0 & -0,0076 \\ 0,0076 & 0,0014 & 0,0076 & 0 \end{bmatrix}$$

Так, абсолютная погрешность определения смещения для случая расположения элементов в конфигурации, показанной на рисунке 7, не превышает 1 см, при условии частоты передискретизации 10 ГГц и направления прихода сигнала $\alpha = 21^\circ 40'$. Важно отметить, что данные получены при моделировании для априорно известного направления на источник, что позволяет избежать ошибок определения направления прихода сигнала.

3. Оценка устойчивости алгоритма синхронизации SDR-решетки по критерию максимума амплитуды суммарного сигнала

Как было показано в предыдущем разделе (рис. 8) амплитуда суммарного опорного сигнала зависит от временного запаздывания сигналов, его компенсации и пространственного аэродрейфа, создающего дополнительные временные задержки. При этом разница в моменте прихода сигнала может для разнесенных систем превышать период сигнала. Устойчивость работоспособности алгоритма определяется исходя из физических ограничений на работу алгоритма синхронизации. Так, основным фактором, определяющим возможность работы алгоритма, является величина амплитуды суммарного опорного сигнала и ее зависимость от частоты и задержки между сигналами, а также ошибка определения местоположения, которая в свою очередь не позволяет в полной мере скомпенсировать пространственный аэродрейф элементов.

Для проведения исследования разработан программный алгоритм, генерирующий массив сигналов, задержанных во времени относительно первого сигнала, блок-схема которого показана на рисунке 9.

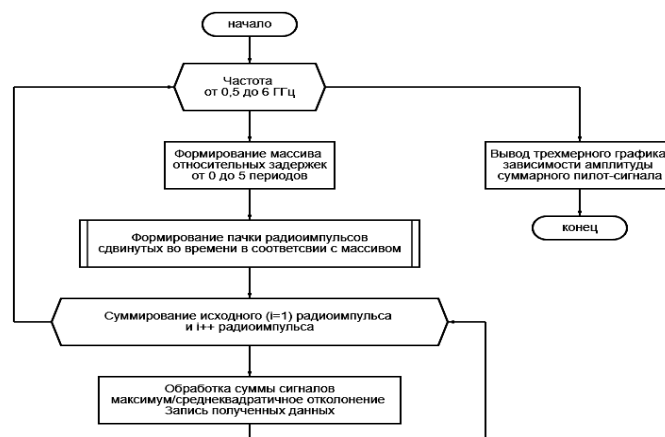


Рис. 9. Блок-схема алгоритма моделирования суммы сигналов с заданными сдвигами

При ОСШ = 10 дБ на рисунке 10 приводятся результаты моделирования суммы двух сигналов в диапазоне частот 0,5...6 ГГц в случае вариации временных сдвигов dT между пилот-сигналами относительно значений их периодов от 0 до 5.

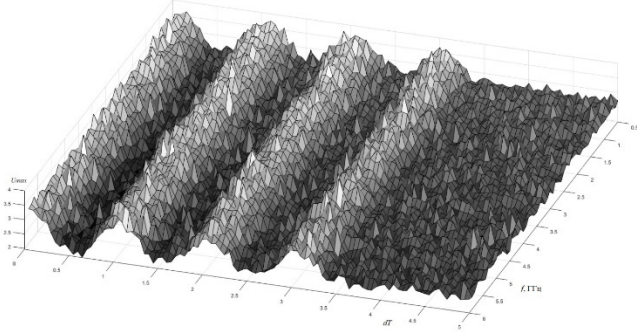


Рис. 10. Зависимость максимальной амплитуды U_{max} суммарного пилот-сигнала от частоты и временной задержки

Как видно из рисунка 10, предельная амплитуда сигнала содержит большое число случайных выбросов, связанных с наличием флуктуационных шумов и практически не зависит от изменения частоты пилот-сигнала. Для того, чтобы оценить синхронизацию сигналов во времени, использование максимальной амплитуды затруднительно из-за большого влияния шумов. Повышение различимости суммарного опорного сигнала относительно шума явно демонстрирует характеристика среднеквадратичного отклонения (СКО) сигнала от нулевого значения σU . Зависимость СКО у суммарного опорного сигнала и одиночного опорного сигнала, представлены на рисунке 11. Также на рисунке 11 отображены СКО для принимаемых шумов в моменты отсутствия сигнала.

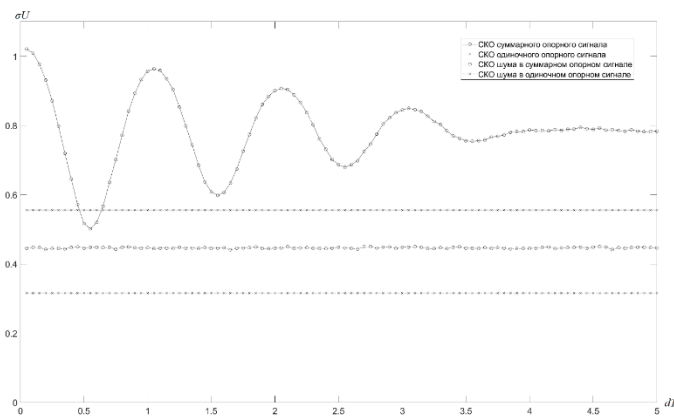


Рис. 11. Зависимости СКО сигналов от относительной задержки

Уровень СКО суммарного сигнала выше уровня шумов, также присутствуют четыре пика, соответствующие синфазным сложениям пилот-сигналов, и четыре минимума, соответствующие противофазным сложениям сигналов. График СКО позволяет более точно определять момент времени, в который пилот-сигналы с разных приемников полностью соотносятся. Причем при ухудшении ОСШ характер распределения СКО сохраняется. В то же время ошибки определения местоположения возникают, в первую очередь, из-за потери части информации, при дискретизации принятого сигнала во

времени. Так, основными параметрами, влияющими на величину ошибки определения местоположения, являются частота дискретизации, величина аэродрейфа и шумовая обстановка.

Для анализа влияния обозначенных факторов влияния разработана программная модель, осуществляющая последовательные измерения ошибки определения местоположения при изменении периода дискретизации T_d и максимального радиуса аэродрейфа приемных элементов δR , для заданного уровня ОСШ. В этом случае производится определение выборки из 100 результатов определения местоположения, для разных смещений элементов в заданном предельном радиусе (приводится в процентах относительно расстояния между элементами d) и случайной начальной фазы сигнала гетеродина.

На рисунке 12 приводятся результаты средней абсолютной ошибки по выборке результатов для ОСШ = 10 дБ, а на рисунке 13 для ОСШ = 6 дБ. δd

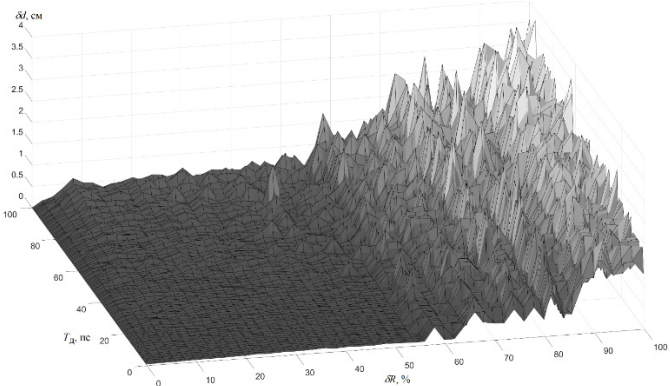


Рис. 12. Зависимость абсолютной величины ошибки δd определения местоположения для ОСШ = 10 дБ от предельной величины аэродрейфа (радиуса смещения δR)

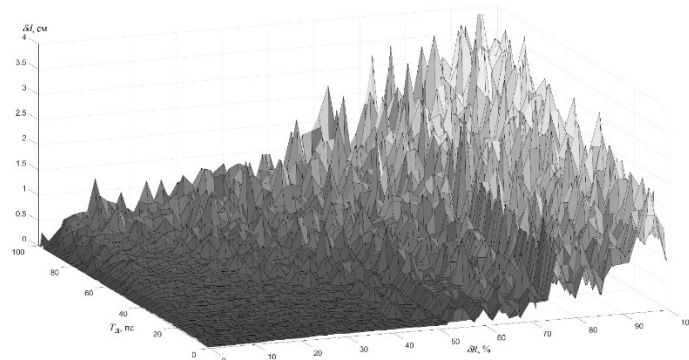


Рис. 13. Зависимость абсолютной величины ошибки δd определения местоположения для ОСШ = 6 дБ от предельной величины аэродрейфа (радиуса смещения δR)

На графиках показано, что при предельном смещении меньше половины расстояния d , абсолютная ошибка мала и не превышает 1 см, для ОСШ = 10 дБ и 2 см, для ОСШ = 6 дБ, соответственно.

При увеличении предельного радиуса смещения, требуется уменьшать период дискретизации для сохранения абсолютной ошибки определения местоположения.

Для предельного смещения 50% от расстояния d был получен график зависимости абсолютной величины ошибки от ОСШ и периода дискретизации, представленный на рисунке 14. Из графика на рисунке 14 видно, что повышение периода дискретизации больше 200 пс приводит к резкому увеличению абсолютной ошибки определения местоположения. Из этого можно сделать вывод, что в рамках описываемой системы необходимо использовать частоту дискретизации не менее чем в пять раз превышающую частоту несущей, а также повышать это значение, при ухудшении ОСШ или величины аэродрейфа.

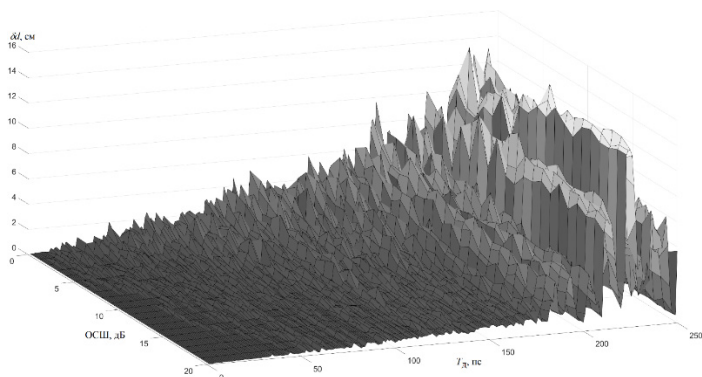


Рис. 14. Зависимость абсолютной величины ошибки δd определения местоположения элемента SDR-решетки от периода дискретизации при изменении ОСШ

Заключение

Для обеспечения устойчивой синхронизации системы разнесенного приема в условиях влияния аэродрейфа и флуктуационных помех разработан алгоритм синхронизации. Функционал алгоритм включает два блока: определения временных задержек между пришедшими опорными сигналами и определения пространственных смещений, возникающих вследствие аэродрейфа, для внесения поправок временных задержек. Так, по результатам исследования получены следующие выводы:

1. Создана программная модель эквидистантной приемной антенной решетки и опорный сигнал – радиопульс. Получены матрицы временных задержек для разных конфигураций антенной решетки и на их основе проведена синхронизация опорных сигналов. В результате синхронизации амплитуда суммарного сигнала в четыре раза превысила амплитуду одиночного опорного сигнала, что говорит о высокой степени синхронизации.

2. На основе полученной матрицы временных задержек рассчитан угол прихода сигнала. В результате исследования определена абсолютная ошибка определения угла прихода от угла прихода для частоты передискретизации 10 и 100 ГГц. Так, порядок ошибки определения угла не превышает 1° в секторе от -60° до 60° .

3. Получены зависимости максимальной амплитуды суммарного пилот-сигнала и среднеквадратичного отклонения от временной задержки. При этом показано, что изменение частоты напрямую не влияет на синхронизацию. Однако, при дальнейшем исследовании абсолютной величины ошибки определения местоположения было выявлено, что частота

дискретизации должна быть в пять раз больше максимальной частоты несущей.

4. Было проведено исследование зависимостей абсолютной величины ошибки определения местоположения элементов разнесенной системы от периода дискретизации, максимальной величины аэродрейфа и уровня флуктуационных шумов. Выявлено, что при аэродрейфе более чем на 50% от расстояния между элементами, возникает резкий рост ошибки определения местоположения. Такой же эффект возникает при значениях периода дискретизации принятого сигнала больше 160 пс.

Результаты исследования использованы для построения программно-аппаратной системы разнесенного приема и проведения натурного эксперимента приема с использованием эквидистантной SDR-решетки на БПЛА в условиях влияния аэродрейфа и флуктуационных помех.

Литература

1. Бузова М.А., Клюев Д.С. Антенная решетка диапазона 4/6 ГГц на основе полосковых излучателей // Актуальные проблемы информатики, радиотехники и связи: Материалы XXXII Российской научно-технической конференции. Самара: ПГУТИ, 2025. С. 220-222.
2. Сорокина К.А., Диязитдинов Р.Р. Оценка помехоустойчивости радиосигнала с модуляцией QPSK // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций. Оптические технологии в телекоммуникациях: Материалы XXIV Международной научно-технической конференции. Уфа: УУНИТ, 2023. С. 189-190.
3. Гильфанова А.Ф., Веденькин Д.А. Один из вариантов повышения помехозащищенности цифровых каналов связи с Quasi-QAM // Электроника, фотоника и киберфизические системы. 2022. Т. 2, № 4. С. 41-48.
4. Гапочкин А.В. Основные принципы построения систем, использующих технологию ортогонального частотного мультиплексирования OFDM // Материалы XXIV Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение». М.: РНТОРЭС имени А.С.Попова, 2022. С. 114-117.
5. Вовшин Б.М., Пушков А.А., Халтурина Е.М. Об эквивалентности характеристик и «зеркальности» построения традиционных и ММО радиолокационных станций при параллельном обзоре пространства на основе антенных решеток // Российский технологический журнал. 2025. Т. 13, № 3. С. 73-83.
6. Глушанков Е.И., Царик В.И. Прямые методы адаптивной пространственной фильтрации в кольцевых антенных решетках // Подготовка профессиональных кадров в магистратуре для цифровой экономики (ПКМ-2022) : Сборник лучших докладов Всероссийской научно-технической и научно-методической конференции магистрантов и их руководителей, Санкт-Петербург, 06-08 декабря 2022 года / Сост. Н.Н. Иванов. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2023. С. 149-153.
7. Гайдуков К.А., Коняшкин Г.В. Методы адаптивной режекции сигнальных аудиопомех // Сборник научных статей Международной межведомственной научно-технической конференции «Космические технологии – 2024». М.: РТУ МИРЭА, 2024. С. 222-229.
8. Буй К.В. Адаптивная пространственно-временная обработка сигналов на фоне комплекса помех // Материалы XI Международной заочной научно-технической конференции «Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации». Тольятти: Издательско-полиграфический центр ПВГУС, 2025. С. 462-469.
9. Костин М.С., Латышев К.В., Марков Д.В. Мобильный комплекс радиолокационного мониторинга на синхронизированной системе БПЛА // Материалы XVI Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Радиолокация и связь – перспективные технологии». М.: Мир науки, 2018. С. 32-37.

10. Денисенко В.Г., Литвинов А.В., Мищенко С.Е. и др. Способ подавления помех в адаптивных антенных решетках со стабилизацией ориентации главного луча // Радиолокация, навигация, связь : Сборник трудов XXX Международной научно-технической конференции. В 5-ти томах, Воронеж, 16-18 апреля 2024 года. Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2024. С. 288-297.

11. Демин О.А., Костин М.С. Кросс-пилотная синхронизация фазированной антенной SDR-решетки, сформированной БПЛА-группировкой // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2024. Т. 11, № 3. С. 64-75.

12. Павлов А.С. Исследование характеристик приема сигналов в радиотехнических системах передачи данных между быстро движущимися объектами // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2009. № 3(36). С. 49-56.

13. Сугак В.Г., Михайлюк Е.А., Дубовицкий А.Н., Станкевич В.Ю. Сравнительные характеристики основных типов зондирующих сиг-

налов в системах подповерхностной радиолокации // Сборник тезисов 2-й научно-практической конференции «Инженерная сейсморазведка и сейсмология». М.: Издательский Дом «Академия Естествознания», 2019. С. 72-77.

14. Иванов В.Э., Кудинов С.И., Гусев А.В., Плохих О.В. Когерентный импульсный СВЧ-передатчик аэрологической РЛС // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2018. Т. 1, № 2. С. 149-157.

15. Bawge Akshat, S China Venkateshwarlu, V Siva Nagaraju, P Munaswamy. Universal Waveform for SDR Based Communications // International Journal of Scientific Research in Engineering and Management. 2025. Vol. 09, No. 05, pp. 1-8.

16. S. Ashtekar, P. Kumar, B. K. P and R. K. M. Study of Generalized Cross Correlation Techniques for Direction Finding of Wideband Signals // 2021 5th International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC), Erode, India, 2021, pp. 707-714.

SYNCHRONIZATION OF THE EQUIDISTANT SDR ARRAY SIGNALS ON THE UAV UNDER THE INFLUENCE OF FLUCTUATION INTERFERENCE AND AERODRIFT

Oleg A. Demin, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia, demin_o@mirea.ru

Mikhail S. Kostin, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia, kostin_m@mirea.ru

Abstract

The aim of the article is to create an algorithm for synchronizing signals received by spaced elements of an equidistant SDR array on a UAV using an installed radio reference pulse. The paper describes the structure of an equidistant spaced reception system and develops a software model that takes into account the quasi-random position of the receiving elements in space within a given radius and the direction from which the reference signal comes. Based on the software model, an algorithm has been implemented that makes it possible to calculate the time delay matrix of the system. An assessment of the influence of noise and quasi-random spatial displacements of the elements of the SDR grid, which constitute scientific problems in the field of ensuring stable reception of a distributed system, is given. An algorithm for determining the direction of arrival of a signal and spatial displacements under the influence of quasi-random aerodrifts in a given radius has been developed. It is shown that the proposed synchronization algorithm makes it possible to determine the azimuthal angle of arrival of the reference signal with an accuracy of 1° in the angular sector from -60° to 60° and to determine spatial displacements (aerodrift of the SDR grid elements) in one of the planes with an absolute error of less than 1 cm with a signal-to-noise ratio of 0 dB and a resampling frequency of 10 GHz., relative to the initial position in a given plane. The results of studies of the maximum amplitude of the total signal with a change in frequency and the relative delay between the received signals are obtained. The absolute magnitude of the error in determining the location of the SDR grid elements is estimated when the sampling period of the system, the maximum aerodrift value, and the variable signal-to-noise ratio change. The results of the study confirm that the considered reference radio pulse signal provides stable synchronization with iterative error compensation, and the proposed algorithm for matrix calculation of time delays allows for the formation of a quasi-equidistant reception mode.

Keywords: equidistant SDR array on UAVs, synchronization, reference radio pulse, diversity reception, fluctuation interference, aerodrift, correlation processing

References

- [1] M. A. Buzova, D. S. Klyuev, "Antenna array of the 4/6 GHz band based on strip radiators," *Actual problems of computer science, radio engineering and communications: Proceedings of the XXXII Russian Scientific and Technical Conference*. Samara: PGUTI, 2025, pp. 220-222.
- [2] K. A. Sorokina, R. R. Diyazitdinov, "Evaluation of the noise immunity of a radio signal with QPSK modulation," *Problems of telecommunications engineering and technology. Optical technologies in telecommunications: Proceedings of the XXIV International Scientific and Technical Conference*. Ufa: UUNiT, 2023, pp. 189-190.
- [3] A. F. Gilfanova, D. A. Vedenkin, "One of the options for increasing the noise immunity of digital communication channels with Quasi-QAM," *Electronics, photonics and cyberphysical systems*. 2022. Vol. 2, No. 4, pp. 41-48.
- [4] A.V. Gapochkin, "Basic principles of building systems using orthogonal frequency multiplexing technology OFDM," *Proceedings of the XXIV International Conference "Digital Signal processing and its application"*. Moscow: RNTORES named after A.S.Popov, 2022, pp. 114-117.
- [5] B. M. Vovshin, A. A. Pushkov, E. M. Khalturina, "On the equivalence of characteristics and specularity in the construction of traditional and MIMO radars with a parallel view of space based on antenna arrays," *Russian Technological Journal*. 2025. Vol. 13, No. 3, pp. 73-83.
- [6] E. I. Glushankov, V. I. Tsarik, "Direct methods of adaptive spatial filtering in ring antenna arrays," *Training of professional staff in the master's degree for the digital economy (PCM-2022) : Collection of the best reports of the All-Russian Scientific, Technical and scientific-methodological Conference of undergraduates and their supervisors*, St. Petersburg, December 06-08, 2022 / Comp. N.N. Ivanov. St. Petersburg: St. Petersburg State University of Telecommunications named after prof. M.A. Bonch-Bruевич, 2023, pp. 149-153.
- [7] K.A. Gaidukov, G.V. Konyashkin, "Methods of adaptive rejection of signal audio interference," *Collection of scientific articles of the International Interdepartmental Scientific and Technical Conference "Space Technologies - 2024"*. Moscow: RTU MIREA, 2024, pp. 222-229.
- [8] K.V. Bui, "Adaptive spatial-temporary signal processing against the background of a complex of interference," *Proceedings of the XI International Correspondence Scientific and Technical Conference "Information Technologies. Radio electronics. Telecommunications"*. Tolyatti: Publishing and Printing Center of the Russian State University of Economics, 2025, pp. 462-469.
- [9] M.S. Kostin, K.V. Latyshev, D.V. Markov, "Mobile radar monitoring complex on a synchronized UAV system," *Proceedings of the XVI All-Russian Youth Scientific and Technical Conference "Radar and communications - promising technologies"*. Moscow: Mir Nauki Publ., 2018, pp. 32-37.
- [10] V. G. Denisenko, A.V. Litvinov, S. E. Mishchenko et al., "A method of noise suppression in adaptive antenna arrays with stabilization of the orientation of the main beam," *Radar, navigation, communications : Proceedings of the XXX International Scientific and Technical Conference*. In 5 volumes, Voronezh, April 16-18, 2024. Voronezh: VSU Publishing House, 2024, pp. 288-297.
- [11] O.A. Demin, M.S. Kostin, "Cross-pilot synchronization of a phased antenna SDR array formed by a UAV grouping," *Rocket and space instrumentation and information systems*. 2024. Vol. 11, No. 3, pp. 64-75.
- [12] A.C. Pavlov, "Investigation of signal reception characteristics in radio engineering data transmission systems between high-speed objects," *Scientific Bulletin of Novosibirsk State Technical University*. 2009. No. 3(36), pp. 49-56.
- [13] V.G. Sugak, E.A. Mikhailyuk, A.N. Dubovitsky, V.Yu. Stankevich, "Comparative characteristics of the main types of sounding signals in sub-surface radar systems," *Collection of abstracts of the 2nd scientific and practical conference "Engineering seismic exploration and seismology"*. Moscow: Academy of Natural Sciences Publishing House, 2019, pp. 72-77.
- [14] V.E. Ivanov, S.I. Kudinov, A.V. Gusev, O.V. Plokykh, "Coherent pulsed microwave transmitter of an aerological radar," *Infocommunication and radioelectronic technologies*. 2018. Vol. 1, No. 2, pp. 149-157.
- [15] Bawge Akshat, Dr. S China Venkateshwarlu, Dr. V Siva Nagaraju, Dr. P Munaswamy, "Universal Waveform for SDR Based Communications," *International Journal of Scientific Research in Engineering and Management*. 2025. Vol. 09, No. 05, pp. 1-8.
- [16] S. Ashtekar, P. Kumar, B. K. P and R. K. M, "Study of Generalized Cross Correlation Techniques for Direction Finding of Wideband Signals," *2021 5th International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)*, Erode, India, 2021, pp. 707-714.

Information about authors:

Oleg A. Demin, Postgraduate Student at the Department of Radio Wave Processes and Technologies, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia. <http://orcid.org/0000-0002-9864-5338>

Mikhail S. Kostin, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Radio Wave Processes and Technologies, Deputy Director of the Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia. Scopus Author ID 57208434671, RSCI SPIN code 5819-2178, <http://orcid.org/0000-0002-5232-5478>