

Раздел I. Перспективы применения робототехнических комплексов

УДК 621.396.969.1

DOI 10.18522/2311-3103-2022-1-6-17

И.И. Маркович, А.И. Паньчев, Е.Е. Завтур

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В ПАССИВНОЙ МНОГОПОЗИЦИОННОЙ РЛС, СОЗДАННОЙ НА БАЗЕ ГРУППИРОВКИ БЛА

Обоснована целесообразность создания пассивной многопозиционной РЛС на базе группировки беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Предложен вариант построения РЛС, оценены основные технические проблемы разработки такой РЛС и рассмотрены возможные пути их преодоления. Показано, что для обнаружения воздушных целей и определения их координат по радиоизлучению бортового оборудования наиболее перспективным является разностно-дальномерный метод, как не зависящий от модуляции сигналов и потенциально устойчивый к помехам. Для малоразмерных БЛА для передачи информации по открытым радиоканалам тиличными частотными диапазонами являются 2,4 и 5,0 ГГц. Разработана структурная схема пассивной многопозиционной РЛС, включающая цифровые формирователи квадратурных составляющих принятого сигнала, блоки обнаружения и определения координат цели. Рассчитаны основные параметры и приведены аналитические выражения алгоритмов цифровой обработки сигналов для обнаружения и определения координат цели. В цифровом формирователе квадратурных составляющих использован стробоскопический эффект, позволяющий для полосовых сигналов выбирать частоту дискретизации не по верхней граничной частоте спектра, а по его ширине, что позволяет существенно снизить требования к быстродействию АЦП и следующих за ним устройств ЦОС. Комплексные огибающие обнаруженных сигналов формируются цифровым методом во временной области с использованием цифровых фильтров нижней частоты. Обнаружение сигналов производится энергетическим обнаружителем, достоинствами которого являются простота реализации и работоспособность при отсутствии априорной информации о принимаемом сигнале. Для определения координат источника радиоизлучения вычисляются задержки сигналов между парами сигналов, принятых тремя БЛА из состава многопозиционной РЛС, которые определяются максимальными по модулю значениями взаимных корреляционных функций сигналов в этих парах. Показано, что предложенные алгоритмы хорошо адаптированы к обработке возможных источников радиоизлучения на борту малоразмерных БЛА. Установлено, что требуемая производительность вычислителя РЛС для работы в реальном масштабе времени не превышает 84,62 GFLOPS. Предложена конструкция бортового антенного модуля пассивной многопозиционной РЛС в виде микрополосковой реконфигурируемой антенны, перестраиваемой по частоте и поляризации.

Пассивная радиолокация; определение координат; источник радиоизлучения; разностно-дальномерный метод; цифровая обработка сигналов; беспилотный летательный аппарат.

I.I. Markovich, A.I. Panychev, E.E. Zavtur

DIGITAL SIGNAL PROCESSING IN A PASSIVE MULTI-POSITION RADAR, CREATED ON THE BASIS OF THE UAV GROUPING

The expediency of creating a passive multi-position radar based on a grouping of unmanned aerial vehicles is substantiated. The variant of building of such radar is proposed, the main technical problems of the sonar developing are evaluated and possible ways to overcome them are

considered. It is shown that for detecting aerial targets and determining their coordinates from the radio emission of on-board equipment, the difference-rangefinder method is the most promising as it does not depend on signal modulation and is potentially resistant to interference. For small-sized UAV for transmitting information over open radio channels, the typical frequency ranges are 2.4 and 5.0 GHz. A block diagram of a passive multi-position radar has been developed, including digital shapers of the quadrature components of the received signal, blocks for detecting and determining the coordinates of the target. The main parameters are calculated and analytical expressions of digital signal processing algorithms for detecting and determining the coordinates of the target are given. A stroboscopic effect is used in the digital quadrature component shaper, which allows for bandpass signals to select the sampling frequency not by the upper boundary frequency of the spectrum, but by its width, which significantly reduces the requirements for the performance of the ADC and the DSP devices following it. The complex envelopes of the detected signals are generated by the method of digital generation in the time domain using digital low-frequency filters. The detection of signals is performed by an energy detector, the advantages of which are simplicity of implementation and operability in the absence of a priori information about the received signal. To determine the coordinates of the radio source, signal delays are calculated between pairs of signals received by three UAV from a multi-position radar, which are determined by the maximum modulo values of the mutual correlation functions of the signals in these pairs. It is shown that the proposed algorithms are well adapted to the processing of possible sources of radio emission on board small-sized UAV. It is established that the required performance of the radar computer for real-time operation does not exceed 84.62 GFLOPS. The design of an on-board antenna module of a passive multi-position radar in the form of a microstrip re-configurable antenna, tunable in frequency and polarization, is proposed.

Passive radar; determination of coordinates; source of radio emission; difference-rangefinder method; digital signal processing; unmanned aerial vehicle.

Введение. Системы пассивной радиолокации выполняют обнаружение, определение координат и идентификацию объектов на основе приёма их собственного излучения или отражённых от них сторонних радиоволн без использования зондирующего сигнала. Это повышает скрытность работы пассивных локационных станций, существенно затрудняет их обнаружение и создание им помех. К достоинствам средств пассивной радиолокации относятся: возможность обнаруживать малозаметные цели; малые энергопотребление и габариты; относительная простота аппаратуры по сравнению с активными РЛС [1, 2].

В пассивной радиолокации широкое распространение получили методы локации, основанные на явлениях прямолинейного распространения электромагнитных волн в пространстве и постоянства их скорости.

Триангуляционный метод (ТМ) использует антенную базу из двух разнесенных антенн. Он позволяет вычислить дальность и координаты источника радиоизлучения (ИРИ) по задержке принятого сигнала в одной антенне относительно другой и по пеленгу на ИРИ, полученному любой антенной. Точность ТМ существенно зависит от точности определения направления на ИРИ и требует применения направленных антенн. Этот метод способен обеспечить высокую точность и разрешение только при наличии высокочувствительного приёмника и антенны с узкой диаграммой направленности, сканирующей в заданном секторе пространства [3].

Разностно-дальномерный метод (РДМ) основан на разнесенном приёме сигналов ИРИ всенаправленными антеннами, расположенными в нескольких точках, и измерении разностей времен прихода сигналов относительно некоторой опорной точки или относительно друг друга, что позволяет определить дальность до цели и ее координаты. РДМ позволяет работать как по импульсным, так и по непрерывным сигналам, в том числе по шумовым и шумоподобным. В этом случае для измерения задержек используются взаимные корреляционные функции (ВКФ) излучения. РДМ эффективен в случаях, когда для вычисления разности хода радиоволн применяется базово-корреляционная обработка, при которой вид принимаемых сигналов не имеет значения [4, 5].

Радиально-базовый метод (РБМ) относится к амплитудным и основан на измерении напряжённости поля радиоизлучения либо мощности сигнала приёмными устройствами. Используется как минимум две антенные системы, расположенные на известном базовом расстоянии друг от друга и направленные на ИРИ. Данный метод предпочтительно использовать для работы в дальней зоне. Точность РБМ зависит от характеристик измерителей амплитуды и мощности радиоволны, что предъявляет существенные требования к идентичности параметров антенн и приёмных трактов всех каналов РЛС [6–8].

Целесообразность создания пассивной многопозиционной РЛС на базе группировки беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Проблема разработки многофункциональных малогабаритных бортовых РЛС для БЛА достаточно активно обсуждается в научной и технической литературе [9–16]. Однако в открытой печати отсутствуют сведения об успешных попытках создания многопозиционных РЛС на базе БЛА. Вместе с этим можно отметить следующие предпосылки для успешного решения такой задачи.

1. Естественная многопозиционность РЛС, базирующейся на группировке БЛА.
2. Применение ненаправленной (или слабонаправленной) антенной системы в РЛС БЛА. При этом простая конструкция микрополосковой антенны способна обеспечить антенные характеристики, требуемые для пассивной бортовой РЛС.
3. Применение потенциально устойчивого к помехам РДМ, который является базово-корреляционным методом обнаружения и не зависит от модуляции принимаемых сигналов, позволяет обнаруживать воздушные цели по применяемым в их бортовой радиоэлектронной аппаратуре непрерывным и квазинепрерывным сигналам.
4. Не требуется синхронизации при излучении необходимой в активной локации.
5. Алгоритмы цифровой обработки сигналов (ЦОС) на каждом БЛА не требуют высокой производительности. Достаточно накапливать отсчеты в реальном масштабе времени и передавать их с задержкой для обработки на командный пункт (КП).
6. Возможность (по команде с КП) перестройки БЛА на любое необходимое направление.
7. Повышение дальности обнаружения и определения координат ИРИ при патрулировании воздушного пространства, благодаря высокому расположению антенной системы на бортах группировки БЛА.
8. Возможность достижения высокой точности оценки координат ИРИ (по сравнению с угломерным методом) даже при неколлинеарном, но известном, расположении антенн.

Однако в процессе создания многопозиционной пассивной РЛС на базе группировки БЛА необходимо учесть следующие технические проблемы, стоящие перед разработчиками.

1. Многочастотность излучения ИРИ обуславливает использование широкополосной антенной системы или перестройку по частоте приемника РЛС.
2. Необходимость высокоточного позиционирования БЛА. Данная проблема может быть решена применением самоорганизующихся групп БЛА.
3. Требование строгой временной синхронизации принятых отсчетов приемниками РЛС каждого БЛА. Способом решения этой задачи является использование сигналов точного времени спутниковой навигационной системы.
4. Работа РЛС в условиях наличия большого числа мешающих сигналов в контролируемой полосе, например, промышленных ИРИ. Для преодоления данной проблемы требуется совершенствование РДМ локации.

Источники радиоизлучения на борту малоразмерных БЛА. Расположенными на борту малоразмерных БЛА источниками радиоизлучения, по сигналам которых возможно их обнаружения средствами пассивных РЛС, являются не менее двух систем связи, использующих открытые радиоканалы для передачи информации [9–11].

Во-первых, это система низкоскоростной дуплексной или полудуплексной связи для передачи командно-телеметрических помехозащищенных сигналов навигации и управления полетом между БЛА и наземным командным пунктом. Типичные параметры таких систем следующие: мощность излучаемого сигнала в канале не более 100 мВт; типичные частотные диапазоны 2,4 и 5,0 ГГц; использование псевдослучайной перестройки радиочастоты (ПСПРЧ) со скоростью от 350 до 2900 циклов в секунду; виды модуляции – частотная модуляция, фазовая модуляция, мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM); длительность импульса 0,5...2,5 мкс; полоса пропускания одиночного сигнала 0,3...2 МГц; полоса пропускания сигналов сетки ПСПРЧ до 80 МГц; количество каналов сетки ПСПРЧ до 40.

Во-вторых, это система односторонней высокоскоростной передачи данных полезной нагрузки с борта БЛА на КП, работающая, как правило, в диапазоне частот 2,4 ГГц.

Структурная схема алгоритмов ЦОС пассивной многопозиционной РЛС. Для решения радиолокационной задачи разностно-дальномерным методом необходимо совместное использование трех бортовых РЛС, разнесённых на заданное расстояние. Бортовые РЛС транслируют принятые сигналы ИРИ после предварительной обработки (формирования квадратурных составляющих) по служебным каналам, а их заключительная обработка производится наземной частью оборудования многопозиционной РЛС.

На рис. 1 приведена предлагаемая структурная схема алгоритмов ЦОС многопозиционной пассивной РДМ РЛС, включающая следующие блоки:

- ♦ три цифровых формирователя квадратурных составляющих (ЦФКС), содержащие аналого-цифровой преобразователь (АЦП), умножитель на комплексную экспоненту (Y), запоминающее устройство (ЗУ), два цифровых фильтра нижних частот (ЦФНЧ) и два дециматора отсчетов сигнала (Д) [17];

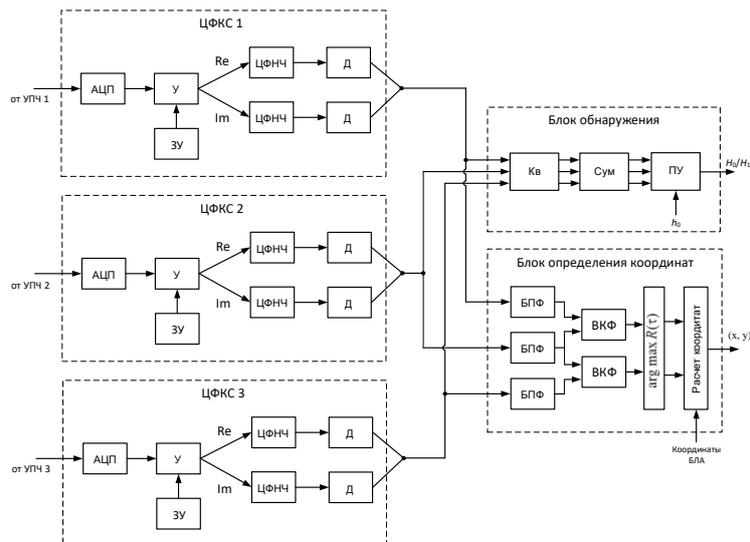


Рис. 1. Структурная схема алгоритмов ЦОС пассивной многопозиционной РЛС

♦ блок обнаружения, состоящий из квадратора (Кв), сумматора (Сум) и порогового устройства (ПУ);

♦ блок определения координат, содержащий блоки быстрого преобразования Фурье (БПФ), вычисления взаимокорреляционной функции (ВКФ), нахождения аргумента максимального значения ВКФ ($\arg \max R(\tau)$) и расчета координат по формулам РДМ.

Известно несколько методов ЦФКС, в которых при дискретизации сигналов используется стробоскопический эффект. Все они основаны на том, что для полосовых сигналов частоту дискретизации F_d можно выбирать не по верхней граничной частоте спектра f_b , а по ширине полосы исследуемых частот $\Delta f = f_b - f_n$ (f_n – нижняя граничная частота спектра сигнала). Это позволяет существенно снизить требования к быстродействию АЦП и следующих за ним устройств ЦОС. Эффективность использования стробоскопического эффекта при дискретизации полосовых сигналов показана в работах [17, 18].

При ЦФКС наибольшее распространение получил симметричный разнос граничных частот, при котором в результате дискретизации центральная частота спектра сигнала попадает точно на $F_d/4$ или на $3F_d/4$. Обычно ЦФКС узкополосных сигналов осуществляется после их фильтрации в усилителе промежуточной частоты (УПЧ). Для получения комплексных огибающих (КО) принятых сигналов применим метод ЦФКС во временной области с использованием ЦФНЧ [18].

В качестве принятого от БЛА сигнала будем рассматривать сигнал канала управления и передачи данных, использующий технологию Wi-Fi. В диапазоне 2,4 ГГц стандартами IEEE 802.11 определено 14 каналов. Каждый канал занимает полосу частот 20 МГц.

Частота дискретизации КО на выходе ЦФКС должна удовлетворять теореме Котельникова для комплексных сигналов:

$$F_{d1} \geq \Delta f_c = 20 \text{ МГц.}$$

ЦФКС состоит из АЦП, умножителя на комплексную экспоненту $\exp(j\pi n/2)$, обеспечивающего сдвиг спектра сигналов вправо относительно нулевой частоты, и двух ЦФНЧ (в реальном и мнимом каналах) с децимацией выходных отсчетов в $k_d = 4$ раза.

Преобразование спектров сигналов при формировании квадратурных составляющих представлено на рис. 2.

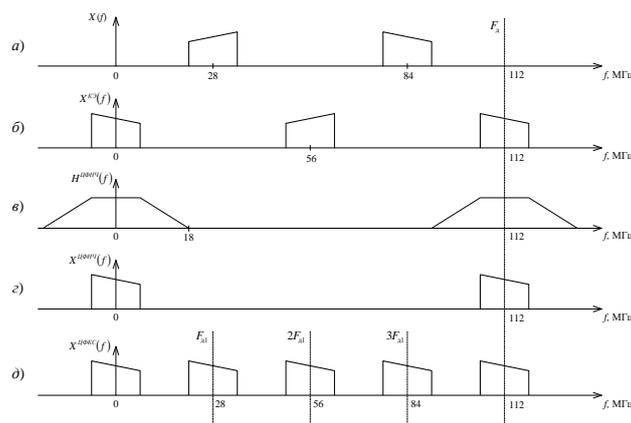


Рис. 2. Спектры сигналов при формировании квадратурных составляющих: а – спектр исходного сигнала; б – спектр умноженного сигнала; в – АЧХ ЦФНЧ; г – спектр КО сигнала; д – спектр КО сигнала после децимации

Алгоритм ЦФКС работает следующим образом. На вход АЦП каждого из трех приемников поступает непрерывный сигнал $x_m(t)$ с выхода соответствующего УПЧ, где $m = 1, 2, 3$ – порядковый номер приемника. Несущая частота непрерывного сигнала $f_0 = f_{ПЧ} = 84$ МГц, полоса сигнала $\Delta f = 20$ МГц. АЦП осуществляет дискретизацию сигнала $x_m(t)$ с частотой $F_d = 112$ МГц, квантование и представление отсчетов в двоичном коде. Спектр оцифрованного сигнала схематично показан на рис. 2,а).

Далее выполняется умножение сигнала $x_m(nT)$ на комплексную экспоненту:

$$x_m^e(nT) = x_m(nT)e^{j\frac{\pi}{2}n}, n = 0, 1, \dots, N-1,$$

где N – количество отсчетов принятого за период накопления сигнала.

Данная операция выполняет сдвиг спектра сигнала на 28 МГц вправо относительно начала частот. В результате прямой спектр находится на нулевой частоте, зеркальный – на частоте 56 МГц (рис. 2,б).

На следующем этапе формирования КО требуется выделить спектр сигнала $x_m^e(nT)$ в области нулевой частоты и подавить высокочастотные составляющие спектра на частоте 56 МГц, что обеспечивается с помощью ЦФНЧ в каждом из квадратурных каналов. В результате формируется КО сигнала $x_m^{ко}(nT)$ со спектром на нулевой частоте, как показано на рис. 2,г). Поскольку ширина спектра полученной КО сигнала значительно меньше частоты дискретизации, то выполняется децимация сигнала в 4 раза. Спектр прореженного сигнала показан на рис. 2,д).

Зададим требования к ЦФНЧ, положив допустимую неравномерность АЧХ в полосе пропускания $\delta_{П} = 0,2$ дБ и минимальное подавление в полосе задерживания $\delta_3 = 60$ дБ:

- 1) частота гарантированного пропускания $f_{П}$ по уровню $\delta_{П}$ должна быть не менее $\Delta f/2 = 10$ МГц (для предотвращения подавления полезного сигнала);
- 2) частота гарантированного задерживания $f_{З}$ по уровню δ_3 должна быть не более $F_d - \Delta f/2 = 18$ МГц (для предотвращения наложения спектров сигнала);
- 3) переходная полоса максимально широкая $f_{ТЗ} = 18$ МГц (для обеспечения минимального порядка ЦФНЧ).

Коэффициенты фильтра были определены по минимаксному критерию с использованием метода замены Ремеза. В результате был синтезирован фильтр с импульсной характеристикой (ИХ) длиной $N_{\phi} = 39$, АЧХ которого приведена на рис. 3.

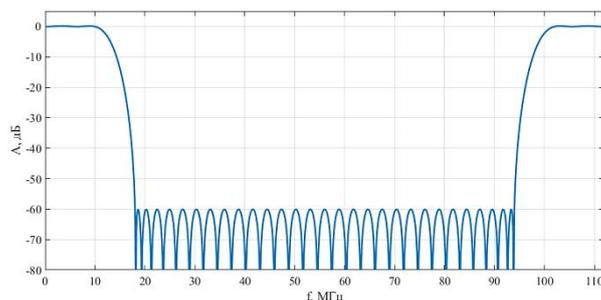


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика ЦФНЧ

После каждого ЦФНЧ производится децимация сигналов – снижение частоты дискретизации в 4 раза до $F_{д1} = 28$ МГц:

$$x_m^{ко}(nT_1) = x_m^{ко}(nk_d T), n = 0, 1, \dots, N_1 - 1,$$

где N_1 – количество отсчетов КО сигнала за период накопления.

В результате на выходе ЦФКС получаются отсчеты квадратурных составляющих КО сигнала $x_m^{\text{ко}}(nT_1)$ с уменьшенной частотой дискретизации, близкой к ширине спектра сигнала.

Решение задачи обнаружения сигналов ИРИ осуществляется следующим образом. Сигнал на входе пассивной РЛС представляет собой широкополосный случайный процесс. Методы обнаружения таких сигналов и их схемная реализация во многом зависят от степени априорной неопределенности. Например, если неизвестны все параметры сигнала, то приемник должен производить поиск и обнаружение сигнала в широком диапазоне частот. В этом случае приемник представляет собой энергетический обнаружитель.

Классический энергетический обнаружитель является некогерентным устройством обнаружения, которое измеряет энергию принятого сигнала за определенное время наблюдения, сравнивает уровень этой энергии с заданной пороговой величиной и принимает решение о наличии или отсутствии неизвестного сигнала. Достоинствами энергетического обнаружителя являются простота реализации и работоспособность при отсутствии априорной информации об обнаруживаемом сигнале.

Для полученных на выходе ЦФКС КО сигналов с трех приемников $x_m^{\text{ко}}(nT_1)$ в квадраторе выполняется вычисление модуля и возведение отсчетов во вторую степень:

$$y_m(nT_1) = |x_m^{\text{ко}}(nT_1)|^2.$$

Затем производится суммирование полученных отсчетов:

$$U_m = \sum_{n=0}^{N_1-1} y_m(nT_1).$$

Далее значение U_m , пропорциональное энергии сигнала, поступает на пороговую обработку, где сравнивается с заданным порогом h_0 . В результате сравнения принимается решение об обнаружении по следующему правилу:

- ◆ принимается гипотеза H_1 о наличии сигнала, если $U_m \geq h_0$;
- ◆ принимается гипотеза H_0 об отсутствии сигнала, если $U_m < h_0$.

Определение координат ИРИ реализуется следующим образом. С трех блоков ЦФКС КО сигналов поступают в блок БПФ, где выполняются процедуры БПФ согласно выражениям:

$$X_m(k) = \sum_{n=0}^{N_{\text{БПФ}}-1} x_m(nT_1) e^{-j \frac{2\pi}{N_{\text{БПФ}}} nk},$$

где $m = 1, 2, 3$; $k = 0, 1, \dots, N_{\text{БПФ}} - 1$; $N_{\text{БПФ}} = 32K$ – размер БПФ.

Далее вычисленные спектры передаются в блок ВКФ, где вычисляются взаимные спектральные плотности сигналов:

$$W_{21}(k) = \frac{1}{N_{\text{БПФ}} T_1} X_2(k) X_1^*(k); \quad W_{32}(k) = \frac{1}{N_{\text{БПФ}} T_1} X_3(k) X_2^*(k).$$

По теореме Винера-Хинчина определяются ВКФ сигналов каждой пары приемников через процедуру ОБПФ взаимных спектральных плотностей сигналов:

$$R_{21}(r) = \frac{1}{N_{\text{БПФ}}} \sum_{k=0}^{N_{\text{БПФ}}-1} W_{21}(k) e^{j2\pi k r / N_{\text{БПФ}}}; \quad R_{32}(r) = \frac{1}{N_{\text{БПФ}}} \sum_{k=0}^{N_{\text{БПФ}}-1} W_{32}(k) e^{j2\pi k r / N_{\text{БПФ}}},$$

где $r = 0, \dots, N_{\text{БПФ}} - 1$.

Для расчета временных задержек определяются максимальные значения модулей ВКФ:

$$R_{21 \max}(r_{21 \max}) = \max_{0 \leq r \leq N_{\text{бит}} - 1} |R_{21}(r)|; \quad R_{32 \max}(r_{32 \max}) = \max_{0 \leq r \leq N_{\text{бит}} - 1} |R_{32}(r)|.$$

По аргументам ВКФ $r_{21 \max}$ и $r_{32 \max}$, в которых достигаются максимальные значения модулей ВКФ, определяются взаимные временные задержки сигналов τ_{21} и τ_{32} по формулам, приведенным в [6].

По найденным задержкам сигналов τ_{21} и τ_{32} рассчитывается дальность до ИРИ относительно начала координат и координаты цели по формулам, приведенным в [5] для коллинеарного расположения трех антенн и по формулам, приведенным в [4] с учетом неточностей установки приемных антенн (для неколлинеарного расположение антенн).

На этом заканчивается решение задачи обнаружения и измерения координат воздушного объекта.

Проведен также расчет требуемой производительности вычислителя для реализации алгоритмов пассивной РЛС в реальном масштабе времени с использованием времени накопления сигналов 1 мс. Суммарная производительность вычислителя составила 84,62 GFLOPS. Следует отметить, что на практике отсутствует необходимость непрерывного проведения указанных вычислений для получения результатов через 1 мс (достаточно несколько раз или десятков раз в секунду). Следовательно, требования к производительности вычислителя РЛС могут быть снижены на два-три порядка.

Бортовой антенный модуль БЛА в составе многопозиционной пассивной РЛС. Антенны малогабаритных бортовых РЛС для малоразмерных БЛА в основном изготавливаются в виде микрополосковых излучателей и решеток из них. В тех случаях, когда позволяют параметры полезной нагрузки БЛА, могут применяться рупорные конструкции. Используется линейная и круговая поляризация [9, 10].

Антенны пассивных бортовых РЛС для патрулирования воздушного пространства в открытой печати не описаны. На основе анализа требований к функциональным возможностям пассивной многопозиционной РЛС на базе группировки БЛА можно сформировать основные параметры антенной системы.

1. Необходимо иметь не менее двух независимых антенн – для обнаружения сигналов ИРИ и для передачи командно-телеметрических и информационных данных.
2. Антенны должны иметь слабую направленность, достаточную широкополосность в пределах частотных диапазонов 2,4 и 5 ГГц, работать на круговой поляризации с различными коэффициентами эллиптичности и линейной поляризации с произвольным наклоном плоскости поляризации, иметь минимальные размеры и массу.
3. Оптимальной конструкцией антенны является микрополосковая patch-антенна.

В [19, 20] исследована микрополосковая реконфигурируемая антенна, перестраиваемая по частоте и поляризации. Антенна имеет компактные размеры и может быть использована в беспроводных системах связи, работающих в диапазоне 2...7 ГГц. Излучающая часть антенны представляет собой ромб, к которому с двух сторон может поступать сигнал из общего порта. Заземляющая сторона имеет крестообразную форму с плечами разной длины. В конструкции антенны имеется пять рpн-диодов, в зависимости от состояния которых изменяется резонансная частота и поляризация антенны. Замкнутые и разомкнутые состояния расположенных на излучающей стороне рpн-диодов изменяют поляризацию антенны вследствие нарушения симметрии её конструкции. Резонансная частота антенны зависит от состояния рpн-диодов на заземляющей стороне.

На рис. 4 представлены результаты моделирования частотных зависимостей коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) антенны, выполненного в системе 3D электромагнитного моделирования FEKO. При различных комбинациях коммутирующих рpн-диодов (замкнутое состояние диода или разомкнутое) антенна обладает набором резонансных частот, которым соответствуют минимальные значения КСВН.

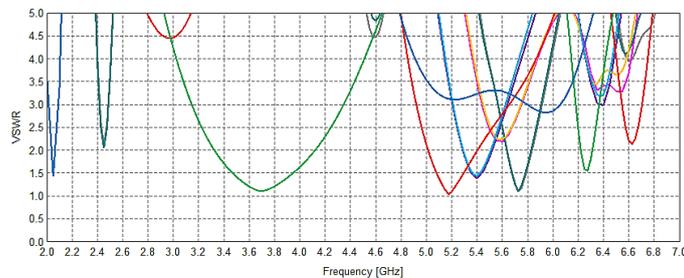


Рис. 4. Зависимость коэффициента стоячей волны по напряжению реконфигурируемой антенны от частоты

Для нижней части используемого диапазона частот (2,05; 2,45 и 3,7 ГГц) поляризация практически линейна, в более высоком поддиапазоне (5,4, 5,6 и 5,75 ГГц) антенна имеет близкую к круговой поляризацию, направление вращения которой изменяется в зависимости от состояния диодов. Возможность переключения поляризации на ортогональную на одной и той же частоте позволяет улучшить условия приема сигнала в условиях многолучевого распространения и тем самым повысить вероятность обнаружения ИРИ пассивной РЛС на базе группировки БЛА.

Заключение. Разработана структурная схема пассивной многопозиционной РЛС и приведены аналитические выражения алгоритмов обнаружения и определения координат цели. Рассчитаны основные параметры приемного тракта РЛС для наиболее вероятных источников радиоизлучения на борту БЛА. Оценена требуемая производительность вычислителя для реализации разработанных алгоритмов ЦОС в реальном масштабе времени, которая не превышает 84,62 GFLOPS. Предложена конструкция антенного модуля пассивной многопозиционной РЛС, который представляет собой микрополосковую реконфигурируемую в диапазоне 2...7 ГГц по частоте и поляризации антенну.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.
2. Караваев В.В., Сазонов В.В. Статистическая теория пассивной локации. – М.: Радио и связь, 1987. – 240 с.
3. Ильин Е.М., Климов А.Э., Пащин Н.С., Полубехин А.И., Черевко А.Г., Шумский В.Н. Пассивные локационные системы. Перспективы и решения // Вестник СибГУТИ. – 2015. – № 2. – С. 7-20.
4. Маркович И.И., Завтур Е.Е. Алгоритм определения координат целей разностно-дальномерным методом с учетом неточностей установки приемных гидроакустических антенн // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 8. – С. 162-171.
5. Марьев А.А., Маркович И.И., Завтур Е.Е. Исследование погрешностей разностно-дальномерного метода пассивной локации // Излучение и рассеяние электромагнитных волн: Тр. Международной научной конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн» ИРЭМВ-2015. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2015. – С. 391-395.
6. Сытенький В.Д. Пассивная локация на основе амплитудных измерений // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2011. – Вып. 1. – С. 69-76.
7. Сытенький В.Д., Бакаев А.В. Определение координат объекта по известным параметрам источников излучения // Вестник воздушно-космической обороны. – 2018. – № 3 (19). – С. 94-101.

8. Сытенский В.Д., Маркович И.И., Завтур Е.Е. Определение координат источников излучения в пассивных РЛС амплитудным методом // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 1 (218). – С. 72-81.
9. Ильин Е.М., Савостьянов В.Ю., Самарин О.Ф., Черевко А.Г. Состояние и перспективы создания многодиапазонных малогабаритных радиолокационных систем // Вестник СибГУТИ. – 2015. – № 2. – С. 156-163.
10. Ильин Е.М., Кривов Ю.Н., Полубехин А.И., Кренив А.Н., Черевко А.Г. Многофункциональный бортовой РЛК с конформной антенной системой для беспилотных летательных аппаратов малой дальности // Вестник СибГУТИ. – 2018. – № 3. – С. 79-88.
11. Chandra R.S., Breheny S.H., D'Andrea R. Antenna array synthesis with clusters of unmanned aerial vehicles // Automatica. – 2008. – No. 44. – P. 1976-1984.
12. Канащенков А.А. Техничко-экономический анализ разработки многофункциональной радиолокационной станции для беспилотного летательного аппарата // Успехи современной науки и образования. – 2016. – Т. 2, № 8. – С. 132-135.
13. Tierney B.V., Rodenbeck C.T. 3D-Sensing MIMO Radar for UAV Formation Flight and Obstacle Avoidance // 2019 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS). – IEEE, 2019. – P. 1-3.
14. Гуськов Юрий, Савостьянов Владимир, Самарин Олег. Многофункциональные малогабаритные бортовые РЛС. Критические технологии создания // Радиоэлектронные технологии. – 2018. – № 1. – С. 40-46.
15. Савостьянов В.Ю., Карпов О.А., Ефимов А.В. Многофункциональная малогабаритная РЛС Ku-диапазона для лёгкого БЛА // Всероссийские открытые Армадовские чтения. – 2019. – С. 389-394.
16. Kim J. et al. Design and Implementation of Compact 77 GHz Synthetic Aperture Radar for Drone Based Applications // 2019 6th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR). – IEEE, 2019. – P. 1-5.
17. Маркович И.И. Реализация алгоритмов цифрового формирования квадратурных составляющих в локационных комплексах различного назначения // Вестник компьютерных технологий. – 2006. – № 6. – С. 16-21.
18. Маркович И.И. Цифровая обработка сигналов в системах и устройствах: монография. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2012. – 236 с.
19. Ваганова А.А., Кисель Н.Н., Панычев А.И. Направленные и поляризационные свойства микрополосковой реконфигурируемой антенны, перестраиваемой по частоте и поляризации // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 2 (219). – С. 74-83.
20. Vaganova A.A., Kisel N.N., Panychev A.I. Microstrip reconfigurable antenna with tunable frequency and polarization // Conference Proceedings – 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEMW 2021. – 2021. – P. 127-130.

REFERENCES

1. Chernyak V.S. Mnogopozitsionnaya radiolokatsiya [Multi-position radar]. Moscow: Radio i svyaz', 1993, 416 p.
2. Karavaev V.V., Sazonov V.V. Statisticheskaya teoriya passivnoy lokatsii [Statistical theory of passive location]. Moscow: Radio i svyaz', 1987, 240 p.
3. Il'in E.M., Klimov A.E., Pashchin N.S., Polubekhin A.I., Cherevko A.G., Shumskiy V.N. Passivnye lokatsionnye sistemy. Perspektivy i resheniya [Passive location systems. Prospects and solutions], *Vestnik SibGUTI* [Bulletin of SibGUTI], 2015, No. 2, pp. 7-20.
4. Markovich I.I., Zavtur E.E. Algoritm opredeleniya koordinat tseley raznostno-dal'nomernym metodom s uchetom netochnostey ustanovki priemnykh gidroakusticheskikh antenn [Algorithm for determining the coordinates of targets by the difference-range-measuring method, taking into account the inaccuracies of the installation of receiving hydroacoustic antennas], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 8, pp. 162-171.
5. Mar'ev A.A., Markovich I.I., Zavtur E.E. Issledovanie pogreshnostey raznostno-dal'nomernogo metoda passivnoy lokatsii [Research of errors of the difference-range-measuring method of passive location], *Izluchenie i rasseyaniye elektromagnitnykh voln: Tr. Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Izluchenie i rasseyaniye elektromagnitnykh voln» IREMV-2015* [Radiation and scattering of electromagnetic waves: Proceedings of the International Scientific Conference "Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves" IREMV-2015]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2015, pp. 391-395.

6. Syten'kiy V.D. Passivnaya lokatsiya na osnove amplitudnykh izmereniy [Passive location based on amplitude measurements], *Izvestiya vuzov Rossii. Radioelektronika* [Izvestiya of Russian universities. Radio electronics], 2011, Issue 1, pp. 69-76.
7. Syten'kiy V.D., Bakaev A.V. Opredelenie koordinat ob"ekta po izvestnym parametram istochnikov izlucheniya [Determination of object coordinates by known parameters of radiation sources], *Vestnik vozdušno-kosmicheskoy oborony* [Bulletin of Aerospace Defense], 2018, No. 3 (19), pp. 94-101.
8. Syten'kiy V.D., Markovich I.I., Zavtur E.E. Opredelenie koordinat istochnikov izlucheniya v passivnykh RLS amplitudnym metodom [Determination of the coordinates of radiation sources in passive radars by the amplitude method], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 1 (218), pp. 72-81.
9. Il'in E.M., Savost'yanov V.Yu., Samarin O.F., Cherevko A.G. Sostoyanie i perspektivy sozdaniya mnogodiapazonnykh malogabaritnykh radiolokatsionnykh sistem [The state and prospects of creating multi-band small-sized radar systems], *Vestnik SibGUTI* [Bulletin of SibGUTI], 2015, No. 2, pp. 156-163.
10. Il'in E.M., Krivov Yu.N., Polubekhin A.I., Krenev A.N., Cherevko A.G. Mnogofunktsional'nyy bortovoy RLK s konformnoy antennoy sistemoy dlya bespilotnykh letatel'nykh apparatov maloy dal'nosti [Multifunctional airborne radar with conformal antenna system for short-range unmanned aerial vehicles], *Vestnik SibGUTI* [Bulletin of SibGUTI], 2018, No. 3, pp. 79-88.
11. Chandra R.S., Breheny S.H., D'Andrea R. Antenna array synthesis with clusters of unmanned aerial vehicles, *Automatica*, 2008, No. 44, pp. 1976-1984.
12. Kanashchenkov A.A. Tekhniko-ekonomicheskii analiz razrabotki mnogofunktsional'noy radiolokatsionnoy stantsii dlya bespilotnogo letatel'nogo apparata [Technical and economic analysis of the development of a multifunctional radar station for an unmanned aerial vehicle], *Uspekhi sovremennoy nauki i obrazovaniya* [Successes of modern science and education], 2016, Vol. 2, No. 8, pp. 132-135.
13. Tierney B.B., Rodenbeck C.T. 3D-Sensing MIMO Radar for UAV Formation Flight and Obstacle Avoidance, *2019 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS)*, IEEE, 2019, pp. 1-3.
14. Gus'kov Yuriy, Savost'yanov Vladimir, Samarin Oleg. Mnogofunktsional'nye malogabaritnye bortovye RLS. Kriticheskie tekhnologii sozdaniya [Multifunctional small-sized airborne radars. Critical creation technologies], *Radioelektronnye tekhnologii* [Radioelectronic technologies], 2018, No. 1, pp. 40-46.
15. Savost'yanov V.Yu., Karpov O.A., Efimov A.V. Mnogofunktsional'naya malogabaritnaya RLS Kudiapazona dlya legkogo BLA [Multifunctional small-sized Ku-band radar for light UAV], *Vserossiyskie otkrytye Armandovskie chteniya* [All-Russian Open Armand readings], 2019, pp. 389-394.
16. Kim J. et al. Design and Implementation of Compact 77 GHz Synthetic Aperture Radar for Drone Based Applications, *2019 6th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR)*. IEEE, 2019, pp. 1-5.
17. Markovich I.I. Realizatsiya algoritmov tsifrovogo formirovaniya kvadraturnykh sostavlyayushchikh v lokatsionnykh kompleksakh razlichnogo naznacheniya [Implementation of algorithms for digital formation of quadrature components in location complexes for various purposes], *Vestnik komp'yuternykh tekhnologiy* [Bulletin of Computer Technologies], 2006, No. 6, pp. 16-21.
18. Markovich I.I. Tsifrovaya obrabotka signalov v sistemakh i ustroystvakh: monografiya [Digital signal processing in systems and devices: monograph]. Rostov-on-Donu: Izd-vo YuFU, 2012, 236 p.
19. Vaganova A.A., Kisel' N.N., Panychev A.I. Napravlennye i polarizatsionnye svoystva mikropoloskovoy rekonfiguriruemoy anteny, perestraivayemoy po chastote i polarizatsii [Directional and polarization properties of a microstrip reconfigurable antenna, tunable in frequency and polarization], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 2 (219), pp. 74-83.
20. Vaganova A.A., Kisel' N.N., Panychev A.I. Microstrip reconfigurable antenna with tunable frequency and polarization, *Conference Proceedings – 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEMW 2021*, 2021, pp. 127-130.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.Р. Ильчук.

Маркович Игорь Ильич – Научное конструкторское бюро цифровой обработки сигналов Южного федерального университета; e-mail: marko@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634394055; директор-главный конструктор; к.т.н.; с.н.с.

Завтур Евгений Евгеньевич – e-mail: zavtur90@mail.ru; тел.: 88634393075; начальник сектора.

Паньчев Андрей Иванович – Южный федеральный университет; e-mail: aipanychev@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371634; к.т.н.; доцент.

Markovich Igor I'ich – Research and Design Bureau of Digital Signal Processing Southern Federal University; e-mail: marko@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634394055; cand. of eng. sc.; senior fellow; director–chief designer.

Zavtur Evgeny Evgenievich – e-mail: zavtur90@mail.ru; phone: +78634393075; head of section.

Panychev Andrey Ivanovich – Southern Federal University; e-mail: aipanychev@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371634; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 629.7:531.55:004.94

DOI 10.18522/2311-3103-2022-1-17-29

Н.А. Соколов, Д.А. Рябухин

К ПРОБЛЕМЕ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТАМ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННЫХ РЕСУРСОВ. ОПЫТ КАРАБАХА

На основе исследования опыта вооруженного конфликта в Нагорном Карабахе выявлены некоторые основные тенденции развития тактики применения беспилотных летательных аппаратов (БЛА) и определены возможные варианты противодействия в интересах повышения живучести подразделений тактического звена. Проведен анализ состояния вопроса разработки современных средств противовоздушной обороны (ПВО) в задачах борьбы с БЛА, в том числе малоскоростных и малоразмерных, способных осуществлять активное маневрирование и применяемых группами. Выявлены противоречия в требованиях скорейшей разработки специализированных средств (комплексов) противодействия БЛА и реальным, продолжительным временем на их разработку (5–15 лет), а также необходимыми затратами на создание, постановку серийного производства, закупку, и поставку в войска перспективных специализированных комплексов. Для решения тактических задач прикрытия от атак БЛА опорных пунктов отдельных подразделений, выполняющих задачи в отрыве от основных сил, предложено применение имеющихся в наличии инженерных боеприпасов – осколочных мин направленного поражения МОН-90, МОН-200. Проведено моделирование ситуации атаки малоразмерных низколетящих БЛА, и расчёт вероятности поражения БЛА инженерными осколочными минами, который показал приемлемую вероятность поражения низколетящих БЛА при их нахождении в секторе подрыва и разлета облака поражающих элементов мин.

Беспилотная авиационная система; беспилотный летательный аппарат; противодействие беспилотным летательным аппаратам.

N.A. Sokolov, D.A. Ryabukhin

TO THE PROBLEM OF COUNTERING UNMANNED AERIAL VEHICLES IN CONDITIONS OF LIMITED RESOURCES. THE KARABAKH EXPERIENCE

Based on the study of the experience of the armed conflict in Karabakh, some main trends in the development of tactics for the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) have been identified and possible counteraction options have been identified in the interests of increasing the survivability of tactical units. The analysis of the state of the issue of the development of modern means of air defense in the tasks of combating UAVs, including low-speed and small-sized, capable of active maneuvering and used by groups. Contradictions have been revealed in the requirements for the early development of specialized means (complexes) of countering UAVs and the real, long time