

Анализ и повышение частоты следования видеокадров в малогабаритных бортовых РЛС с синтезированной апертурой

Ненашев Вадим Александрович – д-р. техн. наук, доцент, заведующий лабораторией машинного обучения проектно-технологического офиса инженерной школы, доцент кафедры «Конструирования и технологий электронных и лазерных средств» ГУАП. E-mail: nenashev.va@yandex.ru, nenashev@guap.ru

Чембарисова Рената Ильдаровна – лаборант лаборатории машинного обучения проектно-технологического офиса инженерной школы ГУАП, студентка кафедры аэрокосмических компьютерных и программных систем ГУАП. E-mail: renatachembarisova@yandex.ru

Саута Олег Иванович – д-р. техн. наук, доцент профессор кафедры «Конструирования и технологий электронных и лазерных средств» ГУАП. E-mail: sauta-oleg@yandex.ru

Ненашев Сергей Александрович – заведующий лабораторией промышленной электроники проектно-технологического офиса инженерной школы, младший научный сотрудник кафедры «Конструирования и технологий электронных и лазерных средств» ГУАП, аспирант ГУАП. E-mail: nenashev_sergey178@mail.ru

Степанов Георгий Юрьевич – аспирант кафедры «Конструирования и технологий электронных и лазерных средств» ГУАП. E-mail: goshangoshan@inbox.ru

Аннотация

Введение. При разработке малогабаритных бортовых радиолокационных станций с синтезированной апертурой антенны востребованы методы формирования последовательности радиолокационных видеокадров, обеспечивающие высокое пространственное разрешение и достаточную частоту следования кадров в условиях ограниченной видимости, сложной метеорологической обстановки и ограниченных вычислительных ресурсов бортовой аппаратуры.

Целью исследования является анализ существующих подходов к формированию видеопотока радиолокационных кадров на малогабаритных бортовых РЛС с синтезированной апертурой, в том числе в многопозиционных системах, и определение направлений повышения частоты следования кадров при сохранении требуемого

разрешения в классических радиолокационных диапазонах зондирования подстилающей поверхности.

Методы. Исследование основано на анализе параметров режима синтезирования апертуры, определяющих разрешение по дальности и азимуту, частоту следования кадров, время синтезирования апертуры, коэффициент перекрытия субапертур, несущую частоту зондирующего сигнала, скорость носителя и наклонную дальность до зоны наблюдения.

Результаты. Рассмотрены однопозиционные и многопозиционные схемы формирования радиолокационных видеокадров, а также принципы многокурсного объединения данных от группы малогабаритных бортовых РЛС. В результате показано, что в традиционных однопозиционных видеосистемах с синтезированной апертурой существует устойчивый компромисс между разрешением радиолокационного кадра и частотой его формирования. Выявлены ограничения подходов, основанных на увеличении скорости носителя, уменьшении дальности наблюдения и повышении несущей частоты, включая необходимость перехода в миллиметровый или терагерцовый диапазоны. Предложен многопозиционный многокурсный подход, основанный на совместном применении группы пространственно распределённых малогабаритных бортовых РЛС, позволяющий сократить эффективное время синтезирования апертуры и повысить частоту следования кадров за счёт объединения субапертурных данных от нескольких носителей.

Практическая значимость. Полученные результаты могут быть использованы при разработке перспективных авиационных радиолокационных видеосистем для круглосуточного мониторинга зон чрезвычайных ситуаций, экологического контроля, картографирования труднодоступных территорий, а также для задач автоматического обнаружения, распознавания и классификации наземных объектов в условиях ограниченной видимости.

Ключевые слова: малогабаритная бортовая радиолокационная станция, синтезированная апертура антенны, радиолокационный видеопоток, частота следования кадров, азимутальное разрешение, субапертура, перекрытие субапертур, многокурсная обработка, многопозиционная радиолокационная система, группа МЛС, мониторинг чрезвычайных ситуаций, экологический контроль.

Информация о финансовой поддержке. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-79-10259).

Введение

В последние несколько лет наблюдается значительный рост применения малогабаритных бортовых радиолокационных станций (МБРЛС) в гражданских и промышленных задачах, таких как мониторинг зон чрезвычайных ситуаций (ЧС), картографирование и экологический контроль в труднодоступных местах. Однако существующие отдельные МБРЛС, используемые для этих задач, сталкиваются с ограничениями, связанными с высокими требованиями обеспечить необходимый уровень достоверности и информативности при их работе в сложных условиях ограниченной видимости, например обусловленной сложной метеорологической обстановкой.

Авиационные методы синтезирования апертуры антенны (САА) и режимы, основанные на этом принципе, получили свою известность благодаря возможности обеспечить высокое разрешение формируемого изображения в сложных условиях, не зависящих от условий освещения и погодных условий.

Однако, для МБРЛС, формирующих изображение на основе синтезирования полной апертуры, существует проблема, связанная с длительностью времени синтеза полной апертуры, из-за чего способность подобной системы контроля к динамическому отображению радиолокационной обстановки низкая.

Для решения этой проблемы был разработан видеорежим на основе САА, который позволяет отображать обстановку в динамике путем формирования последовательности радиолокационных видеок кадров за счет покадровой обработки данных, собираемых для САА во времени. Бортовые режимы формирования видеок кадров на основе САА, являются областью активных исследований, так как расширяют возможности традиционных МБРЛС с САА и позволяют обеспечить непрерывный контроль за наблюдаемой подстилающей поверхностью в динамике следования кадров аналогично оптическим видеосистемам, однако свободных от ограниченной их видимости, что наблюдается при неблагоприятных погодных условиях и условиях освещенности.

Использование не оптических, а радиолокационных авиационных видеосистем автоматизированного контроля, является важнейшим аспектом, так как они позволяют работать в условиях плохой и ограниченной видимости, а именно в ночное время, в плохих погодных условиях, при наличии тумана, дыма, осадков и облачности. Это позволяет осуществлять круглосуточный контроль зон природных катастроф, таких как наводнения, извержения вулканов, оползни, обрушения береговой линии и др.

Однако разрешение формируемых видеок кадров и частота их следования ниже, чем у оптических бортовых видеосистем, что обуславливает сосредоточение и необходимость исследований в направлении развития видеосистем с САА.

Особенности реализации режима формирования видеокадров с САА

В традиционных видеосистемах с САА существует компромисс между разрешением и частотой следования видеокадров [1-3]. Частота следования видеокадров определяет, какие объекты возможно отслеживать, с какими параметрами их движения. Этот компромисс между разрешением и частотой следования кадров, приводит к переходу рабочей частоты РЛС в терагерцовый диапазон. Однако использование такой высокой несущей частоты значительно увеличивает его затухание в атмосфере по мере распространения. Этот аспект является существенным ограничением для реализации режима формирования видеокадров с САА, который связан с терагерцовым диапазоном частоты зондирующего сигнала, который во многих случаях неприемлем, а также аппаратура для его реализации является дорогостоящей. Ожидается, что видеосистемы с САА смогут функционировать в классических радиолокационных диапазонах, например, в К или Х-диапазонах [4, 5].

Разрешение вышеупомянутых противоречий на базе однопозиционных систем, с учетом всех описанных требований к современным авиационным видеосистемам контроля за подстилающей поверхностью, сложно реализуемо. Поэтому решение находится в области исследования, развития и разработки новых междисциплинарных радиолокационных методик и подходов, способных качественно заменить оптические видеосистемы потоковой обработки кадров путем повышения разрешения кадров, а также обеспечив своевременность, достоверность и полноту формируемых радиолокационных данных для решения задач при реализации систем автоматического обнаружения, распознавания и классификации объектов различных типов в потоке уже на радиолокационных видеокадрах при освещении зоны обзора, а том числе передней, малогабаритных бортовых РЛС с помощью средств технического зрения с САА, траекторного управления группой МБРЛС и комплексирования многоракурсной информации с учетом специфики решаемых задач.

Исходя из вышеописанного *цель данной работы* – проанализировать существующие подходы к формированию последовательности радиолокационных видеокадров на малогабаритных бортовых РЛС, в том числе в многопозиционных системах для определения путей и направлений выявления и снятия их ограничений. То есть определения подхода по разработке новой методики формирования последовательности радиолокационных видеокадров (не более 1 метра) с высокой частотой их следования (5÷15 Гц) и функционирующей в диапазонах частот от 10÷110 ГГц для отображения

радиолокационной обстановки в динамике, в том числе в передних зонах обзора малогабаритных бортовых РЛС.

Анализ влияния параметров на разрешение и частоту следования видеокадров в последовательности

Для построения двумерных изображений высокого разрешения бортовые РЛС с САА используют модулированные широкополосные сигналы по частоте или фазе. Разрешение по дальности после сжатия сигнала определяется соотношением: $\Delta r = c / (2B)$, где c – скорость распространения электромагнитной волны, B – эффективная ширина полосы зондирующего сигнала.

Согласно традиционному методу формирования изображения в режиме САА в режиме наблюдения за одной и той же областью подстилающей поверхности, носитель МБРЛС осуществляет движение по отношению к зоне обзора как показано на рис. 1.

На рис. 1 показано взаимное расположение зоны обзора подстилающей поверхности и траектории движения носителя МБРЛС, функционирующего в режиме формирования видеокадра.

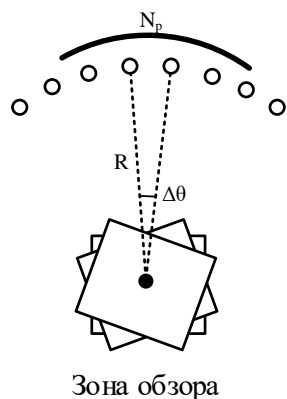


Рис. 1 – Взаимное расположение зоны обзора и носителя МБРЛС, функционирующего в режиме формирования видеокадра

Известно, что разрешение по азимуту [6-9] θ_c формируемого видеокадра методом САА определяется в радианах по следующему выражению (1):

$$\theta_c = \frac{\lambda}{2L_c \sin \theta_n} = \frac{\lambda}{2V_n T_c \sin \theta_n}, \quad (1)$$

где L_c – длина синтезированной апертуры антенны, м;

θ_n – угол между нормалью к траектории и направлением на центр зоны обзора, рад;

λ – длина волны радиолокационного сигнала, м;

V_n – скорость полёта носителя малогабаритной бортовой РЛС, м/с;

T_c – время синтезирования полной апертуры, с.

Отсюда линейное разрешение по азимуту выражается как

$$\Delta\beta = \theta_c R_c = \frac{\lambda R_c}{2V_n T_c \sin \theta_n} = \frac{R_c}{2V_n T_c \sin \theta_n} \cdot \frac{c}{f_c}, \quad (2)$$

где $\Delta\beta$ – линейное разрешение кадра по азимуту, м;

R_c – наклонная дальность от МБРЛС до центра наблюдаемой области, м;

c – скорость распространения волны, м/с;

f_c – несущая частота зондирующего сигнала, Гц.

Таким образом, увеличение ширины полосы зондирующего сигнала B обеспечивает повышение разрешения кадра по дальности. Для повышения разрешения по азимуту необходимо увеличение длины САА L_c , которое зависит от скорости носителя МБРЛС V_n и времени формирования САА T_c в соответствии с выражением (1). Из выражения (2) следует, что время формирования полной апертуры T_c при желаемом азимутальном разрешении кадра определяется по выражению (3):

$$T_c = \frac{1}{\Delta\beta} \cdot \frac{R_c}{2V_n \sin \theta_n} \cdot \frac{c}{f_c}, \quad (3)$$

При этом частота следования видеокадров F_r в последовательности определяется как

$$F_r = \frac{1}{T_c} = \frac{2V_n \sin \theta_n \Delta\beta}{R_c} \cdot \frac{f_c}{c}, \quad (4)$$

Для реализации режима формирования последовательности видеокадров требуется обеспечить высокую частоту их следования F_r , однако, согласно выражению (4), этот параметр имеет предел, что является проблемой, требующей анализа и решения.

Системы формирования последовательности видеокадров могут быть реализованы как в режиме без перекрытия (см. рис. 2а), так и в режиме с перекрытием (см. рис. 2б) [10-15]. Для разрешения проблемы повышения частоты видеокадров используется подход наложения данных с перекрытием, получаемых от канала дальности.

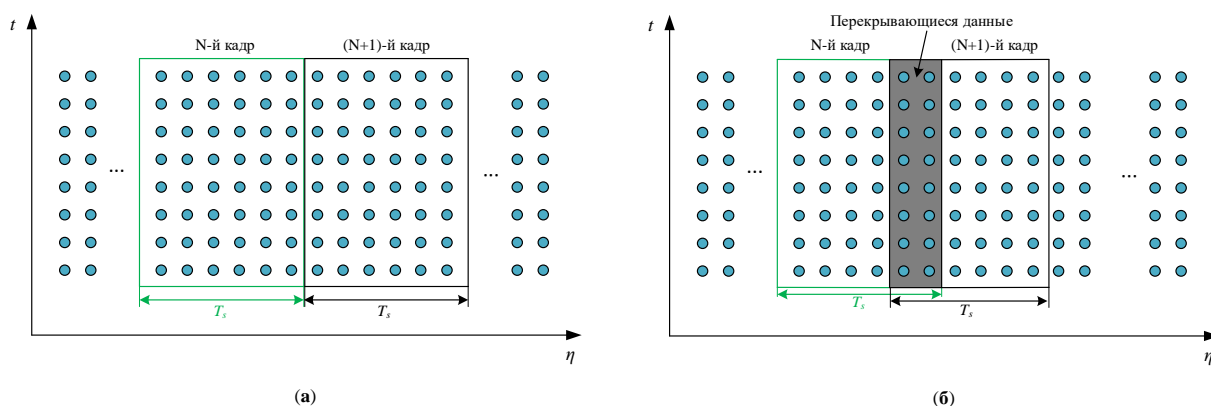


Рис. 2 – Режим формирования последовательности видеокадров с САА: (а) без перекрытия; (б) с перекрытием (наложением данных).

В случае без перекрытия данных (рис. 2а), то есть без повторного их использования в каждом кадре частота F_r зависит только от параметров РЛС и взаимного расположения носителя и наблюдаемой зоны в процессе САА.

Как правило, частота видеокадров F_r может увеличиваться за счёт повторного использования собираемых данных. Принцип реализации режима перекрывающихся кадров, показанный на рис. 2б, заключается в том, что между соседними кадрами часть эходанных - дорожек дальности перекрываются. Это означает, что для формирования следующего кадра в видеопоследовательности необходимо обновить только часть данных. При этом вводится коэффициент перекрытия (k), связанный с частотой следования кадров.

Режим без перекрытия (рис. 2а) является частным случаем режима с перекрытием (рис. 2б) в случае, когда коэффициент перекрытия равняется нулю ($k = 0$). Иначе, выражение для расчета частоты кадров (5) преобразуется к следующему виду:

$$F_r = \frac{1}{(1-k)T_c} = \frac{2V_n \sin \theta_n \Delta \beta}{(1-k)R_c} \cdot \frac{f_c}{c}, \quad (5)$$

где k – коэффициент перекрывающихся выборок дорожек дальности, используемых для генерации соседних кадров, формируемых в режиме САА.

Увеличение доли перекрывающихся данных k позволяет увеличить частоту кадров F_r , но для увеличения числа перекрывающихся выборок дальностного канала требуется сразу формировать РЛК по этим данным. То есть, данным, полученным после интервала перекрытия, что требует достаточно быстрой реализации этого процесса в бортовой вычислительной аппаратуре МБРЛС. В крайнем случае новый кадр может быть сформирован с каждым принятым эхо-сигналом. В этом случае частота кадров соответствует частоте повторения импульсов в изучаемой пачке. На рис. 3 приведены

графики, отражающие зависимость частоты следования видеокадров от количества импульсов, участвовавших в САА, и доли их перекрытия.

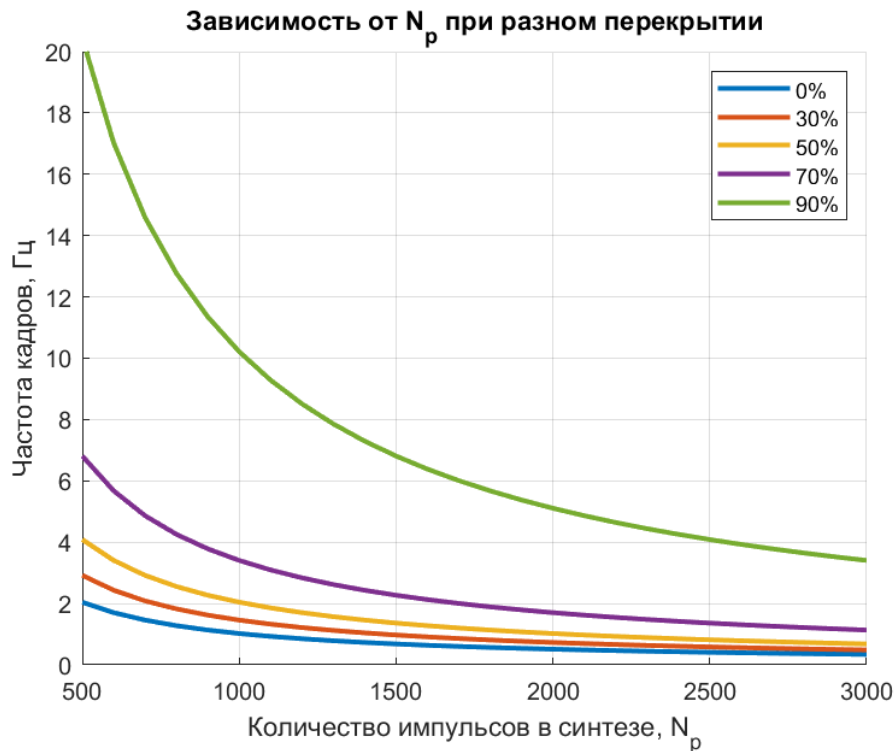


Рис. 3 – Зависимость частоты следования видеокадров от количества импульсов, участвовавших в САА, и доли их перекрытия

На рис. 3 приведена зависимость N_p от F_r при следующих параметрах: $V_n = 250$ м/с, $\Delta\beta = 65$ м, $R_c = 3000$ м, $f_c = 40$ ГГц, $\theta_n = 45^\circ$. В отличие от режима без перекрытия, где F_r зависел от параметров РЛС и взаимного расположения поверхности и РЛС, режим с перекрытием данных зависит еще от коэффициента перекрытия k – повторного использования данных, который отражает скорость обновления данных. Следует также отметить, что разрешение по азимуту $\Delta\beta$ не зависит ни от степени перекрытия, ни от частоты следования кадров в видеопоследовательности.

Чрезмерно высокая частота повторного использования данных для перекрытия приводит к незначительным изменениям между соседними кадрами и высокой избыточности информации. Увеличение частоты следования кадров в последовательности имеет решающее значение для проектирования видеосистем с САА.

Из анализа выражения (5), следует что основными параметрами, влияющими на увеличение частоты следования кадров в последовательности, являются следующие:

- скорость носителя МБРЛС;
- несущая частота;
- разрешение формируемого видеокадра;
- наклонная дальность от МБРЛС до наблюдаемой зоны.

Для эффективной работы авиационных видеосистем экологического контроля подстилающих поверхностей и реализации алгоритмов распознавания требуется, чтобы разрешение формируемого кадра было в диапазоне $0,30 \div 0,75$ метров, а частота их следования – $5 \div 15$ Гц.

Поэтому для повышения частоты кадров можно рассмотреть только увеличение скорости полета носителя МБРЛС V_n , увеличение несущей частоты f_c или уменьшение наклонной дальности R_c .

Однако скорость полета V_n имеет, как правило, пределы, обусловленные характеристиками малого летательного аппарата, на котором она базируется. Кроме того, уменьшение наклонной дальности R_c приводит к тому, что МБРЛС может оказаться слишком близко к земной поверхности, что снижает практическую ценность экологического авиационного контроля, например, в случае мониторинга пожаров, когда носителю требуется находиться на значительном удалении от наблюдаемых территорий в силу сохранения своей целостности. Следовательно, увеличение несущей частоты РЛС f_c обычно является предпочтительным подходом для обеспечения высокой частоты следования видеокадров в последовательности.

На рис. 4 показаны графики частоты следования видеокадров в зависимости от несущей частоты при разных скоростях полёта носителя малогабаритной бортовой РЛС. Для дальнейших расчетов $\sin \theta_n$ принимается равным 1.

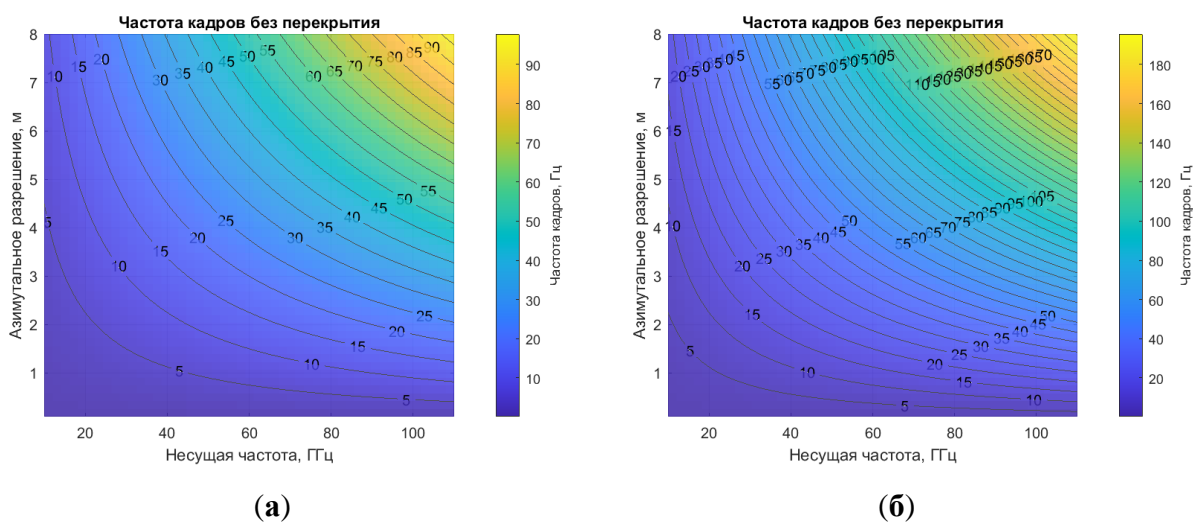


Рис. 4 – Зависимость частоты следования кадров без перекрытия от несущей частоты и скорости полета носителя МБРЛС: (а) скорость $V_n = 50$ м/с; (б) скорость $V_n = 100$ м/с

На рис. 4а задана скорость полёта носителя малогабаритной бортовой РЛС $V_n = 50$ м/с, а наклонная дальность от МБРЛС до центра наблюдаемой области $R_c = 3000$ м = 3 км. Так, например, при несущей частоте $f_c = 40$ ГГц частота кадров без перекрытия $F_r = 15$ Гц

достигается при азимутальном разрешении $\Delta\beta \approx 3,5$ м. На рис. 4б увеличена скорость полета носителя малогабаритной бортовой РЛС V_n до 100 м/с. Тогда при несущей частоте $f_c = 40$ ГГц частота кадров без перекрытия $F_r = 15$ Гц достигается при азимутальном разрешении $\Delta\beta \approx 2$ м.

Из анализа графиков рис. 4 следует, что частота следования кадров увеличивается с ростом несущей частоты и уменьшается при увеличении азимутального разрешения. Это поведение связано с уменьшением длины волны при росте несущей частоты, что позволяет ускорить процесс накопления данных. Увеличение значения $\Delta\beta$ приводит к росту времени, требуемого на формирование субапертуры, что замедляет частоту обновления кадров при генерации видеопоследовательности.

Добиться высокого значения F_r частоты формирования РЛК в потоке непростая задача, особенно в условиях, когда требуется также обеспечить высокое разрешение (малые $\Delta\beta$) каждого РЛК и осуществлять бортовой контроль на больших дальностях (R_c) от наблюдаемой зоны обзора. На практике это вынуждает идти на компромиссы: либо искусственно занижать разрешение, либо сокращать дальность обзора.

Уменьшение $\Delta\beta$ (то есть рост разрешающей способности) автоматически ведёт к увеличению T_c . Физический смысл этого в том, что для получения более «узкого» по азимуту сигнала система должна за более длительный интервал накопить широкий спектр азимутальных частот. Например, при фиксированных λ и R_c уменьшение $\Delta\beta$ вдвое приведёт к примерно двукратному росту времени субапертуры. Это накладывает серьёзные ограничения на достижение сверхвысокой детализации (например, разрешения порядка десятков сантиметров), особенно если при этом нужно формировать много кадров в секунду.

На рис. 5 показаны графики частоты следования видеокадров в зависимости от несущей частоты и наклонной дальности от МБРЛС до центра наблюдаемой области.

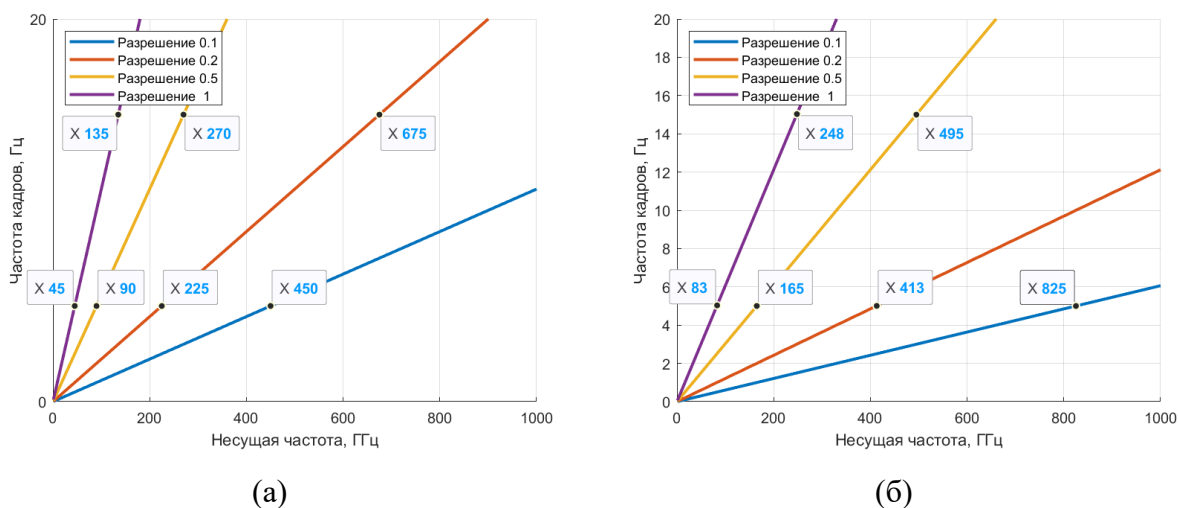


Рис. 5 – Зависимость частоты следования кадров без перекрытия от несущей частоты и наклонной дальности от МБРЛС до центра наблюдаемой области: (а) $R_c = 3000$ м; (б) $R_c = 5500$ м

На рис. 5 показана зависимость частоты кадров видеосистемы с САА от несущей частоты на разных дальностях при фиксированной скорости полета носителя $V_n = 50$ м/с. Из рис. 5 видно, что при заданных частоте следования кадров и разрешении увеличение дальности потребует увеличения несущей частоты РЛС.

Например, на рис. 5а при рабочей наклонной дальности от МБРЛС до центра наблюдаемой области $R_c = 3000$ м = 3 км, скорости полёта носителя малогабаритной бортовой РЛС $V_n = 50$ м/с и разрешения по азимуту $\Delta\beta = 0,5$ для достижения частоты кадров без перекрытия $F_r = 5$ Гц необходима несущая частота $f_c = 90$ ГГц, а для $F_r = 15$ Гц при том же $\Delta\beta = 0,5$ нужна частота $f_c = 270$ ГГц.

В то время как на рис. 5б при той же скорости, том же разрешении по азимуту, но с рабочей наклонной дальностью от МБРЛС до центра наблюдаемой области $R_c = 5500$ м = 5,5 км для достижения частоты кадров без перекрытия $F_r = 5$ Гц необходима несущая частота $f_c = 165$ ГГц, а для а для $F_r = 15$ Гц при том же $\Delta\beta = 0,5$ нужна частота $f_c = 495$ ГГц. Таким образом, при увеличении рабочей наклонной дальности растет и несущая частота f_c для достижения требуемой частоты кадров.

Таким образом, главным недостатком подхода увеличения частоты кадров является необходимость существенного перекрытия последовательных подапертур при высоких требованиях к частоте кадров и разрешению кадра. Высокая доля перекрытия приводит к значительному увеличению вычислительной нагрузки, росту требований к скорости обработки данных и сложности аппаратной реализации на борту малого летательного аппарата.

Для повышения разрешения кадра и частоты их следования предлагается использовать техники повышения несущей частоты (например, переход в миллиметровый диапазон), что уменьшает требуемую длительность синтезированной подапертуры, увеличения полосы частот сигнала, что ведёт к улучшению разрешения по дальности.

В результате многие проекты видеосистем с САА в настоящее время ориентированы на терагерцовый диапазон. Однако незрелость и высокая стоимость терагерцовых устройств создают проблемы для разработки и применения видеосистем с САА на их основе. Поэтому для решения этих проблем в данной работе предпринята попытка внедрить многопозиционный подход.

Также можно предположить уменьшение высоты полёта и дальности наблюдения (где это возможно), что уменьшает продолжительность синтезирования, но эти решения не несут оптимальных характер, что приводит к необходимости поиска новых и совершенствования существующих методик обработки радиолокационных эхо-сигналов и алгоритмов интерполяции, включая методы достижения сверхразрешения и многопозиционную (разноракурсную) обработку сигналов, что позволит компенсировать влияние перекрытий подапертур и снизить вычислительную нагрузку.

Многоракурсный режим повышения частоты следования кадров

Для МБРЛС с САА с высоким азимутальным разрешением (кадра) увеличение центральной частоты до W -диапазона или даже ТГц-диапазона может значительно сократить время синтезированной апертуры, тем самым повышая частоту следования кадров и облегчая наблюдение за контролируемой подстилающей поверхностью и движущимися объектами на ней. Однако, как было отмечено ранее, излучаемый сигнал с такой высокой несущей частотой затухает при распространении, а скорость носителя РЛС ограничена его техническими характеристиками.

В отличие от такого подхода, взаимодействующая группа МБРЛС, каждая из которых установлена на малогабаритных летательных аппаратах (МЛА) и распределена в пространстве, может позволить сократить требуемое время на САА, оставаясь при этом в более низком рабочем диапазоне длин волн, чем терагерцовый. Распределённая группа МБРЛС может быть выстроена таким образом, чтобы осуществлять контроль интересующей заданной зоны подстилающей поверхности в режиме многоракурсного наблюдения. Затем, путем объединения многоракурсной информации (суб-апертур) от каждой отдельной МБРЛС, может быть достигнуто высокое разрешение кадра по азимуту с высокой частотой их следования.

В этом многоракурсном режиме каждая МБРЛС, входящая в группу, функционирует независимо от работы сторонних станций, то есть группа рассматривается как совокупность нескольких независимых МБРЛС с САА и осуществляющих формирование кадров низкого разрешения.

В этом случае длинная синтезированная апертура, требуемая для формирования видеокадра высокого азимутального разрешения, разделяется на несколько коротких суб-апертур, и где каждая МБРЛС с САА реализует формирование с использованием коротких суб-апертур для генерации кадра низкого разрешения.

Так, несколько кадров низкого разрешения объединяются для формирования кадра с требуемым высоким азимутальным разрешением. В результате время САА

пропорционально обратному числу носителей МБРЛС, частота следования кадров видеосистемы с САА, основанной на применении группы РЛС, можно выразить как

$$F_r = \frac{N}{(1-k)T_c} = \frac{2V_n \sin \theta_n \Delta\beta N}{(1-k)R_c} \cdot \frac{f_c}{c}, \quad (6)$$

где N – количество носителей МБРЛС. Очевидно, что увеличение количества носителей может линейно увеличивать частоту следования кадров F_r . В отличие от видеосистемы, совместное наблюдение на основе группы МБРЛС может сократить время синтезированной апертуры T_c до времени T_c/N . Суть многоакурсного подхода представлена на рис. 6, где распределенные в пространстве N МБРЛС, осуществляют совместный контроль за наблюдаемой зоной.

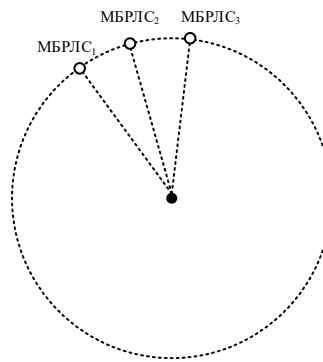


Рис. 6 – Траектория полета нескольких носителей МБРЛС

Здесь N носителей МБРЛС осуществляют движения с одинаковой скоростью V_n по круговой траектории полета радиусом R_c . Диаграммы направленности каждого из N МБРЛС, направлены в одну и ту же наблюдаемую область радиусом R_a .

Положение первой МБРЛС определяется как $(R_c \cdot \sin(\theta), R_c \cdot \cos(\theta), H)$, где $\theta \in [0, 2\pi]$ – угол обзора, а H – высота полета носителя МБРЛС. Положение n -й МБРЛС, определяется как $(R_c \cdot \sin(\theta + (n-1)\Delta\theta), R_c \cdot (\theta + (n-1)\Delta\theta), H)$, где $\Delta\theta$ – угол между соседними МБРЛС, входящими в группу, который определяется в радианах как

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{2\Delta\beta(N-1)} = \frac{1}{2\Delta\beta_c(N-1)} \frac{c}{f_c}, \quad (7)$$

Как видно из выражения, параметр $\Delta\theta$ связан с желаемым азимутальным разрешением $\Delta\beta$ кадра. Через время $T_c = (R_p \cdot \Delta\theta)/V_n$ с начала полета эхо-данные от каждого из N МБРЛС для субапертур могут быть объединены для формирования длиной САА, а затем посредством их обработки формируется один кадр с высоким разрешением по азимуту.

На рис. 6 показано взаимное расположение наблюдаемой зоны обзора и носителя МБРЛС, функционирующего в режиме формирования кадра при круговой траектории движения.

В этом случае угол $\Delta\theta_n$ между точками сбора эхо-сигнала, собираемого для синтеза апертуры рассчитывается следующим образом

$$\Delta\theta_n = \frac{V_n}{R \cdot f_p}, \quad (8)$$

где f_p – частота повторения зондирующих импульсов в каждой точке зондирования;

V_n – скорость носителя МБРЛС;

R – дальность от фазового центра антенны до наблюдаемой зоны обзора.

Таким образом, выполняя полет по окружности и направляя лучи в центр наблюдаемой подстилающей поверхности, осуществляется непрерывный сбор эхо-данных дорожек дальности через время $1/f_p$ за которое носитель МБРЛС пройдет расстояние V_n/f_p , что в радианах в полярной системе координат равно $\Delta\theta_n$.

Для формирования одного видеокadra путем САА, требуется по мере движения носителя МБРЛС через $\Delta\theta_n$ собирать определенное количество N_p эхо-сигналов. В этом случае доля окружности, то есть длины синтезированной апертуры L_θ соответствует пройденному пути по этой окружности в радианах и определяется по выражению (9):

$$L_\theta = N_p \cdot \Delta\theta_n = \frac{N_p \cdot V_n}{R \cdot f_p}, \quad (9)$$

где N_p – количество зондирований, полученных по мере движения МЛА на интервале САА через интервал $\Delta\theta_n$. То есть длина САА одного РЛК зависит от количества дорожек дальности N_p , и расстояния между принятием МБРЛС зондирующего сигнала.

Разрешение по азимуту $\Delta\beta$ видеосистемы наблюдения с САА можно выразить следующим образом:

$$\Delta\beta = \frac{\lambda}{2L_\theta} = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{R \cdot f_p}{N_p \cdot V_n} \quad (10)$$

В случае без перекрытия, время требуемое для САА этого одного РЛК, вычисляется по выражению (11)

$$T_c = \frac{N_p}{f_p} \quad (11)$$

При этом частота следования РЛК F_c в ВП определяется как

$$F_c = \frac{1}{T_c} = \frac{f_p}{N_p} \quad (12)$$

В случае с перекрытием, что эквивалентно повторному использованию данных каждого кадра, при этом частота кадров системы перестает быть величиной обратной времени САА T_{sub} .

Предполагая, что количество азимутальных импульсов, перекрывающихся между каждым кадром данных, равно N_a , а количество импульсов, обновляемых каждый раз, равно $N_p - N_a$.

Если время обработки кадра значительно меньше времени, необходимого для обновления импульсов количества $N_p - N_a$, частота кадров системы в реальном времени F_r может быть выражена следующим образом:

$$F_r = \frac{1}{(1-k)T_{sub}} = \frac{V_n}{R\Delta\theta(N_p - N_a)} = \frac{f_p}{N_p - N_a}, \quad (13)$$

где $T_{sub} = (R_p \cdot \Delta\theta) / V_n$

Для многопозиционного случая и кругового обзора F_r описывается при помощи выражения (14):

$$F_r = \frac{N}{(1-k)T_{sub}} = \frac{2V_n \sin\theta_n \Delta\beta N}{(1-k)R_c} \cdot \frac{f_c}{c} \quad (14)$$

В качестве примера на рис. 7 рассмотрено влияние нескольких носителей МБРЛС на частоту кадров F_r . Рассмотрено 2 варианта: с двумя носителями и с тремя.

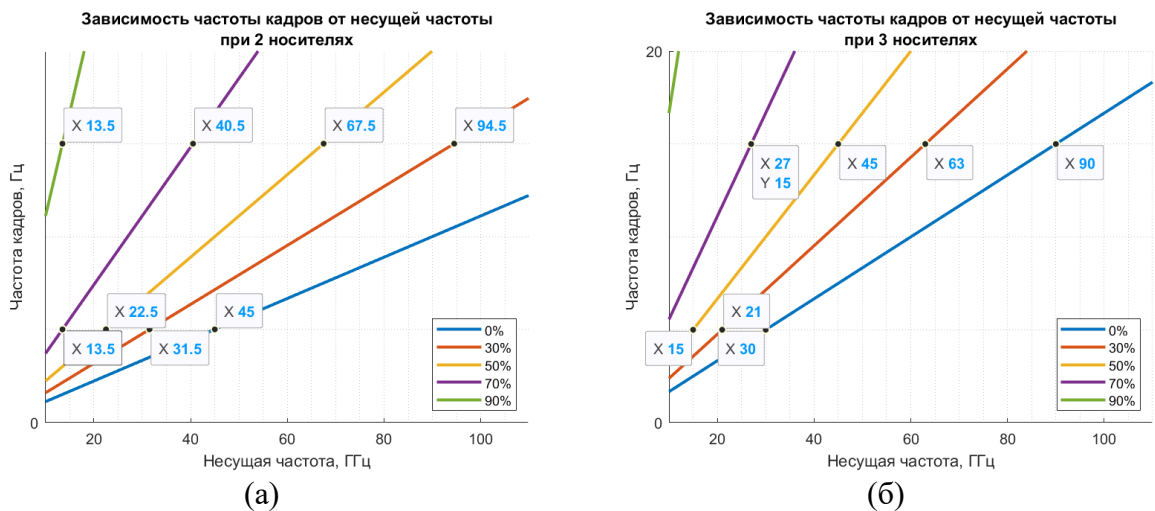


Рис. 7 – Зависимость частоты следования кадров без перекрытия от несущей частоты и наклонной дальности от МБРЛС до центра наблюдаемой области нескольких носителей МБРЛС: (а) два носителя МБРЛС; (б) три носителя МБРЛС

На рис. 7а при скорости полёта двух носителей малогабаритной бортовой РЛС $V_n = 50$ м/с, рабочей наклонной дальности от МБРЛС до центра наблюдаемой области $R_c = 3000$ м = 3 км, разрешении по азимуту $\Delta\beta = 0,5$ частота кадров без перекрытия $F_r = 5$ Гц начинает достигаться только при перекрытии, меньше 90%. Для перекрытия 90% эта частота может

достигаться при меньшей несущей частоте, которая не входит в исследуемый К- или Х-диапазон. $F_r = 15$ Гц достигается при несущей частоте $f_c = 13,5$ ГГц при условии 90% перекрытия. При уменьшении перекрытия необходимая несущая частота растет. Так, при несущей частоте $f_c = 40,5$ ГГц частота кадров без перекрытия $F_r = 15$ Гц достигается при 70% перекрытии.

На рис. 7б при увеличении количества носителей МБРЛС уменьшается требуемая несущая частота для достижения требуемой частоты кадров. Так, при трех носителях с теми же параметрами для достижения $F_r = 5$ Гц перекрытие уже должно быть меньше 70%. Для достижения $F_r = 15$ Гц нужна частота $f_c = 27$ ГГц при 70% перекрытии. При 90% перекрытии необходимая несущая частота должна быть меньше 10 ГГц, что не входит в К- или Х-диапазон. Таким образом, при увеличении количества носителей МБРЛС, уменьшается необходимая несущая частота для достижения требуемой частоты кадров.

Проведённый анализ многопозиционного подхода показал, что объединение данных от группы пространственно распределённых малогабаритных бортовых РЛС позволяет линейно повысить частоту следования видеокадров за счёт сокращения эффективного времени синтеза апертуры пропорционально числу носителей. Установлено, что при увеличении количества РЛС уменьшается требуемая несущая частота для достижения заданной частоты кадров, что делает возможным работу в классических диапазонах К и Х вместо терагерцового. Таким образом, цель работы достигнута, так как многопозиционный многоакурсный подход снимает ограничения однопозиционных систем.

Заключение

В работе рассмотрены особенности формирования радиолокационного видеопотока на основе малогабаритных бортовых РЛС с синтезированной апертурой антенны. Показано, что такие системы позволяют вести наблюдение в условиях ограниченной видимости, однако при формировании последовательности кадров возникает противоречие между пространственным разрешением и частотой их следования.

Проведённый анализ показал, что повышение частоты кадров в однопозиционных системах за счёт увеличения скорости носителя, несущей частоты, уменьшения дальности наблюдения или перекрытия субапертур имеет существенные ограничения. Эти ограничения связаны с техническими характеристиками малогабаритных летательных аппаратов, атмосферным затуханием, ростом вычислительной нагрузки и избыточностью данных.

В качестве перспективного направления предложено использовать многопозиционный многоакурсный подход, основанный на совместной работе группы

малогабаритных бортовых РЛС. Объединение данных от нескольких носителей позволяет сократить эффективное время синтезирования апертуры, повысить частоту следования кадров и сохранить требуемое азимутальное разрешение в классических радиолокационных диапазонах.

Таким образом, дальнейшее развитие методов многокурсовой обработки и распределённого формирования радиолокационных кадров является актуальным направлением для создания авиационных видеосистем мониторинга зон чрезвычайных ситуаций, экологического контроля и автоматического обнаружения наземных объектов.

Список используемых источников

1. Wang, Y., Min, R., Li, L., & Ding, Z. (2023). High-Squint High-Frame-Rate Uniform-Resolution Video SAR: Parameter Design and Fast Imaging. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 59(6), 9160-9176. Article 3315713. doi: [10.1109/TAES.2023.3315713](https://doi.org/10.1109/TAES.2023.3315713)
2. Преображенский Ю. П., Чупринская Ю. Л., Ружицкий Е. Особенности расчёта сверхширокополосных апертурных антенн // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2021. № 4(39). С. 37-39.
3. Детков А. Н. Оптимизация траектории наведения беспилотного летательного аппарата на наземный объект по данным бортового радиолокатора с синтезированием апертуры антенны в передней зоне обзора // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2023. № 1-2(175-176). С. 71-79.
4. Ерзин И. Х., Коновалов А. Ю., Сармин И. К. Обзор режимов работы радиолокационных станций с цифровым синтезированием апертуры антенны, устанавливаемых на беспилотных летательных аппаратах // Научный альманах. 2024. № 11-5(121). С. 28-31.
5. Голиков, А. М., Ляхов Г. И., Иванов Д. В. Радар с синтезированием апертуры антенн (SAR) и вейвлет-обработкой сигналов // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. 2023. № 1-2. С. 257-260.
6. A. Oveis, M. Martorella, M. A. Sebt and A. Noroozi, "Enhanced Azimuth Resolution in Synthetic Aperture Radar Using the MUSIC Algorithm," 2020 17th European Radar Conference (EuRAD), Utrecht, Netherlands, 2021, pp. 140-143, doi: [10.1109/EuRAD48048.2021.00045](https://doi.org/10.1109/EuRAD48048.2021.00045).

7. R. Bao, C. Li, P. Wang, Y. Liu and Y. Guo, "High-Resolution Imaging of Azimuth Frequency Scanning SAR," 2023 8th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR), Bali, Indonesia, 2023, pp. 1-7, doi: 10.1109/APSAR58496.2023.10388826.
8. Q. Wu, M. Xing, H. Shi and Z. Bao, "High azimuth resolution wide swath imaging based on the intrapulse spotlight SAR," 2009 2nd Asian-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, Xi'an, China, 2009, pp. 421-425, doi: 10.1109/APSAR.2009.5374290.
9. G. Antonijević, S. Simić and D. Bujaković, "Improving the azimuth resolution of stripmap SAR image using Adaptive Weighted Norm Extrapolation," 2017 25th Telecommunication Forum (TELFOR), Belgrade, Serbia, 2017, pp. 1-4, doi: 10.1109/TELFOR.2017.8249364.
10. F. Yi, J. Chen and N. Jiang, "2D Resolution Coherent Enhancement of Distributed Spaceborne SAR," 2024 IEEE International Conference on Signal, Information and Data Processing (ICSIDP), Zhuhai, China, 2024, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICSIDP62679.2024.10868754.
11. M. Younis et al., "Overlapping Azimuth Channels for SAR Imaging— Revisited," EUSAR 2024; 15th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Munich, Germany, 2024, pp. 801-805.
12. M. Zhou, R. Wang, C. Gao, J. Yan, J. Li and H. Liu, "Task Scheduling and Resource Optimization Methods for Multi-Target Imaging in Airborne SAR," 2025 IEEE 15th International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC), Hong Kong, Hong Kong, 2025, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICSPCC66825.2025.11194504.
13. L. Zeng, Y. Huai, Q. Mao, Y. Zou and J. Li, "Squinted Automotive Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW) Synthetic Aperture Radar (SAR) Imaging Algorithm Based on Modified Range Migration Algorithm (RMA)," 2025 6th International Conference on Electrical, Electronic Information and Communication Engineering (EEICE), Shenzhen, China, 2025, pp. 764-768, doi: 10.1109/EEICE65049.2025.11034072.
14. H. Taherian and D. Wang, "Multi-Resolution Location-Based Training for Multi-Channel Continuous Speech Separation," ICASSP 2023 - 2023 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Rhodes Island, Greece, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICASSP49357.2023.10096684.
15. Y. Lou, M. Xing, H. Lin, P. Ma, G. -C. Sun and R. Li, "A Time-Domain Processing Framework for Airborne and Vehicle-Borne Microwave Photonic SAR With a Resolution of 0.02 m," in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 63, pp. 1-20, 2025, Art no. 5211420, doi: 10.1109/TGRS.2025.3565299.

Analysis and Enhancement of Video Frame Rates in Compact Airborne Synthetic Aperture Radars

Vadim Aleksandrovich Nenashev – Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the Machine Learning Laboratory of the Design and Technology Office of the School of Engineering, Associate Professor of the Department of Design and Technology of Electronic and Laser Equipment at SUAI. Email: nenashev.va@yandex.ru, nenashev@guap.ru

Renata Ildarovna Chembarisova – Laboratory Assistant of the Machine Learning Laboratory of the Design and Technology Office of the School of Engineering at SUAI, student of the Department of Aerospace Computer and Software Systems at SUAI.

Email: renatachembarisova@yandex.ru

Oleg Ivanovich Sauta – Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Design and Technology of Electronic and Laser Equipment at SUAI. Email: sauta-oleg@yandex.ru

Sergey Aleksandrovich Nenashev – Head of the Industrial Electronics Laboratory, Design and Technology Office, School of Engineering, Junior Researcher, Department of Design and Technology of Electronic and Laser Devices, SUAI, and Graduate Student, SUAI. Email: nenashev_sergey178@mail.ru

Georgy Yuryevich Stepanov – Graduate Student, Department of Design and Technology of Electronic and Laser Devices, SUAI. Email: goshangoshan@inbox.ru

Abstract

Introduction. The development of compact airborne synthetic aperture radars requires methods for generating radar video frame sequences that provide high spatial resolution and a sufficient frame rate in conditions of limited visibility, adverse weather conditions, and limited computing resources of the onboard equipment.

The aim of this study is to analyze existing approaches to generating radar video streams on compact airborne synthetic aperture radars, including in multi-position systems, and to identify ways to increase the frame rate while maintaining the required resolution in classic radar ranges for probing the underlying surface.

Methods. The study is based on an analysis of aperture synthesis mode parameters that determine range and azimuth resolution, frame rate, aperture synthesis time, subaperture overlap ratio, probing signal carrier frequency, carrier velocity, and slant range to the observation zone.

Results. Single- and multi-position schemes for generating radar video frames, as well as principles of multi-angle fusion of data from a group of small airborne radars, are considered. It is

demonstrated that traditional single-position synthetic aperture video systems exhibit a stable tradeoff between radar frame resolution and frame generation rate. The limitations of approaches based on increasing carrier speed, reducing observation range, and increasing carrier frequency are identified, including the need to switch to millimeter-wave or terahertz frequency bands. A multi-position multi-angle approach is proposed, based on the combined use of a group of spatially distributed small airborne radars, which reduces the effective aperture synthesis time and increases the frame rate by fusion of subaperture data from multiple carriers.

Practical Relevance. The obtained results can be used in the development of advanced airborne radar video systems for 24/7 monitoring of emergency zones, environmental monitoring, mapping of hard-to-reach areas, as well as for automatic detection, recognition, and classification of ground objects in low visibility conditions.

Keywords: compact airborne radar, synthetic aperture antenna, radar video stream, frame rate, azimuthal resolution, subaperture, subaperture overlap, multi-angle processing, multi-position radar system, UAV swarm, emergency monitoring, environmental monitoring.

References

1. Wang, Y., Min, R., Li, L., & Ding, Z. (2023). High-Squint High-Frame-Rate Uniform-Resolution Video SAR: Parameter Design and Fast Imaging. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 59(6), pp. 9160–9176. Article 3315713. doi: 10.1109/TAES.2023.3315713
2. Preobrazhensky, Yu. P., Chuprinskaya, Yu. L., Ruzhitsky, E. “Calculation Features of Ultra-Wideband Aperture Antennas.” *Bulletin of the Voronezh Institute of High Technologies*. 2021. No. 4(39). pp. 37–39.
3. Detkov, A. N. “Optimization of the Guidance Trajectory of an Unmanned Aerial Vehicle on a Ground Object Based on Data from an Airborne Synthetic Aperture Radar in the Forward Field of View” // *Issues of Defense Technology. Series 16: Technical Means of Countering Terrorism*. 2023. No. 1-2 (175-176). pp. 71-79.
4. Erzin, I. Kh., Konovalov, A. Yu., Sarmin, I. K. “Review of the Operating Modes of Digital Synthetic Aperture Radar Stations Installed on Unmanned Aerial Vehicles” // *Scientific Almanac*. 2024. No. 11-5 (121). pp. 28-31.
5. Golikov, A. M., Lyakhov G. I., Ivanov D. V. Synthetic aperture radar (SAR) with wavelet signal processing // *Electronic means and control systems. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. 2023. No. 1-2. pp. 257-260.
6. A. Oveis, M. Martorella, M. A. Sebt and A. Noroozi, "Enhanced Azimuth Resolution in Synthetic Aperture Radar Using the MUSIC Algorithm," 2020 17th European Radar Conference (EuRAD), Utrecht, Netherlands, 2021, pp. 140-143, doi: 10.1109/EuRAD48048.2021.00045.

7. R. Bao, C. Li, P. Wang, Y. Liu and Y. Guo, "High-Resolution Imaging of Azimuth Frequency Scanning SAR," 2023 8th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR), Bali, Indonesia, 2023, pp. 1-7, doi: 10.1109/APSAR58496.2023.10388826.
8. Q. Wu, M. Xing, H. Shi and Z. Bao, "High azimuth resolution wide swath imaging based on the intrapulse spotlight SAR," 2009 2nd Asian-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, Xi'an, China, 2009, pp. 421-425, doi: 10.1109/APSAR.2009.5374290.
9. G. Antonijević, S. Simić and D. Bujaković, "Improving the azimuth resolution of stripmap SAR image using Adaptive Weighted Norm Extrapolation," 2017 25th Telecommunication Forum (TELFOR), Belgrade, Serbia, 2017, pp. 1-4, doi: 10.1109/TELFOR.2017.8249364.
10. F. Yi, J. Chen and N. Jiang, "2D Resolution Coherent Enhancement of Distributed Spaceborne SAR," 2024 IEEE International Conference on Signal, Information and Data Processing (ICSIDP), Zhuhai, China, 2024, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICSIDP62679.2024.10868754.
11. M. Younis et al., "Overlapping Azimuth Channels for SAR Imaging— Revisited," EUSAR 2024; 15th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Munich, Germany, 2024, pp. 801-805.
12. M. Zhou, R. Wang, C. Gao, J. Yan, J. Li and H. Liu, "Task Scheduling and Resource Optimization Methods for Multi-Target Imaging in Airborne SAR," 2025 IEEE 15th International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC), Hong Kong, Hong Kong, 2025, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICSPCC66825.2025.11194504.
13. L. Zeng, Y. Huai, Q. Mao, Y. Zou and J. Li, "Squinted Automotive Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW) Synthetic Aperture Radar (SAR) Imaging Algorithm Based on Modified Range Migration Algorithm (RMA)," 2025 6th International Conference on Electrical, Electronic Information and Communication Engineering (EEICE), Shenzhen, China, 2025, pp. 764-768, doi: 10.1109/EEICE65049.2025.11034072.
14. H. Taherian and D. Wang, "Multi-Resolution Location-Based Training for Multi-Channel Continuous Speech Separation," ICASSP 2023 - 2023 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Rhodes Island, Greece, 2023, pp. 1-5. doi: 10.1109/ICASSP49357.2023.10096684.
15. Y. Lou, M. Xing, H. Lin, P. Ma, G. -C. Sun and R. Li, "A Time-Domain Processing Framework for Airborne and Vehicle-Borne Microwave Photonic SAR With a Resolution of 0.02 m," in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 63, pp. 1-20, 2025, Art no. 5211420, doi: 10.1109/TGRS.2025.3565299.