# Системы зенитного излучения для обеспечения радиосвязи пилотируемой и беспилотной авиации

**Рубцов Евгений Андреевич**
к.т.н., специалист Научно-образовательного центра воздушного транспорта, Российский университет транспорта, г. Москва, Россия, rubtsov.spb.guga@rambler.ru

АННОТАЦИЯ

**Введение:** обеспечение бесперебойной радиосвязи малой авиации и беспилотных воздушных судов из-за малой высоты полета представляет актуальную задачу. Применение автономных радиоретрансляторов часто экономически нецелесообразно. Решить проблему предлагается с применением систем зенитного излучения с последующим внедрением программно-определяемого радио и организацией радиоцентров по принципу самоорганизующейся ячеистой сети. **Постановка задачи:** разработка варианта обеспечения бесперебойной связи с пилотируемыми и беспилотными воздушными судами с помощью систем зенитного излучения декаметрового диапазона. **Результаты:** проанализированы проблемы обеспечения радиосвязи, на примере Санкт-Петербургского центра обслуживания воздушного движения показал, что для малых высот полета применение автономных радиоретрансляторов нецелесообразно. Показано, что для перекрытия зоной действия Финского залива при высоте полета 300 м потребуется две новых позиции: Курголово и Приморск. Предлагается решить задачу штатными радиосредствами декаметрового диапазона, при внедрении антенн зенитного излучения. Получено, что на удалениях 50…150 км от антенны напряженность поля в точке приема составит 202,7…608,1 мкВ/м при отражении от слоя *E* и 86,8…260 мкВ/м при отражении от слоя $F_2$, что достаточно для обеспечения аналоговой и цифровой радиосвязи. Предлагается внедрить технологию программно-определяемого радио и организовать радиоцентры по принципу самоорганизующейся ячеистой сети. Разработана схема такой сети для филиала «Аэронавигация Севера Сибири», предлагается размещать радиоцентры на позициях многопозиционной системы наблюдения для снижения затраты на внедрение объектов связи. **Практическая значимость:** предлагаемые системы позволят при небольших затратах обеспечить бесперебойную связь для пилотируемых и беспилотных воздушных судов, выполняющих полет на малой высоте, в горной и холмистой местности, в удаленных и океанических районах. **Обсуждение:** системы зенитного излучения позволят создать сплошное радиосвязное поле без «мертвых зон», объединенные в ячеистую сеть, они могут быстро адаптироваться к условиям распространения радиосигнала, что повысит надежность и бесперебойность радиосвязи.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: авиационная электросвязь; антенны зенитного излучения; программно-определяемое радио; декаметровая радиосвязь; mesh-сети.

**Введение**

Развитие аэронавигационной системы России не представляется возможным без мероприятий по модернизации авиационной электросвязи и передачи данных. Для достижения требуемой безопасности полетов необходима непрерывная и надежная радиосвязь пилотируемых и беспилотных воздушных судов (БВС) с наземными центрами обслуживания воздушного движения (ОВД) и станциями внешнего пилота. В настоящее время основным средством подвижной радиосвязи являются средства очень высокой частоты (ОВЧ). Недостатком этих средств является ограниченная зона действия, особенно при полетах на сравнительно небольших высотах (сотни метров), что характерно для малой авиации и БВС. Потеря связи классифицируется как особый случай в полете. Радиосвязь с ВС считается потерянной, в случае невозможности осуществления радиообмена на время более пяти минут.

Для устранения или уменьшения разрывов в радиосвязном поле ОВЧ-диапазона традиционно применяют автономные радиоретрансляторы (АРТР), контролируемые удаленно и способные функционировать без централизованных сетей электропитания. АРТР позволяет расширить зону действия средств связи ОВЧ-диапазона, однако для обеспечения бесперебойной радиосвязи при полетах на малых высотах потребуется внедрение большого количества позиций, что экономически целесообразно.

В статье рассматривается вариант решения проблемы обеспечения бесперебойной связи с воздушными судами малой авиации и БВС с применением систем зенитного излучения декаметрового диапазона (near vertical incidence skywave, NVIS).

**Проблемы обеспечения радиосвязи малой и беспилотной авиации**

В России и мире бурное развитие получили беспилотные авиационные системы (БАС), применяемые для решения широкого круга задач от перевозки грузов до патрулирования границ. В ближайшем будущем БВС будут выполнять полеты в едином воздушном пространстве, что приведет к росту числа участников воздушного движения и возрастанию роли систем обеспечения полетов, в частности систем авиационной электросвязи [1-4]. Также стоит отметить, что для нашей страны прогнозируется повышение интереса к малой авиации для выполнения различных задач: перевозка пассажиров в удаленные населенные пункты, туристические полеты, ведение мониторинга лесов и рек, выполнения аэрофотосъемки и другие. Характерной особенностью ВС малой авиации и БВС является выполнение полета преимущественно на малых высотах, порядка 300…600 м.

В настоящее время основным средством взаимодействия диспетчера и экипажа ВС являются радиостанции ОВЧ-диапазона (для обеспечения связи с БВС также применяют линии диапазонов УВЧ и СВЧ) [5].

Радиосвязь должна обладать требуемой надежностью и бесперебойностью (потеря связи более чем на пять минут классифицируется как особый случай в полете). Для обеспечения требуемой надежности и бесперебойности радиосвязи ОВЧ-диапазона применяют АРТР, которые позволяют уменьшить или устранить разрывы в радиосвязном поле. Однако, для ВС малой авиации и БВС применение АРТР может быть экономически не целесообразно, в связи с малой высотой полета.

Рассмотрим в качестве примера Санкт-Петербургский районный центр (РЦ) ОВД. Обслуживание на трассах Санкт-Петербургского центра обеспечивается районным центром Единой системы организации воздушного движения (ЕС ОрВД). Зона ответственности

Санкт-Петербургского РЦ подразделяется на 7 секторов ОВД, один из которых предназначен для обслуживания вне трасс. При полетах ниже нижнего эшелона ОВД осуществляется диспетчерами МДП, при этом воздушное пространство разделено на 2 сектора.

Для обеспечения надежной и бесперебойной радиосвязи в зоне местного диспетчерского пункта (МДП), в Санкт-Петербургском центре ОВД применены АРТР, которые размещены на 9 позициях, показанных на рис. 1). Эти АРТР оснащены радиостанциями «Фазан-Р2» и/или «Фазан-19Р50», антеннами АНК 100-150, а также мультиплексорами и аппаратурой управления удаленными радиостанциями «Тангента +».

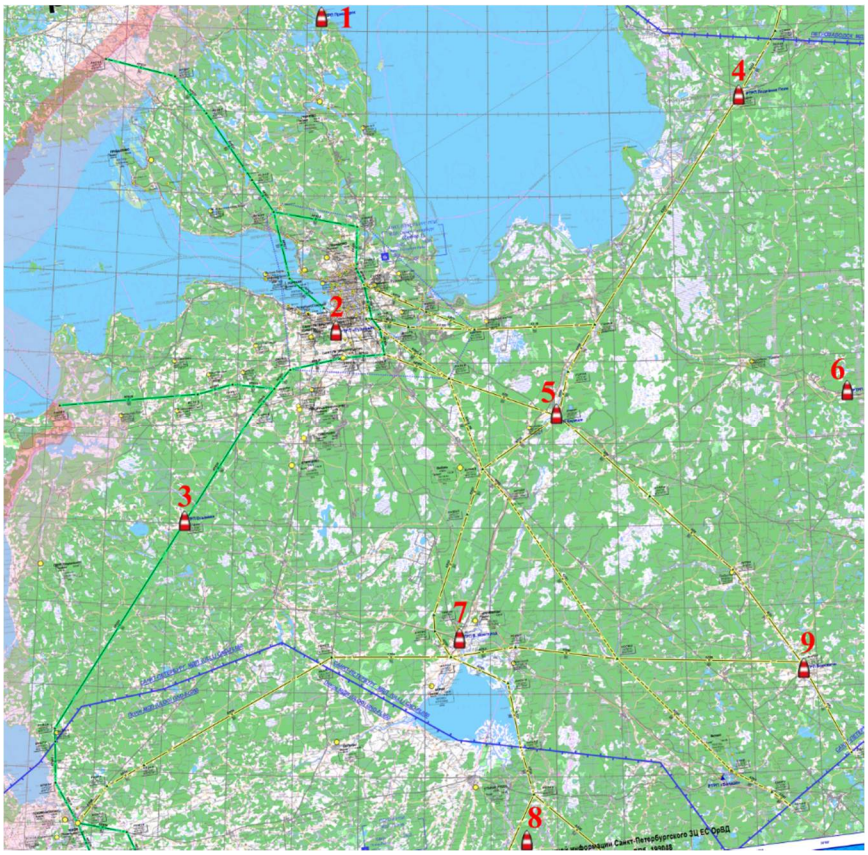



**Рис. 1.** Расположение АРТР в Санкт-Петербургском центре ОВД, позиции:
1– Приозерск; 2 – Пулково; 3 – Осьмино; 4 – Лодейное поле; 5 – Кириши; 6 – Чудцы; 7 – Великий Новгород; 8 – Залучье; 9 – Боровичи

Проведем оценку степени перекрытия воздушного пространства зонами действия АРТР для высот полета 300 и 600 м. Для учета влияния закрытий и параметров атмосферы воспользуемся выражением [6]:

$$D = \sqrt{\left(\frac{2a \cdot tg\beta}{2}\right)^2 + 16,9 \cdot (H + h)} - \frac{2a \cdot tg\beta}{2}, \quad (1)$$

где $D$ — дальность действия АРТР с учетом закрытий, км;

$\beta$ — угол закрытия, град.;

$H$ — высота полета ВС, м;

$h$ — высота подъема антенны АРТР, м;

*a* — эквивалентный радиус Земли, км (для стандартной атмосферы принимается 8450 км).

Поскольку график углов закрытия не входит в состав документации объекта АРТР, углы закрытия были определены с применением цифровой модели рельефа SRTM по методике, описанной в [6]. Для каждого АРТР получены графики углов закрытия и, с применением выражения (1), рассчитаны зоны действия, при этом особое внимание уделялось району Финского залива, так как потеря радиосвязи над водными пространствами может привести к опасным инцидентам и катастрофам. Оценка перекрытия контролируемого воздушного пространства Санкт-Петербургского центра ОВД объединенной зоной действия АРТР для высот полета 300 и 600 м приведена на рис. 2а и рис. 2б.

а б

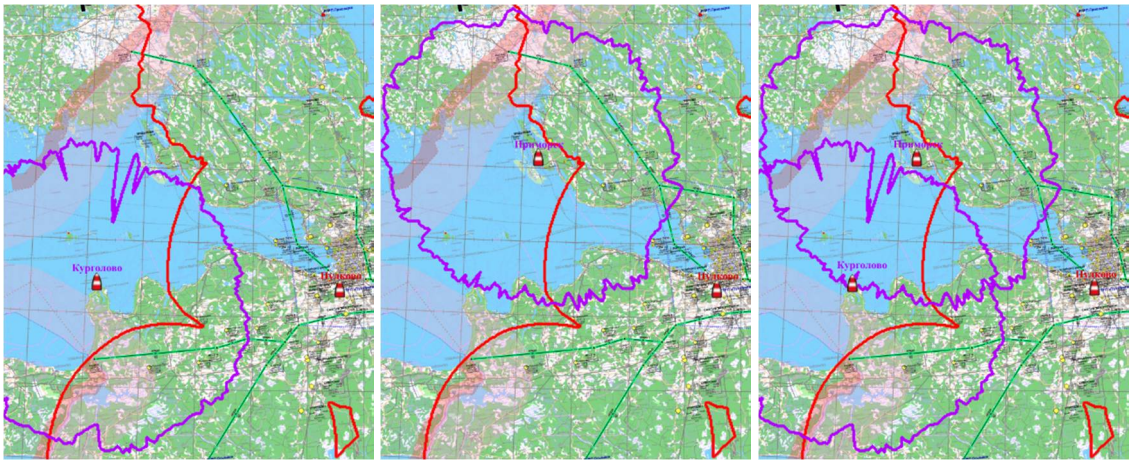
**Рис. 2.** Оценка перекрытия контролируемого воздушного пространства Санкт-Петербургского центра ОВД объединенной зоной действия АРТР для высот полета: а – 300 м; б – 600 м

Анализ перекрытия воздушного пространства радиосвязным полем для высоты полета 300 м (рис. 2а) показал, что практически весь Финский залив, западная часть и северо-западная часть побережья относятся к зоне отсутствия уверенного приема. Анализ перекрытия радиосвязным полем ОВЧ-диапазона для высоты полета 600 м (рис. 2б) показал, что зоной отсутствия уверенного приема, является большая часть Финского залива. Для высот полета более 600 м уверенный прием будет наблюдаться практически над всей акваторией Финского залива, ухудшение радиосвязи возможно в районе государственной границы.

Согласно выписке из журнала дежурств диспетчера МДП Санкт-Петербургского центра ОВД, основная часть полетов малой авиации выполняется на высоте порядка 300 м. Это приводит к тому, что экипажи часть времени полета не находятся под контролем диспетчера МДП и вынуждены при потере радиосвязи передавать сообщения через другой борт, что приводит к увеличению загрузки пилота и диспетчера и ухудшению безопасности полетов.

Традиционное решение задачи увеличения перекрытия региона радиосвязным полем заключается во внедрении новых позиций АРТР. Для рассмотренного примера возможно размещение ретрансляторов в Курголово (координаты позиции: 59°46′19″ с.ш., 28°07′49″ в.д.) и Приморске (координаты позиции: 60°22′00″ с.ш., 28°37′00″ в.д.).

Оценка перекрытия контролируемого воздушного пространства Санкт-Петербургского центра ОВД объединенной зоной действия АРТР с учетом внедрения новых позиций для высоты полета 300 м приведена на рис. 3а, рис. 3б и рис. 3в.




а б в

**Рис. 3.** Оценка перекрытия контролируемого воздушного пространства Санкт-Петербургского центра ОВД объединенной зоной действия АРТР для высоты полета 300 м с учетом внедрения новых позиций: а – Курголово; б – Приморск; в – Курголово и Приморск

Установка одного ретранслятора в Курголово (рис. 3а) или Приморске (рис. 3б) позволяет обеспечить частичное перекрытие Финского залива, поэтому для создания сплошного радиосвязного поля требуется внедрить два АРТР (рис. 3в). Это решение потребует закупки двойного комплекта оборудования, прокладки или аренды линий передачи данных, а также проведения периодического обслуживания удаленных объектов. Данную задачу возможно решить с применением перспективных систем радиосвязи декаметрового диапазона NVIS.

**Системы зенитного излучения декаметрового диапазона**

Международная организация гражданской авиации рекомендует примененять цифровую радиосвязь высокой частоты HFDL (high frequency data link) для обеспечения полетов в полярных районах, а также в удаленных континентальных и океанических районах, не перекрытых радиосвязным полем ОВЧ-диапазона [7].

HFDL реализует систему пакетной передачи данных «борт-Земля» при взаимодействии наземных диспетчерских служб с экипажами ВС, находящихся на дальних авиатрассах. Традиционно применяются системы ВЧ-диапазона, обладающие средней (порядка 1000 км) и большой (порядка 1000…3000 км) дальностью действия, что обуславливает использование мощных передатчиков, а также слабонаправленных и направленных антенн типа ВГД, ВГД-Ш, РГД, ЛПА и других [8]. Особенностью данных систем является наличие зон молчания («мертвых зон») [9] на определенном расстоянии от передающей антенны, что проявляется прежде всего при организации связи с объектами, находящимися на сравнительно небольшом удалении (сотни километров) от радиоцентра. Для устранения зон молчания («мертвых зон») возможно применение систем зенитного излучения декаметрового диапазона NVIS.

Системы NVIS работают по принципу излучения пространственных радиоволн под углами близкими к зениту, при этом отраженные от ионосферы радиоволны падают почти вертикально вниз, испытывая минимальные поглощения в слое *D* и создавая значительную напряженность поля на сравнительно небольших расстояниях (десятки - сотни километров) от передатчика, что позволяет применять на пилотируемых и беспилотных воздушных судах антенны с низким коэффициентом направленного действия (КНД). При этом работа как в

канале «Земля-борт», так и «борт-Земля» может вестись при сравнительно малой мощности передающего оборудования. Системы зенитного излучения могут обеспечивать радиосвязь в горной местности и для объектов, выполняющих полет на малых высотах. Применяемые антенны достаточно просты конструктивно, отличаются малыми габаритами и небольшой высотой подвеса, а их характеристики направленности практически не зависят от рельефа и свойств подстилающей поверхности. Из недостатков можно выделить сильную подверженность помехам (особенно сильно проявляется в городской среде), а также необходимость применения достаточно низких радиочастот (как правило 2…13 МГц).

В последние годы интерес к системам зенитного излучения возрос [10, 11], проводятся исследования возможного применения данной технологии для организации аварийной связи в регионах, а также для обеспечения связи с беспилотными воздушными судами [12-14].

В системах NVIS применяются антенны зенитного излучения, которые должны обладать требуемой диапазонностью и иметь достаточно высокий КНД в вертикальном направлении. В качестве антенн зенитного излучения (АЗИ) могут применяться дипольные, П-образные, штыревые, горизонтальные симметричные вибраторы различных модификаций, магнитные антенны рамочного типа и др. [15]. При организации мобильных пунктов связи, а также для возможности ведения радиообмена с ВС из автомобиля, к АЗИ добавляются требования компактности, а также ограничения по массе.

В России АЗИ производятся в АО «Российский институт мощного радиостроения», ООО «Уранис», ООО «Радиал», и др. [16-18]. Также можно выделить малогабаритные АЗИ серии «МРВ», производимые в стационарном и мобильном вариантах [19].

Рассмотрим задачу обеспечения радиосвязи с воздушными судами малой авиации и БВС над акваторией Финского залива с применением систем зенитного излучения, для чего оценим основные характеристики (углы излучения и напряженность поля) для обеспечения связи на расстоянии 50, 100 и 150 км от радиоцентра, расположенного в Пулково (рис. 4).

**Рис. 4.** Оценка перекрытия воздушного пространства Санкт-Петербургского центра ОВД зоной действия системы зенитного излучения, расположенной в Пулково

Для определения зоны действия радиосредств ВЧ-диапазона, необходимо учитывать угол места максимального излучения в вертикальной плоскости, ширину диаграммы направленности антенны в вертикальной плоскости, а также высоту отражающего слоя

ионосферы. Как правило, отражение радиоволн происходит от слоя $E$ (для более низких частот) и $F_2$ (для более высоких частот). Высота данных слоев ионосферы меняется в течение суток, а также в зависимости от сезона года и уровня солнечной активности. В среднем, можно принять высоту слоя $E$ – 105 км, высоту слоя $F_2$ – 320 км. Тогда, для обеспечения радиосвязи на удалениях 50…150 км от передающей антенны, ее угол излучения должен составлять 50…80° и 75…85° при однократном отражении от слоев $E$ и $F_2$ соответственно. Следует отметить, что расчет напряженности поля декаметровой радиосвязи является сложной задачей. Для инженерной оценки напряженности поля в точке приема $Em$ воспользуемся методом А.Н. Казанцева [20, 21]:

$$Em = 0{,}5 \cdot \frac{173\sqrt{P_1 \cdot D_1}}{r} \cdot \frac{1+R}{2} \cdot e^{-\Gamma}, \tag{2}$$

где $Em$ — напряженность поля в точке приема, В/м;

$P_1$ — излучаемая мощность, кВт;

$D_1$ — КНД передающей антенны;

$r$ — расстояние между передающей и приемной антенной, км;

$R$ — коэффициент отражения радиоволны;

$e^{-\Gamma}$ — коэффициент, учитывающий поглощение в ионосфере, при этом полный коэффициент поглощения $\Gamma$ находится как:

$$\Gamma = \frac{3 \cdot f_0^2}{\left(f_r + f_L\right)^2 \cdot \cos\varphi_D} + \frac{2{,}5 \cdot f_0^2}{\left(f_r + f_L\right)^2 \cdot \cos\varphi_E} + \frac{0{,}4 \cdot f_0^2}{\left(f_r + f_L\right)^2 \cdot \cos\varphi_{F_1}} + 0{,}02 \cdot f_r^2 \cdot \cos^3(\varphi_{F_2}), \tag{3}$$

где $f_0$ — критическая частота отражающего слоя, МГц;

$f_r$ — частота радиоволны, МГц;

$f_L$ — продольная составляющая гиромагнитной частоты (принимается равной 1 МГц);

$\varphi_D$, $\varphi_E$, $\varphi_{F1}$, $\varphi_{F2}$,— угол падения радиоволны на границу слоя $D$, $E$, $F_1$и $F_2$ соответственно, град.

Коэффициент 0,5 в выражении (2) показывает уменьшение мощность на 6 дБ, что связано с изменением вида поляризации радиоволны при отражении от ионосферы и ее расщеплением на обыкновенную и необыкновенную. При отражении радиоволн от слоя $F_2$ выражение (3) рассчитывается полностью, при отражении от слоя $E$ – опускаются последние два члена.

Выполним расчет для удалений между радиоцентром и воздушным судном $r$ равным 50, 100 и 150 км, и следующих исходных данных: излучаемая мощность $P_1$ = 0,1 кВт, КНД передающей антенны $D_1$ = 10, коэффициент отражения радиоволны $R$ = 0,8. Расчет будем вести для случаев отражения радиоволн от слоя $E$ (рабочую частоту $f_r$ примем 3 МГц) и от слоя $F_2$ (рабочую частоту $f_r$ примем 7 МГц). Результаты расчетов, выполненных с применением выражений (2) и (3) представлены в табл. 1.

*Таблица 1*

Оценка напряженности поля в точке приема для системы зенитного излучения

| Расстояние между радиоцентром и воздушным судном $r$, км | Напряженность поля в точке приема, мкВ/м | |
|---|---|---|
| | при отражении от слоя $E$ | при отражении от слоя $F_2$ |
| 50 | 608,1 | 260,0 |
| 100 | 304,0 | 130,0 |
| 150 | 202,7 | 86,8 |

Полученные в табл. 1 значения напряженности поля являются приемлемыми для систем декаметровой радиосвязи (аналоговой и цифровой), что позволяет организовать бесперебойную радиосвязь на требуемых удалениях, в том числе над акваторией Финского залива.

Для организации радиосвязи с применением АЗИ могут использоваться штатное оборудование, например, радиосредства серии «Пирс», производства АО «РИМР». Однако перспективным направлением является применение технологии программно-определяемого радио (software defined radio, SDR) [22, 23]. Важным отличием системы передачи данных, построенной с применением SDR является возможность регулирования скорости поступления информации от источника в зависимости от пропускной способности канала связи и состояния среды распространения. Данные системы имеют архитектуру, позволяющую реализовывать модуляторы-демодуляторы с различными видами модуляции, скоростями передачи и полосами частот путем обновления программного обеспечения, что не требует постоянного пересмотра аппаратной части. При этом появляются возможности: анализа помеховой обстановки, измерения и прогноза основных характеристик радиотрассы, выбора оптимального метода модуляции в зависимости от состояния радиотрассы.

Протоколы нового поколения для передачи данных строятся согласно модели OSI (Open System Interconnection) Международной организации по стандартизации. Однако, сложившиеся принципы построения систем радиосвязи ВЧ-диапазона входят в противоречия с существующими стандартами по передаче данных. При использовании модемов с унифицированными протоколами, стыковка их с каналообразующей аппаратурой декаметровой радиосвязи становится препятствием для дальнейшего повышения качества и скорости передачи данных. Сложившаяся ситуация привела к необходимости изменения способа взаимодействия системы радиосвязи и оконечного оборудования данных, что опять же приводит к необходимости внедрения SDR при реализации систем зенитного излучения [24, 25].

Системы радиосвязи ВЧ-диапазона, построенные по принципу программно-определяемого радио позволяют обеспечить регулируемую протоколом задержку информации в радиоканале для повышения помехозащищенности, обеспечения минимальной вероятности ошибки и реализации различных процедур ведения связи. Для реализации преимуществ SDR, необходим новый подход к выбору видов радиосигналов, адаптируемых к радиолинии. В настоящее время наиболее распространены линии с частотной адаптацией, а также с параметрической адаптацией, в которых помимо рабочей частоты регулируются и другие параметры системы: скорость передачи данных, избыточность помехоустойчивого кодирования, виды используемого сигнала, типы антенн и другие.

**Радиосети на основе систем зенитного излучения**

Системы NVIS целесообразно применять как основу для сетей цифровой радиосвязи HFDL. Это позволит производить обмен формализованными сообщениями между диспетчером и экипажем, то есть реализовать технологию CPDLC (controller pilot data link communications). При этом важно внедрить программно-определяемые радиосистемы, что даст возможность гибко проводить модернизацию оборудования путем обновления программного обеспечения, без дорогостоящих доработок аппаратной части для введения новых сигнально-кодовых конструкций, режимов работы и дополнительных интерфейсов.

Вариантом построения системы авиационной подвижной цифровой декаметровой радиосвязи, может являться технология самоорганизующихся ячеистых сетей (mesh-сети). Та-

кая технология является перспективной, с точки зрения создания зон информационного покрытия больших территорий, масштабируемости, живучести сети, устойчивости к потере отдельных элементов. Особенностью mesh-сетей является отсутствие единого центра управления, поэтому такие сети не требуют дополнительной инфраструктуры (только сами узлы). Управление в ячеистых сетях децентрализовано, при этом обеспечивается контроль узлов, сбор и хранение информации о состоянии линий и каналов, принимаются решения об изменении топологии сети в зависимости от ее состояния. При включении нового узла происходит его автоматическая настройка в сети. В mesh-сетях применяются проактивные протоколы маршрутизации, при этом периодически рассылается служебные сообщения, на основании которых каждый узел строит маршруты к остальным узлам, сохраняя изменения в таблице маршрутизации.

Рассмотрим возможность создания системы перспективных связных сервисов на базе многопозиционных систем. В настоящее время инфраструктура средств наблюдения в РФ в подавляющем большинстве потребует ремонта, модернизации, реконструкции, продления ресурса. При этом, внедрение многопозиционных систем наблюдения (МПСН) требует меньше капитальных затрат по сравнению с развертыванием традиционных радиолокационных средств наблюдения. При внедрении МПСН, в целях обеспечения гибкости и снижения затрат на обеспечивающие мероприятия, рассматривается возможность привязки приемных станций МПСН к сетям связи по беспроводным каналам передачи данных. Для резервирования каналов связи позиций МПСН возможно развертывание радиосети ВЧ-диапазона с использованием малогабаритных SDR–трансиверов и антенн зенитного излучения для обеспечения связи в зоне до 500 км. Данную радиосеть предлагается строить по технологии mesh-сети, что даст возможность динамично адаптироваться к изменяющимся условиям распространения радиосигнала. Ретрансляция сообщений в самоорганизующейся ячеистой сети ВЧ-диапазона представлена на рис. 5. Пример схемы mesh-сети на базе систем зенитного излучения для филиала «Аэронавигация Севера Сибири» представлен на рис. 6.

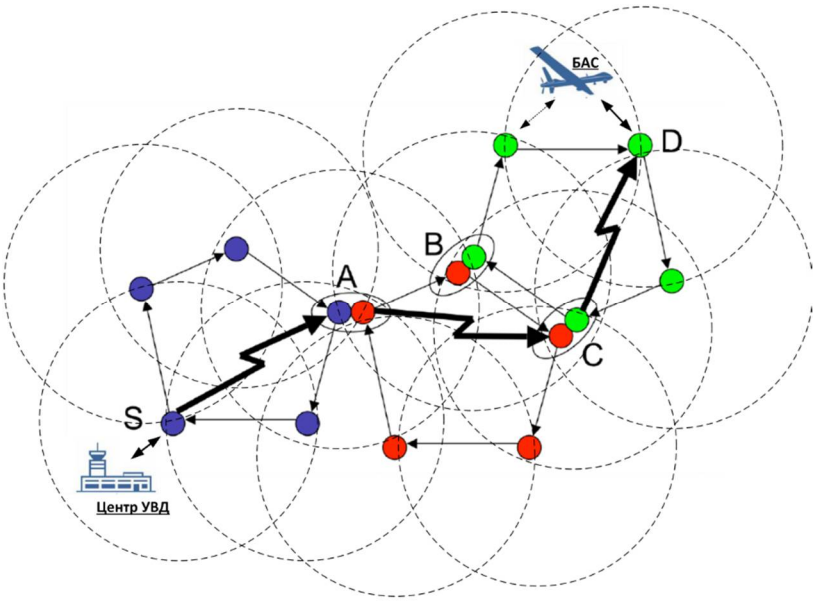



**Рис. 5.** Ретрансляция HFDL сообщений в самоорганизующейся ячеистой сети ВЧ-диапазона

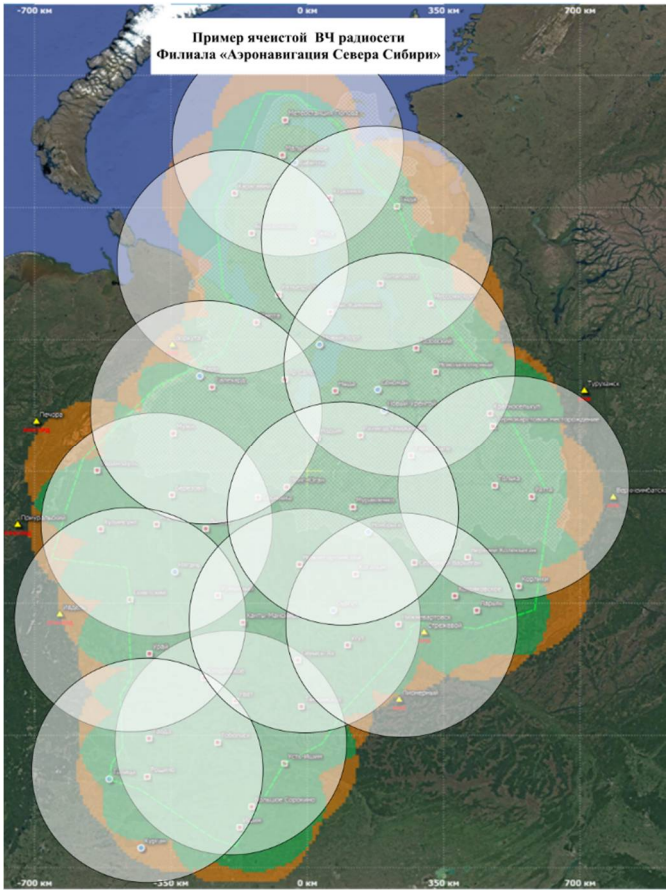



**Рис. 6.** Пример схемы mesh-сети ВЧ-диапазона для филиала «Аэронавигация Севера Сибири»

Сформулируем основные пути развития систем радиосвязи ВЧ-диапазона:

1) применение АЗИ обеспечит радиосвязь с пилотируемыми и беспилотными ВС на удалениях до 500 км от радиоцентра (при этом «мертвые зоны» будут отсутствовать);

2) применение SDR позволит модернизировать оборудование путем обновления программного обеспечения (для введения новых сигнально-кодовых конструкций и режимов работы), а также использовать модемы с унифицированными протоколами.

3) внедрение mesh-сетей позволит адаптироваться к изменяющимся условиям распространения и повышения надежности и бесперебойности радиосвязи; при этом радиоцентры могут располагаться на позициях МПСН, что снизит затраты на создание объектов связи.

## Заключение

Полеты БВС и воздушных судов малой авиации, как правило, выполняются на сравнительно малых высотах, что приводит к перебоям в связи ОВЧ-диапазона. Решение этой проблемы путем внедрения АРТР требует больших материальных затрат на внедрение и последующее обслуживание оборудования. В статье предлагается более эффективное и менее затратное решение: внедрение систем зенитного излучения NVIS. Произведен расчет требуемых углов излучения и оценена напряженность поля в точке приема на примере решения задачи обеспечения радиосвязи над акваторией Финского залива.

Предлагается усовершенствование объектов декаметровой радиосвязи путем внедрения антенн зенитного излучения, систем программно-определяемого радио, построения сети авиационной цифровой радиосвязи по технологии mesh-сетей. Система зенитного излучения будет особенно эффективна при обеспечении полетов пилотируемой и беспилотной авиации в высоких широтах, где нецелесообразно внедрение большого количества АРТР, а самоорганизующаяся ячеистая сеть позволит быстро адаптироваться к изменяющимся условиям распространения, что повысит надежность и бесперебойность радиосвязи, и, как следствие, безопасность полетов в целом.

**Литература**

1. *Merz M. et al.* Autonomous UAS-Based Agriculture Applications: General Overview and Relevant European Case Studies //Drones, 2022. V.6 (5). N.128. Pp. 1-21.

2. *Konert A., Kasprzyk P.* Drones Are Flying outside of Segregated Airspace in Poland. J Intell Robot Syst. N.100, 2020. Pp. 483–491. doi:10.1007/s10846-019-01145-4.

3. *Kotlinski M., Calkowska J.K.* U-Space and UTM Deployment as an Opportunity for More Complex UAV Operations Including UAV Medical Transport. J Intell Robot Syst. N.106, 2022. doi:10.1007/s10846-022-01681-6.

4. *Кудряков С.А., Книжниченко Н.В,, Рубцов Е.А.* Вопросы обеспечения безопасного использования беспилотных авиационных систем // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации, 2019. № 1(22). С. 72-84.

5. Анализ линий различной протяженности для обеспечения управления, контроля и связи с беспилотными воздушными судами / С.А. Кудряков, Е.А. Рубцов, А.В. Экало, С.А. Беляев // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ, 2019. № 1. С. 31-38.

6. Методика оценки зон действия радиотехнических систем гражданской авиации при выборе позиций их размещения / С.А. Беляев, А.В. Экало, Е.А. Рубцов, С.А. Кудряков // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ, 2018. № 7. С. 7-13.

7. *Parida S., Das S. K.* G2a communication systems: A survey on evolving enabling technologies, technical challenges and research directions //2020 International Conference on Emerging Trends in Information Technology and Engineering (ic-ETITE). IEEE, 2020. Pp. 1-6.

8. *Hervás M., Bergadà P., Alsina-Pagès R. M.* Ionospheric narrowband and wideband HF soundings for communications purposes: A review //Sensors, 2020. V.20. N.9. Pp. 2486.

9. Wave-Optics Analysis of HF Propagation through Traveling Ionospheric Disturbances and Developing Plasma Bubbles / C. S. Carrano, J. M. Retterer, K. M. Groves, G. Crowley, T. M. Duly and D. E. Hunton // 2020 XXXIIIrd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science, 2020. Pp. 1-4. doi:10.23919/URSIGASS49373.2020.9232348.

10.*Witvliet, B.A., Alsina-Pagès, R.M.* Radio communication via Near Vertical Incidence Skywave propagation: an overview. Telecommun Syst. N66, 2017. Pp. 295–309. doi:10.1007/s11235-017-0287-2.

11.Радиотехническое обеспечение полетов воздушных судов на местных воздушных линиях Республики Саха (Якутия) / К. Н. Матюхин, В. Э. Ермаков, Е. А. Круглов, В. Н. Лейбенков // Проблемы повышения эффективности научной работы в оборонно-промышленном комплексе России: Материалы V Всероссийской научно-практической конференции, 2022. С. 42-47. doi:10.54398/9785992613728_42.

12.Heterogeneous wireless IoT architecture for natural disaster monitorization / Porté Jiménez J., Briones Delgado A., Masó Llinàs J. M., Parés Morlans C., Zaballos Diego A., Pijoan Vidal J. L.. // J Wireless Com Network 2020. N.184, 2020. Pp. 1-27. doi:10.1186/s13638-020-01793-3.

13.A Novel Approach of Semi-blind Frequency Selection for HF Regional Emergency Maneuver Communication / Mo D. H., Li G. J., Xu X. F., Tan L., Xing Y. K. // International Conference on Machine Learning and Intelligent Communications. Springer, Cham, 2018. Pp. 253-262. doi:10.1007/978-3-030-00557-3_26.

14.SC-FDE layer for sensor networks in remote areas using NVIS communications / Gonzalez T., Porte J., Male J., Navarro J., Maso J. M., Zaballos A., .Badia D. // Electronics, 2021. V.10. N.14. Pp. 1-16. doi:10.3390/electronics10141636.

15.*Адамов Д.С., Селиванова В.В.* Антенны зенитного излучения как средство обеспечения безопасности полетов воздушных судов местных воздушных линий // Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации: Сборник трудов IX Международной научно-практической конференции.Иркутск, 2020. С. 117-122.

16.Приемо-передающая антенна КВ диапазона квазизенитного излучения для ближней связи // АО «Российский институт мощного радиостроения». URL: https://www.rimr.ru/catalog/rzhd/antenny-kv-diapazona-kvazizenitnogo-izlucheniya-dlya-blizhney-svyazi (дата обращения 10.09.2022).

17.HLA-125 и HLA-6125: магнитные полурамочные антенны // ООО «Уранис». URL: https://uranis.pro/userfiles/File/Catalogs/ilovepdf-merged-9.pdf (дата обращения 10.09.2022).

18.Антенна коротковолновая DKW-2468 // ООО «Радиал». URL: https://www.radial.ru/catalog/antennas/dipole/dkw-2468 (дата обращения 10.09.2022).

19.Малогабаритные КВ антенны МРВ // Малогабаритные коротковолновые антенно-фидерные устройства серии «МРВ». URL: https://mrv1-9.ru/product.php (дата обращения 10.09.2022).

20.*Бакурский К.В., Сёмин С.Ю., Никитин Р.Г.* Требования к бортовой антенне декаметрового диапазона // СПбНТОРЭС: труды ежегодной НТК, 2020. №. 1. С. 3-6.

21.*Чернов Ю.А.* Специальные вопросы распространения радиоволн в сетях связи и радиовещания. М.: Техносфера, 2018. 688 с.

22.*Gummineni M., Polipalli T.R.* Implementation of Low Cost SDR in HF Band for Emergency Application // Research Square, 2020. Pp. 1-15. doi:10.21203/rs.3.rs-82169/v1.

23.Low cost development of HF receiver prototype for HF-START field campaign / Hozumi K., Kondo T., Saito S., Nakata H., Maruyama T., Tsugawa T., Ishii M. // 2018 2nd URSI Atlantic Radio Science Meeting (AT-RASC). IEEE, 2018. Pp. 1-4. doi:10.23919/URSI-AT-RASC.2018.8471477.

24.*Porte J., Maso J., Pijoan J.L., Badia D.* Design, implementation and test of an SDR for NVIS communications. Int J Circ Theor Appl., 2019. N.47. Pp. 1502–1512. DOI: 10.1002/cta.2670.

25.Internet of things communications for remote sensors in Antarctica using NVIS / Maso J.M., Porte J., Pijoan J. L., Badia D. // Communications, 2019. V. 3. Pp. 1-10. doi:10.1029/2019RS006920.

# NEAR VERTICAL INCIDENCE SKYWAVE SYSTEMS PROVIDING RADIO COMMUNICATIONS FOR MANNED AND UNMANNED AIRCRAFT

**EVGENY A. RUBTSOV**
PhD, specialist of the Scientific and educational air transport center, Russian university of transport
Moscow, Russia, rubtsov.spb.guga@rambler.ru

**ABSTRACT**

**Introduction:** Ensuring uninterrupted radio communication of small aircraft and unmanned aircraft due to low flight altitude is an urgent task. The use of autonomous radio repeaters is often not economically feasible. Proposed to solve the problem with the use of near vertical incidence skywave systems with the subsequent introduction of software-defined radio and the organization of radio centers on the principle of a self-organizing mesh network. **Problem statement:** Development of an option to ensure uninterrupted communication with manned and unmanned aircraft by decameter near vertical incidence skywave systems. **Results:** analyzed problems of providing radio communications, using the example of the St. Petersburg Air Traffic Service Center, showed that for low flight altitudes the use of autonomous radio repeaters is inappropriate. Shown that in order to cover the Gulf of Finland with a flight altitude of 300 m, two new positions are required: Kurgolovo and Primorsk. Proposed to solve the problem by standard decameter radio equipment, with the introduction of near vertical incidence skywave antennas. It was found that at distances of 50...150 km from the antenna, the field strength at the receiving point will be 202.7...608.1 μV/m when reflected from the *E* layer and 86.8...260 μV/m when reflected from the $F_2$ layer, which is sufficient for provision of analog and digital radio communications. Proposed to introduce software-defined radio technology and organize radio centers on the principle of a self-organizing mesh network. A scheme of such network developed for the Air Navigation of the North of Siberia branch, proposed to place radio centers at the positions of a multilateration surveillance system to reduce the cost of introducing communication objects. **Practical significance:** the proposed systems will allow, at low cost, to provide uninterrupted communications for manned and unmanned aircraft flying at low altitude, in mountainous and hilly areas, in remote and oceanic areas.. **Discussion:** near vertical incidence skywave systems will provide a continuous radio communication field without "skip zones", integrated into a mesh network, they can quickly adapt to the conditions of radio signal propagation, which will increase the reliability and uninterrupted radio communication.

**Keywords:** aeronautical telecommunications; near vertical incidence skywave antennas; software defined radio; high frequency communication; mesh networks.

**REFERENCES**


1. Merz M. et al. Autonomous UAS-Based Agriculture Applications: General Overview and Relevant European Case Studies //Drones, 2022. V.6 (5). N.128. Pp. 1-21.
2. Konert A., Kasprzyk P. Drones Are Flying outside of Segregated Airspace in Poland. J Intell Robot Syst. N.100, 2020. Pp. 483–491. doi:10.1007/s10846-019-01145-4.
3. Kotlinski M., Calkowska J.K. U-Space and UTM Deployment as an Opportunity for More Complex UAV Operations Including UAV Medical Transport. J Intell Robot Syst. N.106, 2022. doi:10.1007/s10846-022-01681-6.
4. Kudryakov S.A., Knizhnichenko N.V., Rubtsov E.A. Voprosy obespechenija bezopasnogo ispol'zovanija bespilotnyh aviacionnyh sistem [Issues of ensuring the safe use of unmanned aircraft systems] // Bulletin of St. Petersburg state university of civil aviation, 2019. N 1(22). Pp. 72-84. (In Rus).
5. Analiz linij razlichnoj protjazhennosti dlja obespechenija upravlenija, kontrolja i svjazi s bespilotnymi vozdushnymi sudami [Analysis of different range data links for command, control and communications with unmanned aircraft] / S. A. Kudryakov, E. A. Rubtsov, A. V. Ekalo, S. A. Belyaev // Izvestiya SPbGETU LETI, 2019. – N.1. – Pp. 31-38. (In Rus).
6. Metodika ocenki zon dejstvija radiotehnicheskih sistem grazhdanskoj aviacii pri vybore pozicij ih razmeshhenija [Methodology for assessing the coverage areas of civil aviation radio systems when choosing positions for their placement] / S. A. Belyaev, A. V. Ekalo, E. A. Rubtsov, S. A. Kudryakov // Izvestiya SPbGETU LETI, 2018. N.7. Pp. 7-13. (In Rus).
7. Parida S., Das S. K. G2a communication systems: A survey on evolving enabling technologies, technical challenges and research directions //2020 International Conference on Emerging Trends in Information Technology and Engineering (ic-ETITE). IEEE, 2020. Pp. 1-6.
8. Hervás M., Bergadà P., Alsina-Pagès R. M. Ionospheric narrowband and wideband HF soundings for communications purposes: A review //Sensors, 2020. V.20. N.9. Pp. 2486.
9. Wave-Optics Analysis of HF Propagation through Traveling Ionospheric Disturbances and Developing Plasma Bubbles / C. S. Carrano, J. M. Retterer, K. M. Groves, G. Crowley, T. M. Duly and D. E. Hunton // 2020 XXXIIIrd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science, 2020. Pp. 1-4. doi:10.23919/URSIGASS49373.2020.9232348.
10. Witvliet, B.A., Alsina-Pagès, R.M. Radio communication via Near Vertical Incidence Skywave propagation: an overview. Telecommun Syst. N66, 2017. Pp. 295–309. doi:10.1007/s11235-017-0287-2.
11. Radiotehnicheskoe obespechenie poletov vozdushnyh sudov na mestnyh vozdushnyh linijah Respubliki Saha (Jakutija) [Radio technical support for aircraft flights on local airlines of the Republic of Sakha (Yakutia)] / K. N. Matjuhin, V. Je. Ermakov, E. A. Kruglov, V. N. Lejbenkov // Problems of increasing the efficiency of scientific work in the military-industrial complex of Russia: Proceedings of the V All-Russian Scientific and Practical Conference, 2022. Pp. 42-47. doi:10.54398/9785992613728_42. (In Rus).
12. Heterogeneous wireless IoT architecture for natural disaster monitorization / Porté Jiménez J., Briones Delgado A., Masó Llinàs J. M., Parés Morlans C., Zaballos Diego A., Pijoan Vidal J. L.. // J Wireless Com Network 2020. N.184, 2020. Pp. 1-27. doi:10.1186/s13638-020-01793-3.
13. A Novel Approach of Semi-blind Frequency Selection for HF Regional Emergency Maneuver Communication / Mo D. H., Li G. J., Xu X. F., Tan L., Xing Y. K. // International Conference on Machine Learning and Intelligent Communications. Springer, Cham, 2018. Pp. 253-262. doi:10.1007/978-3-030-00557-3_26.
14. SC-FDE layer for sensor networks in remote areas using NVIS communications / Gonzalez T., Porte J., Male J., Navarro J., Maso J. M., Zaballos A., .Badia D. // Electronics, 2021. V.10. N.14. Pp. 1-16. doi:10.3390/electronics10141636.
15. Adamov D.S., Selivanova V.V. Antenny zenitnogo izluchenija kak sredstvo obespechenija bezopasnosti poletov vozdushnyh sudov mestnyh vozdushnyh linij [NVIS antennas as a means of ensuring the safety of aircraft flights of local airlines] // Actual problems and prospects for the development of civil aviation: Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference. Irkutsk, 2020. Pp. 117-122. (In Rus).

16. Priemo-peredajushhaja antenna KV diapazona kvazizenitnogo izluchenija dlja blizhnej svjazi [Receiving-transmitting antenna of the HF range of quasi-zenith radiation for short-range communication] // JSC "Russian Institute of Powerful Radio Engineering". URL: https://www.rimr.ru/catalog/rzhd/antenny-kv-diapazona-kvazizenitnogo-izlucheniya-dlya-blizhney-svyazi (date of access10.09.2022). (In Rus).
17. HLA-125 i HLA-6125: magnitnye poluramochnye antenny [HLA-125 and HLA-6125: magnetic semi-loop antennas] // Uranis LLC. URL: https://uranis.pro/userfiles/File/Catalogs/ilovepdf-merged-9.pdf (date of access10.09.2022). (In Rus).
18. Antenna korotkovolnovaja DKW-2468 [Shortwave antenna DKW-2468] // Radial LLC. URL: https://www.radial.ru/catalog/antennas/dipole/dkw-2468 (date of access10.09.2022). (In Rus).
19. Malogabaritnye KV antenny MRV [Small-sized HF antennas MRV] // Small-sized short-wave antenna-feeder devices of the MRV series. URL: https://mrv1-9.ru/product.php (date of access 10.09.2022). (In Rus).
20. Bakurskij K.V., Sjomin S.Ju., Nikitin R.G. Trebovanija k bortovoj antenne dekametrovogo diapazona [Requirements for an onboard decameter antenna] // SPbNTORES: Proceedings of the annual STC, 2020. N. 1. Pp. 3-6. (In Rus).
21. Chernov Ju.A. Special'nye voprosy rasprostranenija radiovoln v setjah svjazi i radioveshhanija [Special Issues of Radio Wave Propagation in Communication and Broadcasting Networks]. Moscow: Technosphere, 2018. 688 p. (In Rus).
22. Gummineni M., Polipalli T.R. Implementation of Low Cost SDR in HF Band for Emergency Application // Research Square, 2020. Pp. 1-15. doi:10.21203/rs.3.rs-82169/v1.
23. Low cost development of HF receiver prototype for HF-START field campaign / Hozumi K., Kondo T., Saito S., Nakata H., Maruyama T., Tsugawa T., Ishii M. // 2018 2nd URSI Atlantic Radio Science Meeting (AT-RASC). IEEE, 2018. Pp. 1-4. doi:10.23919/URSI-AT-RASC.2018.8471477.
24. Porte J., Maso J., Pijoan J.L., Badia D. Design, implementation and test of an SDR for NVIS communications. Int J Circ Theor Appl., 2019. N.47. Pp. 1502–1512. doi:10.1002/cta.2670.
25. Internet of things communications for remote sensors in Antarctica using NVIS / Maso J.M., Porte J., Pijoan J. L., Badia D. // Communications, 2019. V. 3. Pp. 1-10. doi:10.1029/2019RS006920.