

На правах рукописи



Измайлов Алексей Александрович

**ДВУХДИАПАЗОННАЯ ДВУХПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ
АНТЕННАЯ СИСТЕМА АВИАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА
ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

05.12.07 - АНТЕННЫ, СВЧ-УСТРОЙСТВА И ИХ ТЕХНОЛОГИИ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена на кафедре радиофизики, антенн и микроволновой техники Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Гринев Александр Юрьевич

Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук
Калошин Вадим Анатольевич
(ФГБУН ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН)

кандидат физ.-мат. наук, с.н.с.
Лось Валериан Федорович
(АО «Концерн радиостроения «Вега»)

Ведущая организация: АО «НИИП имени В.В. Тихомирова»

Защита диссертации состоится <<24>> декабря 2019 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.03 в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте ma.i.ru и в библиотеке МАИ.

Автореферат разослан <<__>> октября 2019 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.125.03, к.т.н.



А.А. Горбунова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Анализ содержания и рациональных способов эффективного решения основных классов задач радиолокационного землеобзора показал, что на начальном этапе оптимальным является использование аппаратуры наблюдения X-диапазона. В частности, в этом диапазоне достигается наилучшая разрешающая способность по дальности, которая в первую очередь зависит от ширины полосы частот зондирующего сигнала; минимизируются значения дисперсионных искажений в ионосфере, которые являются источником расфокусировки изображения. Радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА), основанные на использовании технологии активных фазированных антенных решеток (АФАР), имеют, при прочих равных условиях, минимальные габаритные размеры и массу; обеспечивается наилучшая точность определения радиальной скорости подвижных объектов и наиболее низкий порог селектирования этих объектов [1].

Тем не менее, при решении задач радиолокационного землеобзора существует обширный сегмент актуальных задач наблюдения в более длинноволновых диапазонах (С/L и УВЧ/ОВЧ) частот. Проникающая способность радиолокационного сигнала, возрастая по мере увеличения длины волны, позволяет в этих диапазонах выявлять и дешифровать объекты различного назначения под маскирующими их покровами и в подповерхностном слое Земли.

Антенные системы (АС) играют существенную роль в радиолокаторах с синтезированной апертурой. Как в авиационных, так и в космических радиолокаторах одним из важных параметров является высота профиля АС. В авиационной технике это важно для сохранения аэродинамики носителя, в космической технике – для компактного размещения внутри обтекателя при выводе космического аппарата на орбиту. Создание совмещенных АС с двумя и более диапазонами в единой апертуре является перспективным направлением развития функциональных возможностей РСА.

Вопросы совмещения антенных систем рассматривались рядом организаций (например, АО «НИИП имени В.В. Тихомирова» [2], АО «Концерн радиостроения «Вега» [3]) и авторами, в частности, Пономаревым Л.И. [4], D.M. Pozar, S.D. Targonski, С. Х. Мао, F. Qin и др. Новый этап исследований совмещенных АС вызван существенным прорывом вычислительных методов и средств, развитием элементной базы и технологий, усилением технических требований промышленности к характеристикам совмещенных АС, а также поиском новых технических решений.

В тоже время недостаточно исследованы вопросы, связанные с развитием принципов построения и техническими решениями совмещения АС X/C/L и УВЧ/ОВЧ диапазонов частот: внедрением частотно-селективных структур (ЧСС); реализацией совмещенных разреженных АС с подавлением дифракционных лепестков и высоким значением коэффициента усиления (КУ); выявлением особенностей использования искусственных магнитных структур (artificial magnetic conductor – АМС) для реализации низкосилуэтных АС; выявлением особенностей взаимного влияния антенных решеток (АР) различных диапазонов на основе строгих электродинамических моделей; моделированием всей системы численными методами с последующей оптимизацией; обоснованием преимуществ технических решений с внедрением ЧСС в конкретные практические разработки совмещенных АС в комплексы авиационного мониторинга земной поверхности.

Объект и предмет диссертационного исследования

Объект исследования – бортовые антенные системы авиационного мониторинга земной поверхности.

Предмет исследования – двухдиапазонные двухполяризационные АС, совмещённые на одной апертуре, на основе ЧСС со свойствами частично-отражающей поверхности (ЧОП) и АМС.

Цель работы. Реализация низкой высоты профиля и высокого значения КУ, совмещённых на одной апертуре АС С/Х- и ОВЧ/УВЧ-диапазонов, на основе ЧСС со свойствами частично-отражающей поверхности и искусственного магнитного проводника.

Для достижения поставленной в диссертационной работе цели решены следующие **основные задачи:**

1. Проведен анализ принципов построения и технических решений совмещения на одном полотне обоснованной композиции АС ОВЧ-, УВЧ-, С- и Х-диапазонов.

2. Развита принцип построения и функционирования совмещённой на одном полотне АС С/Х-диапазонов, используя ЧСС со свойствами ЧОП.

3. Рассмотрены антенные решётки на основе ЧСС со свойствами ЧОП, позволяющие получить высокие значения КУ и реализовать разреженные АР с подавлением дифракционных лепестков.

4. Разработаны технические решения совмещённой АС С/Х-диапазонов на основе ЧСС со свойствами ЧОП, предложены и обоснованы электродинамические модели и проведено полномасштабное моделирование.

5. Разработан принцип построения и функционирования совмещённой на одном полотне АС ОВЧ/УВЧ диапазонов, используя ЧСС со свойством АМС.

6. Разработаны варианты технических решений совмещения ОВЧ/УВЧ-диапазонов с различным расположением и требованиями к ЧСС, предложены и обоснованы электродинамические модели, проведено полномасштабное моделирование.

7. Разработана методика аналитических оценок характеристик АС на основе ЧСС со свойствами ЧОП, обобщающая результаты, полученные как методом эквивалентных схем на основе модели Т-волны, так и на модели двумерной антенны вытекающей волны.

Методы исследования. Аппарат теории антенн, устройств СВЧ и математической физики, включая численные электродинамические методы моделирования на основе метода конечных разностей во временной области и метода конечных элементов, численные методы оптимизации целевых функций, а также экспериментальные методы антенных измерений.

Научная новизна работы:

1. Разработан принцип построения и функционирования совмещённой на одном полотне АС ОВЧ/УВЧ-диапазонов, используя ЧСС со свойством АМС, позволяющий снизить высоту профиля АС и уменьшить взаимовлияние диапазонов. Выявлены особенности поведения коэффициента отражения в полосе частот, связанные с конечным размером ЧСС, наличием резонансов между металлическим экраном и ЧСС, а также способы их устранения.

2. Разработаны варианты технических решений совмещённой АС ОВЧ/УВЧ-диапазонов, предложены и обоснованы их электродинамические модели, проведено полномасштабное моделирование, включающее сопоставление различных методов расчета, дана оценка влияния геометрических и электрофизических параметров АС на её полевые и энергетические характеристики, а также взаимного влияния АР одного диапазона на характеристики другого.

Профиль совмещенной АС $0.098\lambda_{овч}$, меньше на 62% по сравнению с классическим случаем совмещенных вибраторно-вибраторных АС.

3. Развита принцип построения и функционирования совмещенной на одном полотне АС С/Х-диапазонов, используя две ЧСС со свойствами ЧОП, выполняющих роль пространственно-частотного полосно-пропускающего фильтра для одного диапазона и полосно-заграждающего для другого. Это позволяет получить высокие значения КУ и реализовать разреженные АР с подавлением дифракционных лепестков и коэффициентом децимации 1:4, что существенно упрощает компоновку фидерной системы. Установлен механизм повышенной взаимной связи между возбуждающими элементами АР и способы её уменьшения.

4. Разработаны технические решения совмещенной АС С/Х-диапазонов, предложены и обоснованы их электродинамические модели, проведено полноволновое моделирование, включающие сопоставление различных методов расчета, дана оценка влияния геометрических и электрофизических параметров АС на её полевые и энергетические характеристики, а также взаимного влияния АР одного диапазона на характеристики другого.

5. Создана методика аналитических оценок характеристик АС на основе ЧСС со свойствами ЧОП, обобщающая результаты, полученные как методом эквивалентных схем на основе модели Т-волны, так и на модели двумерной антенны вытекающей волны, позволяющая оценить основные параметры и характеристики АС (структуру и геометрию, полосу частот, КУ, диаграмму направленности (ДН)).

Практическая значимость полученных результатов состоит в следующем:

1. Разработанный принцип совмещения АС ОВЧ/УВЧ-диапазонов позволяет снизить высоту профиля АС и уменьшить взаимовлияние диапазонов.

2. Развита принцип совмещения АС С/Х-диапазонов позволяет получить высокие значения КУ, и реализовать разреженные антенные системы с подавлением дифракционных лепестков, а также существенно упрощает компоновку фидерного тракта.

3. Макетирование с использованием принципа электродинамического подобия совмещенной АС в одной апертуре по схеме $УВЧ_{down} \parallel ОВЧ_{up}$ подтвердило обоснованность предложенного технического решения низкосилуэтной АС с сохранением основных радиотехнических характеристик.

4. Разработанная методика аналитических оценок характеристик антенных систем методом эквивалентных схем на основе модели Т-волны и модели двумерной антенны вытекающей волны, позволяет оценить основные параметры и характеристики АС, что существенно расширяет возможности проектирования подобных систем.

Реализация и внедрение результатов:

Теоретические соотношения, результаты численного моделирования и разработанный опытный образец совмещенной АС ОВЧ/УВЧ-диапазонов использованы в АО «Концерн радиостроения «Вега» при модернизации антенных устройств АУ-311 и АУ-411 многочастотного радиолокационного комплекса МРК-411.

Соответствующий акт внедрения прилагается к диссертации.

Достоверность полученных результатов обеспечивается физически обоснованной аналитической моделью АС, подтвержденной строгой постановкой граничных задач при численном электродинамическом моделировании, полученных разными методами; согласованностью с

положениями макроскопической электродинамики, теории антенн и устройств СВЧ; сравнением полученных результатов с имеющимися в литературе частными случаями и результатами измерений отдельных образцов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Совмещённая на одной апертуре АС ОВЧ (128 МГц) и УВЧ (435 МГц) диапазонов на основе ЧСС со свойствами АМС для низкочастотного диапазона и прозрачной поверхности (или металлического экрана) для высокочастотного диапазона, имеет низкую высоту профиля АС $0.098\lambda_{овч}$ ($0.17\lambda_{овч}$) и широкую полосу рабочих частот в ОВЧ (35%) в УВЧ (18%), сохраняя основные характеристики АС.

2. Совмещённая на одной апертуре АС С (5.3 ГГц) и Х (9.6 ГГц) диапазонов, используя две ЧСС со свойствами ЧОП с различной геометрией и параметрами, выполняющих роль пространственно-частотного полосно-заграждающего фильтра для одного диапазона и полосно-пропускающего для другого, реализует высокое значение КУ в рабочей полосе частот, низкую высоту профиля АС и сектор сканирования $\pm 15^{\circ}$ с коэффициентом децимации 1:4, что существенно упрощает компоновку фидерной системы.

3. Аналитическая оценка АС, состоящей из металлического экрана, диэлектрического полуволнового слоя, на котором расположена периодическая ЧСС со свойствами ЧОП, и возбуждающего излучателя на моделях эквивалентной схемы и двумерной антенны вытекающей волны, позволяет оценить основные параметры и характеристики АС: структуру и геометрию, рабочую полосу частот, КУ, ДН.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на:

- XIV молодёжной научно-технической конференции «Радиолокация и связь – перспективные технологии», Москва, ПАО «Радиофизика», 2016 г.;
- Международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии – Крымико», Севастополь, 2016 – 2017 гг.;
- XXII Научно-технической конференции «Радиолокационные системы специального и гражданского назначения», Жуковский АО «НИИП им. В.В. Тихомирова», 2016 г.;
- VII научно-технической конференции молодых учёных и специалистов «Актуальные вопросы развития систем и средств ВКО – 2016», Москва, 2016 г.;
- XXIII Международной научно-практической конференции «Радиолокация, навигация и связь – 2017», Воронеж, 2017 г.;
- International Scientific Conference 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves RSEMW», Divnomorskoe, Russia, 2019 г.

Публикации. По основным результатам выполненных в диссертации исследований опубликовано 26 печатных работ, из них 7 статей (4 в научно-технических журналах, рекомендуемых ВАК, 1 в базе ресурсов IEEE Xplore Digital Library (Scopus)) и 19 тезисов докладов.

Структура и объем работы:

Диссертационная работа изложена на 145 машинных листах и состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка использованных источников и приложения. Иллюстративный материал представлен в виде 101 рисунка и 4 таблиц. Список литературы включает 100 наименований.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и основные задачи исследований, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, изложены положения, выносимые на защиту. Приведены структура диссертации, форма апробации и список опубликованных статей в научных журналах.

В **первом разделе** анализируются подходы к реализации совмещенных антенных систем различных диапазонов. По материалам открытых российских и зарубежных информационных источников представлен обзор АС и анализ технических решений, используемых при их реализации. По анализу используемых методов совмещения АС, выделены и сгруппированы три подхода к комплексированию АС. Первый подход состоит в использовании широкополосных или двухдиапазонных излучателей, объединённых с полосно-пропускающими СВЧ фильтрами в каждом элементе или дуплексерными устройствами. Второй подход использует межэлементное (чередующееся) расположение элементов совмещаемых диапазонов. Третий подход состоит в комплексировании АР и ЧСС с различными свойствами, например, ЧОП, АМС и т.д.

По результатам анализа требований, предъявляемых к современным совмещенным АС, проводится обоснование выбранных технических решений в части принципа построения совмещенных АС с использованием ЧСС, обладающих различными свойствами, позволяющих обеспечить необходимые электродинамические и эксплуатационные характеристики.

Второй раздел посвящен методике аналитических оценок характеристик АС на основе ЧСС со свойствами ЧОП, обобщающая результаты, полученные как методом эквивалентных схем на основе модели Т-волны, так и на модели двумерной антенны вытекающей волны, позволяющая оценить основные параметры и характеристики АС. Модель АС на основе модели Т-волны (рисунок 1а, б) состоит из металлизированной подложки с одной стороны и ЧОП с другой стороны, формирующей резонирующую область. ЧОП состоит из композитной периодической структуры, двумерной (одномерной) сетки металлических полос или пластин, либо аналогичной сетки щелей в проводящем экране [5], [6].

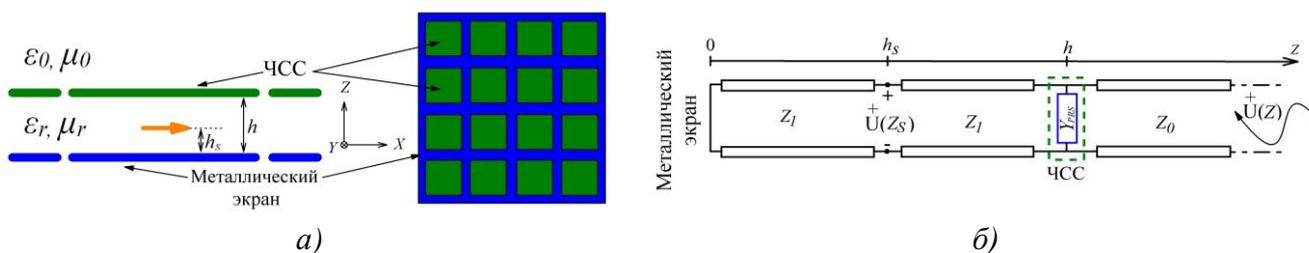


Рисунок 1 – Модель АС, возбуждаемой электрическим диполем.

В соответствии с принципом взаимности при расчёте компонент $p = (\theta, \varphi)$ электрического поля в дальней зоне $E_p(r, \theta, \varphi)$ АС на рисунке 1а, возбуждаемой электрическим диполем, ориентированным вдоль оси ОХ, используется следующую связь:

$$E_p(r, \theta, \varphi) = E_p^{ff}(\theta, \varphi) \frac{\exp(-ik_0 r)}{r} \quad (1)$$

Здесь компоненты поля в дальней зоне $E_p^{ff}(\theta, \varphi)$ рассчитываются как $E_p^{ff}(\theta, \varphi) = E_x^{pw}(\theta, \varphi)$, где $E_x^{pw}(\theta, \varphi)$ – Х-компонента электрического поля на источнике $(0, 0, z_s)$. Компоненты поля АС в дальней зоне, рассчитываются как:

$$E_p^{ff}(\theta, \varphi) = U(z = z_s); \quad U(z = z_s) = U^+ \frac{2Y_0 \sin(k_{z1} z_s) \operatorname{cosec}(k_{z1} h)}{Y_0 + Y_0 i [\hat{b}_{PRS} - \xi_r \operatorname{ctg}(k_{z1} h)]}, \quad (2)$$

где Y_0 – проводимость свободного пространства, зависящая от поляризации падающей волны и угла падения.

Согласно теореме взаимности $E_{\varphi, \theta}$ компоненты $E_{\varphi, \theta} = U(z = z_s)$, где $U(z = z_s)$ – напряжение в точке расположения диполя для TE_z и TM_z модели эквивалентной схемы в **H**- и **E**-плоскостях соответственно ($\varphi = 90^\circ; 0^\circ$):

$$E_\varphi = \tilde{E}_0 \frac{2Y_0^{TE_z} \sin(k_{z1} z_s) \operatorname{cosec}(k_{z1} h)}{Y_0^{TE_z} + Y_0^{TE_z} i [\hat{b}_{PRS} - \xi_r \operatorname{ctg}(k_{z1} h)]}; \quad E_\theta = \tilde{E}_0 \cos \theta \frac{2Y_0^{TM_z} \sin(k_{z1} z_s) \operatorname{cosec}(k_{z1} h)}{Y_0^{TM_z} + Y_0^{TM_z} i [\hat{b}_{PRS} - \xi_r \operatorname{ctg}(k_{z1} h)]} \quad (3)$$

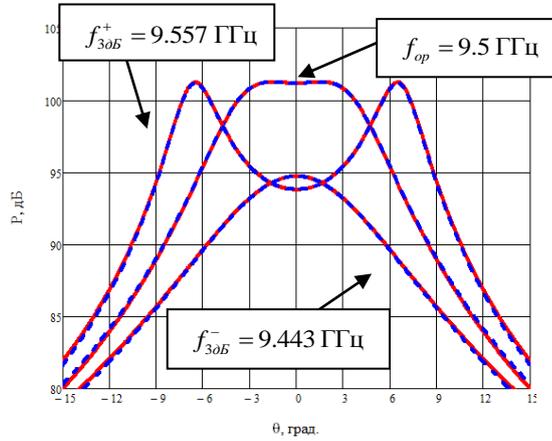


Рисунок 2 – Излученная плотность мощности элементарного диполя, расположенного на высоте $z = h_s = h/2$ для структуры рисунок 1б, на частотах f_{op} и $f = f_{30B}^-, f = f_{30B}^+$; **H**-плоскость (сплошная линия), **E**-плоскость (пунктирная линия).

На рабочей частоте ω_{op} , совпадающей с резонансной частотой АС, выполняется условие $\hat{b}_{PRS} - \xi_r \operatorname{ctg}(k_{z1} h) = 0$ (\hat{b}_{PRS} – проводимость периодической структуры), откуда вытекает значение h , которое для больших значений нормированной проводимости принимает вид:

$$h = \frac{1}{k_{op}} \arctg \left(\frac{\xi_r}{\hat{b}_{PRS}} \right) \cong \frac{\lambda_{op}}{2} \left(1 + \frac{\xi_r}{\pi \hat{b}_{PRS}} \right), \quad (4)$$

где k_{op} и λ_{op} – волновое число и длина волны в подложке на рабочей частоте.

Полоса рабочих частот АС по уровню -3 дБ определяется как:

$$\Delta\omega_{3\text{дБ}} = \frac{\omega_{3\text{дБ}}^+ - \omega_{3\text{дБ}}^-}{\omega_{\text{оп}}}; \quad \Delta\omega_{3\text{дБ}} = \xi_r \left(\frac{\lambda_{\text{оп}}}{\pi h} \right) \sqrt{\frac{\hat{b}_{\text{PRS}}^4 + \hat{b}_{\text{PRS}}^2 (2\xi_r^2 + 2) + \xi_r^4}{\hat{b}_{\text{PRS}}^4 + \hat{b}_{\text{PRS}}^2 (2\xi_r^2 + 1) + \xi_r^4}}, \quad (5)$$

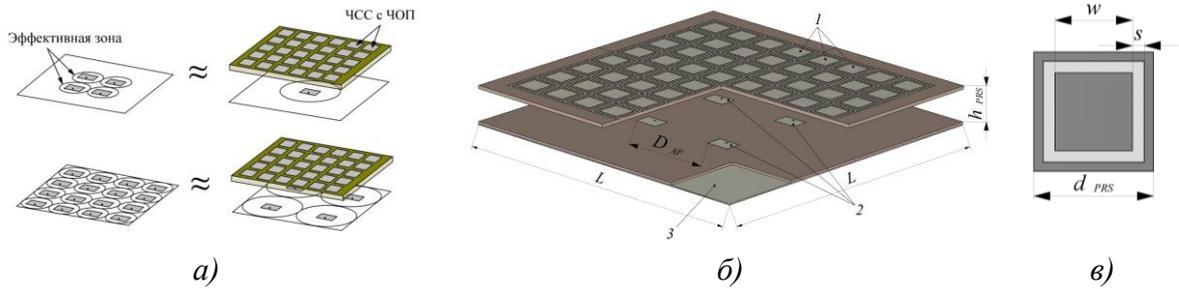
где $\omega_{3\text{дБ}}^{\pm}$ – частоты, на которых излучаемая АС плотность мощности по нормали.

Получена оценка ширины ДН АС и КНД:

$$2\theta_{3\text{дБ}} \cong \frac{2}{|\hat{b}_{\text{PRS}}|} \sqrt{\frac{2\varepsilon_r \mu_r \xi_r}{\pi}}; \quad D_{\text{max}} \cong \frac{\pi^3 \hat{b}_{\text{PRS}}^2}{8\varepsilon_r \mu_r \xi_r} \cong 3,9 \frac{\hat{b}_{\text{PRS}}^2}{\varepsilon_r \mu_r \xi_r} \quad (6)$$

Рассмотрена антенная система на основе ЧОП как антенна вытекающей волны. Получена зависимость размера АС L , задаваясь затуханием поля $X_{\text{дБ}}$ на краях: ($L \approx X_{\text{дБ}} / (8,686\alpha)$) (α – коэффициент затухания). В соответствии с (5), (6), достижение высокого КУ приводит к существенному сужению рабочей полосы. Для устранения этого противоречия возникает необходимость создания многоэлементной системы и увеличения расстояния между элементами, что приводит к разреженной АС (рисунок 3а).

На рисунке 3б приведен общий вид разреженной АС X диапазона, состоящей из четырёх (размерностью 2×2) печатных излучателей 2 на основе ЧСС с ЧОП 1. В качестве периодической ячейки ЧСС с ЧОП выбрано щелевое кольцо толщиной s с периодом d_{PRS} (рисунок 3в, темным цветом показана металлизация), в качестве подложки использован материал Rogers RO4003 с $\varepsilon = 3.55$.



1 – ЧСС с ЧОП; 2 – печатные излучатели (патч); 3 – металлический экран.

Рисунок 3 – Разреженная АС X -диапазона: а) – эскиз эквивалентности между АС без ЧСС и с ЧСС; б) – внешний вид; в) – периодическая ячейка ЧСС с ЧОП.

Рисунок 4 иллюстрирует частотную зависимость КУ ($G(\theta = 0^\circ)$) для двух случаев: 2×2 без ЧСС $\Leftrightarrow 1 \times 1$ с ЧСС и 4×4 без ЧСС $\Leftrightarrow 2 \times 2$ с ЧСС. Подтверждено, что значения КУ разреженной АС на основе ЧСС с ЧОП ($D_{\text{AP}}/\lambda_0 = 1.3$) и традиционной АС ($D_{\text{AP}}/\lambda_0 = 0.8$) без ЧСС практически тождественны, при этом коэффициент децимации (decimation ratio) равен 1:4, что существенно упрощает компоновку фидерной системы для двухполяризационной АС.

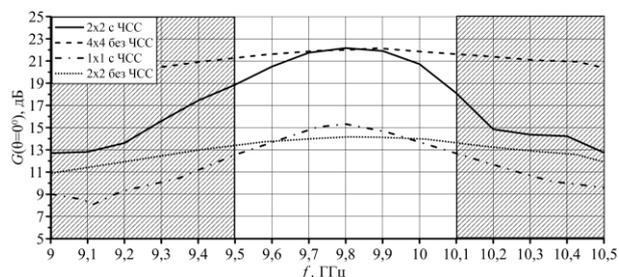


Рисунок 4 – КУ разреженной АС Х-диапазона.

На рисунке 5а, б приведены сечения ДН (D) в **Е**- и **Н**-плоскостях для двух описываемых выше случаев. Использование ЧСС с ЧОП позволило подавить дифракционные лепестки до уровня ≤ -20 дБ, возникающие с ростом шага между излучателями в разреженной АС, а также повысить КНД АР. Равномерное распределение напряженности электрического поля **Е**, возникающее на поверхности ЧСС, приводит к подавлению дифракционных лепестков АС (рисунок 6а, б).

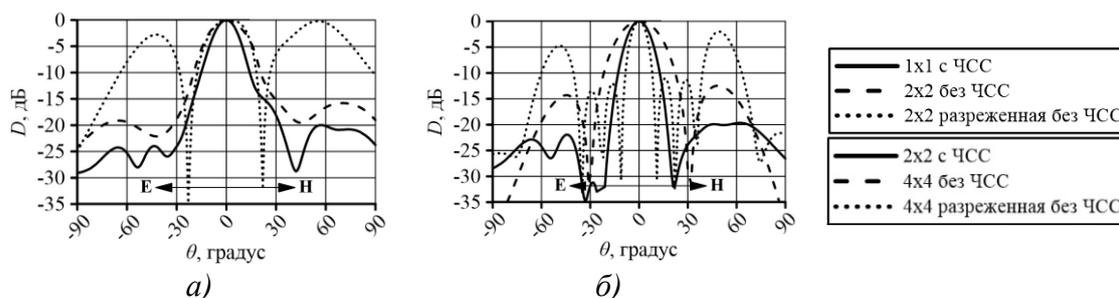


Рисунок 5 – Характеристики направленности разреженной АС Х диапазона: а) – ДН в **Е**- и **Н**-плоскостях для случая АР 1x1 с ЧСС; б) – ДН в **Е**- и **Н**-плоскостях для случая АР 2x2 с ЧСС.

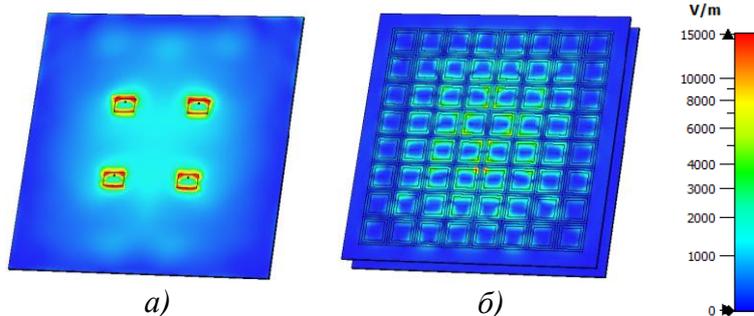


Рисунок 6 – Напряженность электрического поля **Е** на: а) – поверхности разреженной АС; б) – поверхности ЧСС с ЧОП.

В **третьем разделе** диссертационной работы предложены технические решения и проведен анализ функционирования совмещенной двухдиапазонной двухполяризационной АС С/Х-диапазонов с отношением частот 1:1.8 на основе ЧСС со свойствами ЧОП (рисунок 7). Схематично показана конструкция совмещенной АС на которой две ЧСС расположены на расстоянии h_1 и h_2 от металлического экрана, образуя при оптимальном выборе параметров две резонансные области для частот С- и Х-диапазона f_C и f_X .

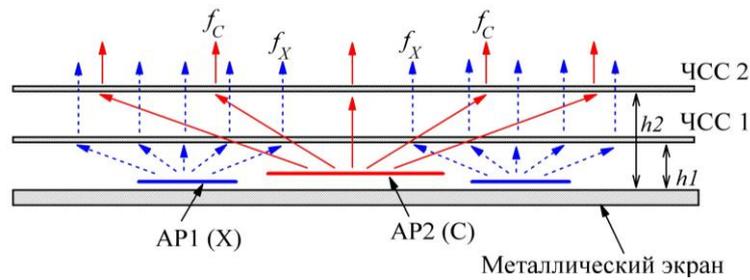
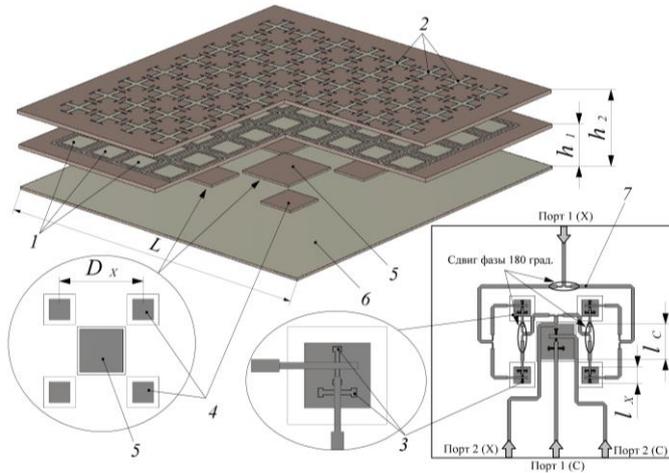


Рисунок 7 – К принципу функционирования совмещенной АС С/Х-диапазонов.

Разработана модель разреженной совмещенной двухполяризационной АС с применением ЧСС с ЧОП, в качестве подложки использован материал Rogers RO4003 с $\epsilon = 3.55$:



- 1 – ЧСС₁; 2 – ЧСС₂;
- 3 – Н-образные щели для возбуждения излучателей;
- 4 – печатные излучатели (патч) Х-диапазона;
- 5 – печатные излучатели (патч) С-диапазона;
- 6 – металлический экран;
- 7 – полосковая фидерная система возбуждения.

$$L = 4.5\lambda_x = 140 \text{ мм}$$

$$h_1 = 0.55\lambda_x = 17.1 \text{ мм}$$

$$h_2 = 0.56\lambda_c = 31 \text{ мм}$$

$$l_x = 0.32\lambda_x = 10 \text{ мм}$$

$$l_c = 0.38\lambda_c = 21 \text{ мм}$$

$$D_x = 1.3\lambda_x = 40 \text{ мм}$$

Рисунок 8 – Совмещенная двухполяризационная АС С/Х-диапазонов авиационного мониторинга земной поверхности.

На рисунке 9 приведены S-параметры от входов АР С- и Х-диапазонов на двух поляризациях.

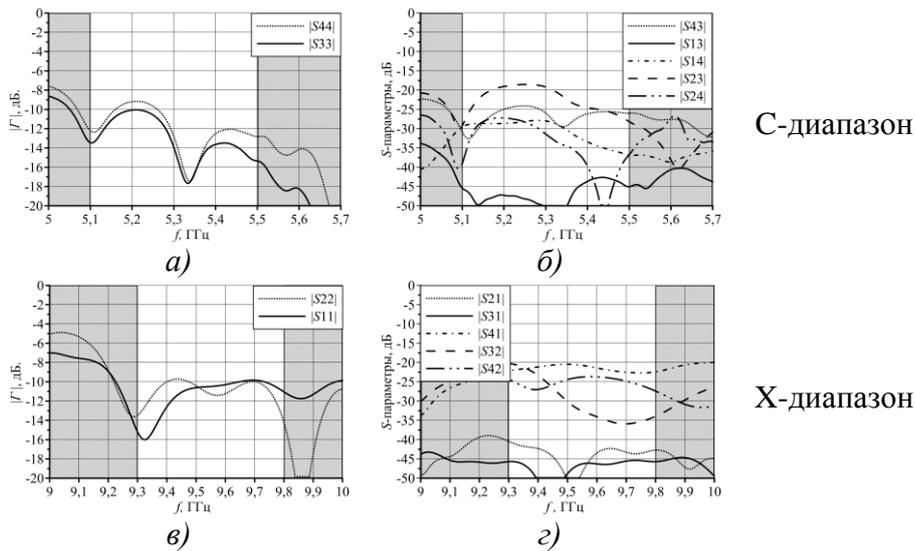


Рисунок 9 – S-параметры совмещенной двухполяризационной АС С/Х-диапазонов: а, в) – модуль коэффициента отражения; б, г) – развязка.

На рисунке 10 приведены сечения ДН совмещенной АС в С- и Х-диапазонах в Е- и Н-плоскостях для основной и кроссполяризационной составляющих.

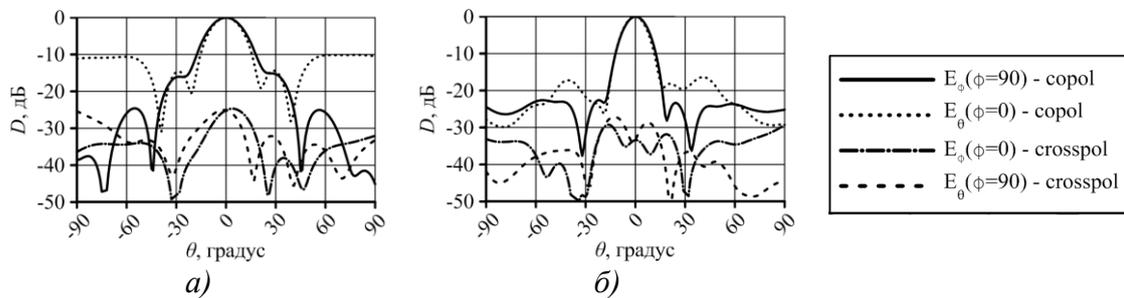


Рисунок 10 – ДН совмещенной двухполяризационной АС С/Х-диапазонов в: а) – С-диапазоне $f_C = 5.3$ ГГц; б) – Х-диапазоне $f_X = 9.6$ ГГц.

Подтверждена возможность электрического сканирования лучом в секторе $\pm 15^\circ$ на двухполяризационных АР С- (размерностью 1x2) и Х- (размерностью 1x4) диапазонов.

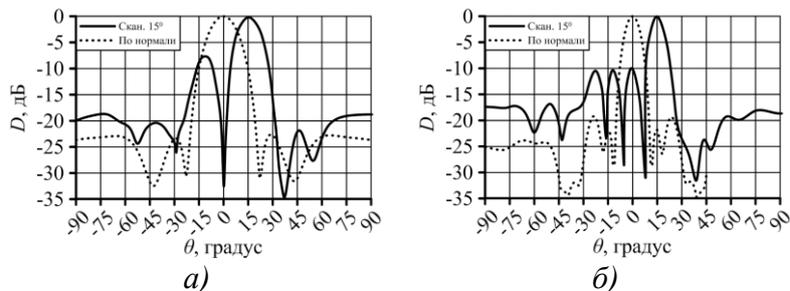


Рисунок 11 – Сканирование совмещенной двухполяризационной АС С/Х-диапазонов в: а) – С-диапазоне $f_C = 5.3$ ГГц; б) – Х-диапазоне $f_X = 9.6$ ГГц.

Четвертый раздел диссертационной работы посвящен построению и функционированию совмещенной на одном полотне АС ОВЧ/УВЧ-диапазонов с соотношением частот 1:3, используя ЧСС со свойством АМС (коэффициент отражения +1 для ОВЧ-диапазона), позволяющие снизить высоту профиля АС и уменьшить взаимовлияние диапазонов. На рисунке 12а, б, представлены две схемы комплексирования АС ОВЧ- и УВЧ-диапазонов. Классификация схем произведена по принципу расположения диапазонов друг над другом. Для такого технического решения в УВЧ-диапазоне ЧСС структура является металлическим экраном (рисунок 12а), при этом излучатели УВЧ-диапазона располагаются над ЧСС на расстоянии $\lambda_{увч}/4$. С другой стороны схема на рисунке 12б позволяет максимально снизить высоту профиля всей АС, при этом, ЧСС должна быть прозрачной ($|\Gamma| \sim 0$) для излучателей УВЧ-диапазона.

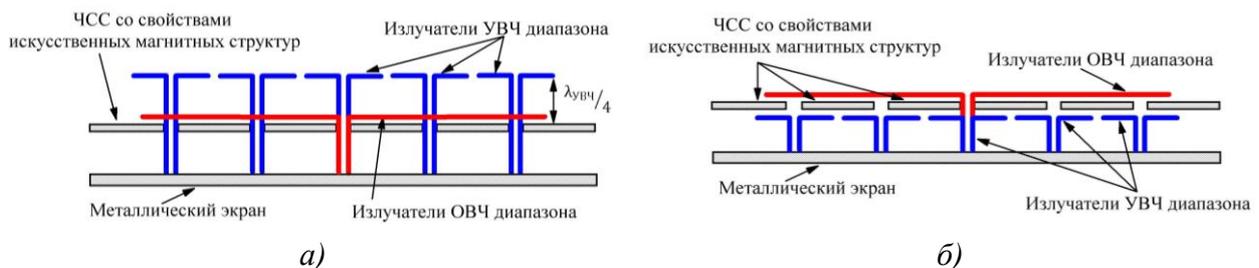
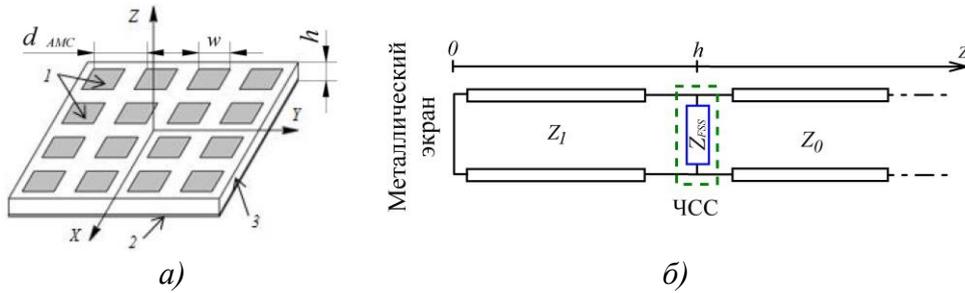


Рисунок 12 – Схемы построения совмещенных АС ОВЧ/УВЧ-диапазонов: а) – $ОВЧ_{down} \parallel УВЧ_{up}$; б) – $УВЧ_{down} \parallel ОВЧ_{up}$.

В АС реализуется структура, показанная на рисунке 13а. При анализе предполагается, что выполняются условия $d_{AMC} \ll \lambda, w \ll d_{AMC}$, где d_{AMC} – период структуры, w – ширина пластины. Решётка металлических пластин расположена параллельно проводящей плоскости на слое диэлектрика толщиной h с относительной диэлектрической проницаемостью слоя ϵ .



1 – металлические пластины; 2 – металлический экран; 3 – диэлектрический слой.

Рисунок 13 – Периодическая структура AMC: а) – структура AMC; б) – схема в виде эквивалентной линии.

Входной импеданс всей структуры Z_3 определяется параллельным соединением $Z_{fss} = Z_{fss}^{TM(TE)}$ и Z_0 :

$$Z_3 = \frac{i\eta t g k h}{1 - [(\epsilon + 1)/\pi\sqrt{\epsilon}] k_0 d_{AMC} \ln(2d_{AMC}/\pi w) t g k h} \quad (7)$$

Для плоской волны, падающей по нормали на структуру с поверхностным импедансом Z_3 , фаза отражённой волны определяется выражением:

$$\arg \Gamma = \text{Im} \left[\ln \left(\frac{Z_3 - Z_0}{Z_3 + Z_0} \right) \right], \quad (8)$$

где Z_0 – импеданс свободного пространства.

Разработана модель совмещенной двухдиапазонной АС по схеме $OBЧ_{down} \parallel UBЧ_{up}$, в качестве подложки использован материал Rogers RO3035 с $\epsilon = 3.6$:

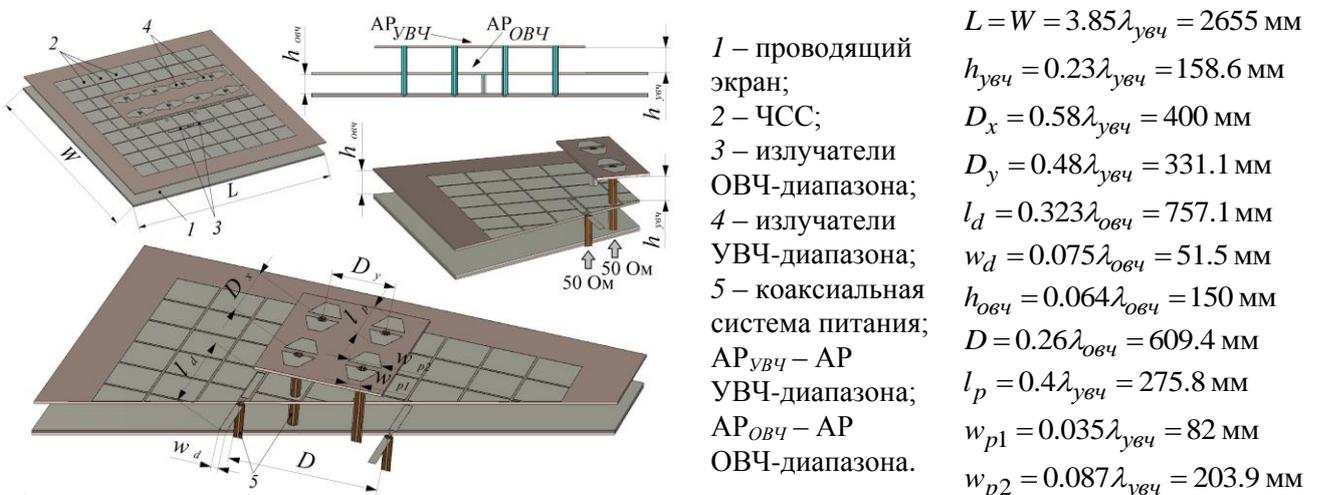


Рисунок 14 – Совмещенная АС ОВЧ/УВЧ-диапазонов авиационного мониторинга земной поверхности.

На рисунке 15а, б приведены S-параметры совмещенной двухдиапазонной АС ОВЧ/УВЧ диапазонов от входов AP ОВЧ- и УВЧ-диапазонов.

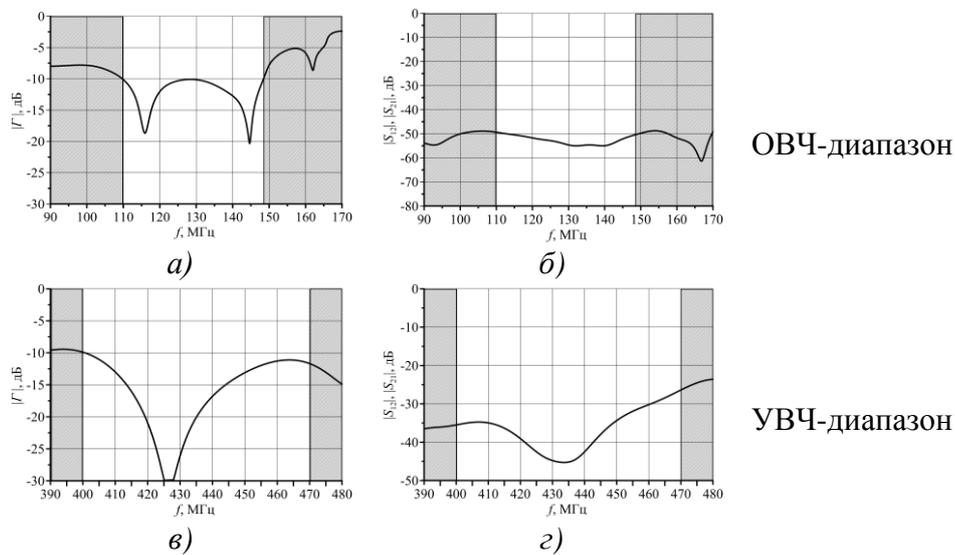


Рисунок 15 – S -параметры совмещенной двухдиапазонной АС ОВЧ/УВЧ-диапазонов: $a, в$) – модуль коэффициента отражения; $б, г$) – развязка.

На рисунке 16 приведены сечения ДН совмещенной АС в ОВЧ- и УВЧ-диапазонах в **Е**- и **Н**-плоскостях.

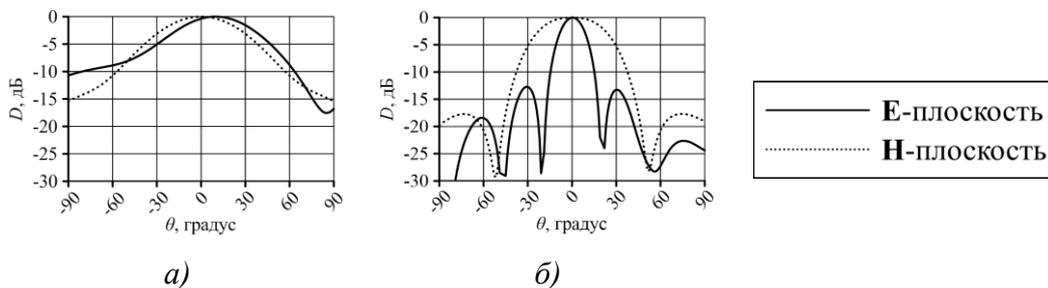


Рисунок 16 – ДН совмещенной двухдиапазонной АС ОВЧ/УВЧ-диапазонов в: a) – ОВЧ-диапазоне $f_{ОВЧ} = 128$ МГц; $б$) – УВЧ-диапазоне $f_{УВЧ} = 435$ МГц.

В диссертационной работе рассмотрено иное техническое решение, представленное на рисунке 12б. К достоинствам такой схемы построения можно отнести получение более низкого профиля АС, что позволяет сохранить аэродинамику носителя, увеличить полосу рабочих частот и развязку. В таблице 1 приведены сравнительные характеристики двух схем совмещения АС.

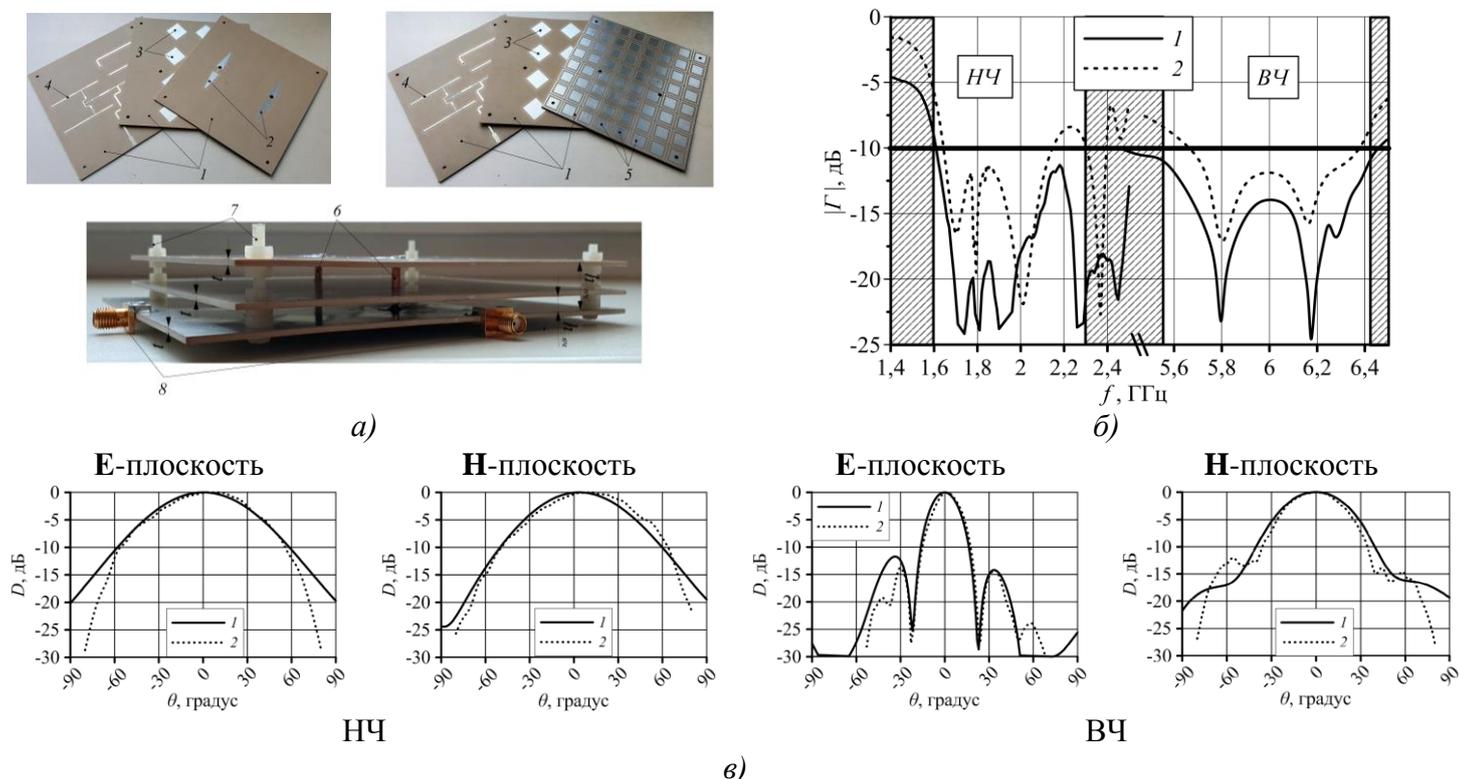
Таблица 1 – Сравнение двух схем совмещения АС на основе АМС

№ схемы	Типы схем совмещения	Высота профиля АС	G , дБ		$\Delta\omega_{3дБ}$, %	Развязка, дБ
			ОВЧ	УВЧ		
1	$ОВЧ_{down} \parallel УВЧ_{up}$	$0.17\lambda_{ОВЧ} = 398.4$ мм	9...10.5	≥ 15	30	$S_{21} \leq -50$
					18	$S_{12} \leq -25$
2	$УВЧ_{down} \parallel ОВЧ_{up}$	$0.098\lambda_{ОВЧ} = 229.7$ мм	8...10	≥ 15	40	$S_{21} \leq -40$
					18	$S_{12} \leq -20$

Проведено макетирование и экспериментальные измерения совмещенной АС по схеме $УВЧ_{down} \parallel ОВЧ_{up}$ с использованием принципа электродинамического подобия (соотношение частот 1:3, рисунок 17а). Для такой АС введено обозначение $ВЧ_{down} \parallel НЧ_{up}$ (НЧ – низкочастотная АР, ВЧ – высокочастотная АР). Для центральной частоты ОВЧ-диапазона $f_{ОВЧ} = 128$ МГц, частота

подобия НЧ была выбрана $f_{НЧ} = 2$ ГГц, для центральной частоты УВЧ-диапазона $f_{УВЧ} = 435$ МГц частота подобия ВЧ составила $f_{ВЧ} = 6$ ГГц.

На рисунке 17б приведены результаты измерения частотной зависимости модуля коэффициента отражения $|Γ|$ от входов АР НЧ- и ВЧ-диапазонов. Измерения макета совмещенной низкопрофильной АС проводились при помощи автоматизированного измерительно-вычислительного комплекса ТМСА 1.0-40.0 Б 056 для измерения радиотехнических характеристик антенн методом ближнего поля в частотной области.



1 – печатные платы; 2 – излучатели НЧ АР; 3 – излучатели ВЧ АР;
4 – полосковая фидерная система возбуждения; 5 – ЧСС; 6 – коаксиальная система питания ОВЧ диапазона; 7 – крепежные винты; 8 – разъемы питания.

Рисунок 17 – Макетирование и измерения совмещенной АС по схеме $ВЧ_{down} || НЧ_{up}$: а) – макет в сборе; б) – модуль коэффициента отражения от входов АР НЧ- и ВЧ-диапазонов; в) – ДН совмещенной АС.

1 – полноволновое моделирование; 2 – экспериментальные измерения.

В **приложении А** представлена сравнительная таблица существующих совмещенных антенных систем.

В **приложении Б** представлена графическая зависимость поведения фазы коэффициента отражения от геометрических параметров АМС структуры.

В **заключении** приведены **основные результаты**, полученные в диссертационной работе, сведения об их апробации и публикации по теме диссертации.

Заключение

Диссертация посвящена двухдиапазонным двухполяризационным антенным системам авиационного мониторинга земной поверхности. При исследовании получены следующие **основные результаты**:

1. Развита принцип построения и функционирования совмещённой на одном полотне АС С/Х-диапазонов с отношением частот 1:1.8, используя две ЧСС со свойствами ЧОП, выполняющих роль пространственно-частотного полосно-пропускающего фильтра для одного диапазона и полосно-заграждающего для другого, позволяющие получить высокие значения КУ и реализовать разреженные АС с подавлением дифракционных лепестков и коэффициентом децимации 1:4, что существенно упрощает компоновку фидерной системы. Установлен механизм повышенной взаимной связи между возбуждающими элементами АС и способы её уменьшения.

2. Разработаны технические решения совмещённой АС С/Х-диапазонов, предложены и обоснованы электродинамические модели, проведено полноволновое моделирование, включающее сопоставление различных методов расчета, дана оценка влияния геометрических и электрофизических параметров АС на её полевые и энергетические характеристики, а также взаимного влияния АР одного диапазона на характеристики другого. Аналитические оценки достоверно совпадают с результатами полноволнового моделирования:

– для АР С-диапазона (размерностью 1x1) полоса частот 7.5% (5.1-5.5 ГГц), усиление $G = 12$ дБ, УБЛ = -15 дБ, уровень кроссполяризации в двух главных плоскостях не превышает -25 дБ, развязка между АР С- и Х-диапазонов как в совпадающих, так и в ортогональных поляризациях не превышает -25 дБ;

– для АР Х-диапазона (размерностью 2x2) полоса частот 5.2% (9.3-9.8 ГГц), усиление $G = 19$ дБ, УБЛ = -15 дБ, уровень кроссполяризации в двух главных плоскостях меньше -30 дБ, развязка между АР С- и Х-диапазонов в совпадающих поляризациях не превышает -20 дБ, развязка между АР С- и Х-диапазонов в ортогональных поляризациях не превышает -45 дБ и -20 дБ соответственно.

Электрическое сканирование лучом в секторе $\pm 15^\circ$ подтверждено на двухполяризационных АР (размерностью 1x2) С-диапазона и АР (1x4 размерностью) Х-диапазона.

3. Разработан принцип построения и функционирования совмещённой на одном полотне АС ОВЧ/УВЧ-диапазонов с отношением частот 1:3, используя ЧСС со свойством АМС, позволяющий снизить высоту профиля АС и уменьшить взаимовлияние диапазонов. Выявлены особенности поведения коэффициента отражения в полосе частот, связанные с конечным размером ЧСС, наличием резонансных явлений и способы их устранения.

4. Разработаны варианты технических решений совмещения ОВЧ/УВЧ-диапазонов с различным расположением АР и требованиями к ЧСС, предложены и обоснованы их электродинамические модели, проведено полноволновое моделирование, включающие сопоставление различных методов расчета, дана оценка взаимного влияния АР одного диапазона на характеристики другого и способы его снижения.

5. Для схемы $ОВЧ_{down} \parallel УВЧ_{up}$ профиль совмещённого антенного комплекса ОВЧ (размерностью 1x2) и УВЧ (размерностью 4x2) диапазонов составил $0.17\lambda_{овч}$ (меньше на 32% по сравнению с классическим случаем совмещённых вибраторно-вибраторных АС), ширина рабочей

полосы ОВЧ диапазона 30%, усиление $G = 10$ дБ, УБЛ = -18 дБ, развязка между диапазонами не превышает -50 дБ, ширина рабочей полосы УВЧ диапазона 18%, усиление $G \geq 15$ дБ, УБЛ = -13.2 дБ, развязка между диапазонами не превышает -25 дБ.

6. Для схемы $УВЧ_{down} \parallel ОВЧ_{up}$ профиль совмещённого антенного комплекса ОВЧ (размерностью 1x2) и УВЧ (размерностью 4x2) диапазонов составил $0.098\lambda_{овч}$ (меньше на 62% по сравнению с классическим случаем совмещенных вибраторно-вибраторных АС), ширина рабочей полосы ОВЧ-диапазона 40%, усиление $G = 10$ дБ, УБЛ = -18 дБ, развязка между диапазонами не превышает -40 дБ, ширина рабочей полосы УВЧ диапазона 18%, усиление $G = 15$ дБ, УБЛ = -13.2 дБ, уровень КСВ ≤ 2 , развязка между АР различного диапазона не превышает -20 дБ.

7. Создана методика аналитических оценок характеристик АС на основе ЧСС со свойствами ЧОП, обобщающая результаты, полученные как методом эквивалентных схем на основе модели Т-волны, так и на модели двумерной антенны вытекающей волны, позволяющая оценить основные параметры и характеристики АС (структуру и геометрию, полосу частот, КУ, ДН).

8. Проведено макетирование с использованием принципа электродинамического подобия совмещенной АС в одной апертуре по схеме $УВЧ_{down} \parallel ОВЧ_{up}$ с соотношением частот 1:3: размерностью в ОВЧ-диапазоне (1x2) с печатными вибраторными излучателями, размерностью (4x2) в УВЧ-диапазоне на основе двумерных печатных элементов. Измеренные характеристики (S -параметры, ДН, КУ), подтвердили обоснованность предложенного технического решения низкосилуэтной АС с сохранением основных радиотехнических характеристик.

Цитированная литература

1. Space antenna handbook. Edited by Imbriale W., Gao S., Voccia L. 2012. John Wiley & Sons. P. 744.
2. Антенны и радары с электронным управлением лучом / Под ред. Синани А.И., Кауфман Г.В. – М.: Радиотехника, 2016. С. 233.
3. Антенно-фидерные и оптоэлектронные устройства / Под. ред. В.С. Вербы и А.П. Курочкина. Монография. М.: Радиотехника, 2014. С. 352.
4. Пономарёв Л.И., Степаненко В.И. Сканирующие многочастотные совмещённые антенные решётки. М.: Радиотехника. 2009. С. 328.
5. Hosseini S. A., Flaviis F. D., Capolino F. Design formulas for planar Fabry–Pérot cavity antennas formed by thick partially reflective surfaces // IEEE Trans. Antennas Propagation. 2016. Vol. 64, No. 12. P. 5487–5491.
6. Zhao T., Jackson D. R., Williams J.T. and et.al. 2-D periodic leaky-wave antennas – Part I: Metal patch design // IEEE Trans. Antennas Propag. 2005. V. 53, № 11. P. 3505–3514.

Список публикаций автора по теме диссертации

Статьи в журналах перечня ВАК министерства образования и науки РФ:

1. Измайлов А.А., Волков А.П. Низкопрофильная широкополосная антенная система с улучшенной формой диаграммы направленности на основе искусственного магнитного проводника конечного размера // Труды МАИ, 2017. №94.
http://trudymai.ru/upload/iblock/706/izmaylov_volkov_rus.pdf.

2. Измайлов А.А., Гринёв А.Ю. Практическая реализация и принципы построения антенных систем с частотно-селективными структурами // Успехи современной радиоэлектроники. 2018. №10. С. 67-74.

3. Гринёв А.Ю., Измайлов А.А., Цитович А.А. Антенны на основе частотно-селективных структур со свойствами частично-отражающей поверхности // Электромагнитные волны и электронные системы. 2019. №1 С. 37-51.

4. Гринёв А.Ю., Измайлов А.А., Волков А.П. Двухдиапазонная совмещенная ОВЧ/УВЧ антенная система авиационного мониторинга земной поверхности // Антенны. 2019. №4. С. 20-32.

Публикации Scopus:

5. Izmaylov A.A., Grinev A.Yu., Volkov A.P. Dual-band combined VHF/UHF antenna system of aviation monitoring of the land surface // International Scientific Conference 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves RSEMW», Divnomorskoe, Russia, 2019.

<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8792751&isnumber=8792683>.

В других изданиях:

6. Гринев А.Ю., Волков А.П., Измайлов А.А. Композитные СВЧ структуры в антенных система // в кн. Радиолокационные системы специального и гражданского назначения / под ред. Ю.И. Белого. М.: Радиотехника. 2016. С. 594 – 606.

7. Измайлов А.А., Гринёв А.Ю. Низкопрофильная спутниковая антенная система ОВЧ диапазона // Сборник научных статей молодых учёных Московского авиационного института – «Сборник НИРС МАИ – 2016», Москва. С. 104-109.

Тезисы докладов:

8. Измайлов А.А., Волков А.П. Частотно-селективные структуры для контроля эффективной поверхности рассеяния линейной ФАР «L»-диапазона // Сборник тезисов докладов Московской молодежной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике – 2015», Москва, 21–23 апреля 2015 г. Москва. С. 130–131.

9. Гринев А.Ю., Волков А.П., Измайлов А.А. Частотно-селективные структуры для контроля диаграммы обратного рассеяния линейной АФАР L диапазона // Сборник тезисов 14-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2015», Москва, 16-20 ноября 2015 г. С. 234-236.

10. Измайлов А.А. Частотно–селективные структуры для контроля эффективной поверхности рассеяния линейной ФАР «L» - диапазона // Тезисы докладов XIII Международной научно-практической конференции «Инновационные, информационные и коммуникационные технологии – ИНФО 2016». Сочи. 2016 г. С. 520-522.

11. Измайлов А.А. Волков А.П. Низкопрофильная спутниковая антенная система ОВЧ диапазона // Тезисы докладов 26-й Международной конференции «Крымико – 2016» . Крым. 2016 г. С. 1023-1029.

12. Измайлов А.А., Волков А.П. Низкопрофильная спутниковая антенная система ОВЧ диапазона // Сборник тезисов докладов XLII Международной молодежной конференции «Гагаринские чтения», Москва, 12-15 апреля, 2016 г. Том 1. С. 487-488.

13. Измайлов А.А. Низкопрофильный элемент антенной системы Р – диапазона // Сборник тезисов докладов VII научно-технической конференции молодых учёных и специалистов «Актуальные вопросы развития систем и средств ВКО – 2016. С. 227-231

14. Измайлов А.А. Частотно-селективные структуры для контроля эффективной поверхности рассеяния линейно ФАР L-диапазона // Тезисы докладов XIV Молодежной научно-технической конференции «Радиолокация и связь – перспективные технологии». ОАО «Радиофизика». 2016 г. С. 31-33.

15. Измайлов А.А. Низкопрофильная спутниковая антенная система ОВЧ диапазона // Сборник тезисов докладов XLIII Международной молодежной конференции «Гагаринские чтения», Москва, 5-19 апреля, 2017 г. С. 487-488.
16. Измайлов А.А. Miniaturized satellite antenna using artificial magnetic conductors (AMC) of VHF band // Сборник трудов Международной научно-практической конференции «Информационные Инновационные технологии» (Information Innovative Technologies, I2T). Прага. 2017 г. С. 301-304.
17. Измайлов А.А. Низкопрофильная спутниковая антенная система ОВЧ диапазона // Сборник трудов XXIII международной конференции «Радиолокация, навигация и связь» - 2017, Воронеж, 18-20 апреля 2017 г. С. 620 – 625.
18. Измайлов А.А. Низкопрофильная широкополосная антенная система с улучшенной формой диаграммы направленности на основе искусственного магнитного проводника конечного размера // Тезисы докладов XIV Международной научно-практической конференции «Инновационные, информационные и коммуникационные технологии – ИНФО 2017». Сочи. 2017 г. С. 665-669.
19. Измайлов А.А. Частотно – селективные структуры для контроля эффективной поверхности рассеяния линейной ФАР «L» - диапазона // Тезисы докладов 27-й Международной конференции «Крымико – 2017». Крым. 2017 г. С. 717-721.
20. Izmaylov А.А. Низкопрофильный излучатель на основе искусственного магнитного проводника в виде печатного прямоугольного элемента // Тезисы докладов 27-й Международной конференции «Крымико – 2017». Крым. 2017 г. С. 604-610.
21. Измайлов А.А. Низкопрофильный излучатель на основе искусственного магнитного проводника в виде печатного прямоугольного элемента // Сборник тезисов докладов VII конференции молодых учёных и специалистов АО НПП «Исток» им. Шокина 2017, Фрязино.
22. Измайлов А.А. Низкопрофильная широкополосная антенная система с улучшенной формой диаграммы направленности на основе искусственного магнитного проводника конечного размера // Сборник тезисов 16-й Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2017». Москва. 2017 г. С. 219-220.
23. Гринёв А.Ю., Волков А.П., Козлов К.В., Измайлов А.А. Антенные системы с периодическими СВЧ композитными структурами // Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции «Расплетенские чтения – 2018», 14-16 февраля 2018 г. С. 59.
24. Евсеев Д.А., Измайлов А.А., Волков А.П. Микрополосковые фазированные антенные решётки с улучшенными поляризационными свойствами // Сборник тезисов докладов XLIV Международной молодежной конференции «Гагаринские чтения», Москва, 2018 г. С. 234.
25. Измайлов А.А. Двухдиапазонная антенная система авиационного мониторинга земной поверхности // Тезисы докладов XV Международной научно-практической конференции «Инновационные, информационные и коммуникационные технологии – ИНФО 2018». Сочи. 2018 г. С. 582-586.
26. Измайлов А.А., Гринёв А.Ю. Двухдиапазонная антенная система авиационного мониторинга земной поверхности // Сборник тезисов докладов XLV Международной молодежной конференции «Гагаринские чтения», Москва, 2019 г. С. 518.