

На правах рукописи

ПОТАПОВ ДМИТРИЙ СЕРГЕВИЧ

ОБРАБОТКА ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СИГНАЛОВ В
ОПТИЧЕСКОЙ ЛОКАЦИИ И РАДИОВИДЕНИИ

Специальность 05.12.14

«Радиолокация и радионавигация»

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва

2008

Работа выполнена на кафедре «Радиоприемных устройств» Московского авиационного института (государственного технического университета)

Научный руководитель: доктор технических наук,
с.н.с. Меркишин Г.В.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Антипов В.Н.

кандидат технических наук,
доцент Бруханский А.В.

Ведущая организация: ОАО «Корпорация Фазотрон-НИИР»

Защита состоится «_____» _____ 2008 г. в _____ часов на заседании Диссертационного Совета Д 212.125.03 при Московском авиационном институте (государственном техническом университете) МАИ по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4, зал заседаний ученого совета МАИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МАИ.

Автореферат разослан «_____» _____ 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета Д 212.125.03
с.н.с., к.т.н., доцент

М.И. Сычев

Актуальность работы

Работа посвящена задаче формирования локационными методами некоординатной информации об объекте, находящемся на большом удалении. Важнейшей характеристикой информационной системы является ее разрешающая способность, определяющая возможность раздельного наблюдения близкорасположенных элементов конструкции объекта. Разрешающая способность по дальности обеспечивается использованием сверхширокополосных сигналов. Для увеличения разрешающей способности по азимуту необходимо применение антенн с большой апертурой. В случае самолетного лоатора необходимый размер антенны достигается формированием в процессе полета синтезированной апертуры (СА).

В радиолокаторах с синтезированной апертурой антенны (РСА) неконтролируемые траекторные нестабильности носителя РСА в процессе синтеза апертуры, нестабильности приемо-передающей аппаратуры, среды распространения излучения приводят к искажениям фазы принимаемого сигнала, что в свою очередь ведет к ухудшению разрешающей способности по азимуту. Для уменьшения влияния траекторных нестабильностей и увеличения разрешения на практике используется сложная специальная обработка принятого сигнала с учетом данных навигационного оборудования (точность датчиков инерциальной навигационной системы часто не удовлетворяет рассматриваемым задачам), сложные адаптивные алгоритмы обработки.

Анализируемый в работе метод восстановления изображения удаленного объекта основан на использовании только амплитудной информации в отраженном сигнале без измерения фазовой составляющей. Метод восстановления изображения заключается в формировании структурного изображения наблюдаемого объекта на основе анализа пространственного распределения интенсивности отраженного объектом сигнала. На амплитуду отраженных и принимаемых антенной сигналов турбулентность среды распространения, нестабильность движения носителя РСА не оказывают заметного влияния. Поэтому весьма актуальным является исследование возможности использования информации об объекте, заложенной в амплитудном распределении.

Кроме того, весьма актуальным является вопрос обнаружения и извлечения информации об удаленных объектах, не обладающих достаточной отражающей способностью в радиодиапазоне (например, некоторые современные беспилотные

летательные аппараты). Большой практический интерес представляют обнаружение и извлечение информации об объектах, находящихся под водой. Весьма актуальной является рассматриваемая в работе задача обнаружения и извлечения информации об объектах, обладающих «блестящими» точками в оптическом диапазоне (оптико-электронные приборы обычной и специальной техники), что позволяет проводить распознавание и идентификацию наблюдаемых объектов.

С учетом вышесказанного можно сделать вывод: разрабатываемые и исследуемые новые методы извлечения информации об удаленных объектах является актуальными.

Цель и задачи исследований

Цель работы заключается в разработке и исследовании новых методов извлечения информации средствами локации об удаленных объектах (наземных, воздушных, подводных объектов техники) в оптическом и радиодиапазоне. Для достижения цели решаются следующие задачи:

- анализ существующих методов радиовидения с помощью РСА, а также методов наблюдения в оптическом диапазоне;

- анализ отражения радиосигнала от объектов техники;

- разработка и исследование новых методов построения изображений объектов и анализ их эффективности при распознавании;

- разработка и исследование новых методов восстановления структурного изображения объекта (в системе координат самого наблюдаемого объекта) на основе анализа пространственного распределения интенсивности отраженного объектом сигнала;

- разработка методов практического применения интерференционных методов в радиодиапазоне;

- разработка и исследование методов формирования изображения объектов, не обладающих достаточным отражением в радиодиапазоне;

- разработка и исследование методов формирования изображения объектов, находящихся под водой.

Методы исследований

Для решения поставленных задач использовались методы и положения:

геометрической оптики, радиолокации, аналитической геометрии, гармонического анализа, дифференциального исчисления, численного анализа, имитационное и статистическое моделирование на ЭВМ.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается в разработке и математическом описании методов формирования структурного изображения удаленного объекта:

1. В радиодиапазоне – метод формирования структурного изображения удаленного объекта на основе анализа амплитудных характеристик отраженного сигнала на апертуре антенны;
2. Способ применения метода Гудмена с использованием нескольких опорных «блестящих» точек на объекте с разными свойствами.
3. Метод использования модулированного оптического излучения при формировании изображения объектов в турбулентной среде, а также радиопрозрачных объектов;
4. Использование модулированного оптического излучения для наблюдения подводных объектов.

Практическая значимость работы

1. Практическая значимость работы состоит в том, что предложенный способ обработки отраженного сигнала позволяет формировать структурное изображение удаленного объекта в условиях турбулентной среды и значительных неконтролируемых смещениях носителя.
2. Предложенный способ обработки также позволяет производить быстрый поиск пропавших и разбившихся самолетов без сложной обработки на базе модернизированных стандартных метео-РЛС самолетов в сложных метеоусловиях с большой поверхностью обзора.
3. В настоящее время отсутствуют методы наблюдения с борта ЛА объектов, находящихся под водой. Разработанный и исследуемый метод измерения параметров удаленных объектов в оптическом диапазоне на радиочастоте позволяет формировать изображение подводных объектов.

4. Интерференционный метод, использующий оптический сигнал, модулированный по интенсивности на радиочастоте, обеспечивает получение изображения объектов, выполненных из радио прозрачных материалов.

5. Большую практическую ценность имеет возможность формирования изображения комплекса «блестящих» в оптическом диапазоне точек, которые характерны для технических объектов, оснащенных разнообразными оптико-электронными приборами и светотехническими устройствами.

Реализация и внедрение результатов работы

Результаты работы внедрены при выполнении проекта в рамках аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы 2006-2008 г» Министерства образования и науки РФ, как существенная часть указанного проекта.

(см. НТО «Исследование фундаментальных основ создания опто-окусто- электронных систем слежения и управления для многоцелевых лазерных комплексов контроля параметров окружающей среды и удаленных объектов» аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2006-2008 годы)», декабрь 2006, раздел 1.4., декабрь 2007, разделы 2, 3, июнь 2007, раздел 4.2).

Результаты работ использованы в 11 опубликованных работах, в том числе в 2-х, рекомендованных ВАК.

Кроме того, разделы работы 4.1, 4.2 используются в учебном процессе МАИ в дисциплинах: «Оптическая и инфракрасная локация», «Обработка сигналов при формировании геометрических образов удаленных объектов» (специальность радиотехника 21.03.02, специализация – оптико-электронные устройства).

По результатам исследований получен патент на полезную модель №69647: «Устройство формирования изображения подводных объектов».

Апробация работы

Основные научные и практические результаты исследований по теме диссертации докладывались и обсуждались на X международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электроника и энергетика» (Москва, МЭИ, 2004); XI международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электроника и энергетика» (Москва, МЭИ, 2005); IV молодежной

научно-технической конференции «Радиолокация и связь – перспективные технологии» (Москва, «Радиофизика», 2005); 4-ой международной конференции «Авиация и космонавтика-2005» (Москва, МАИ, 2005); научно-технической конференции молодых ученых «Информационные технологии и радиоэлектронные системы» (Москва, МАИ, 2007); международной научно-технической конференции "СВЧ техника и телекоммуникационные технологии, Крымико-2007" (Севастополь, 2007), VI молодежной научно-технической конференции «Радиолокация и связь – перспективные технологии» (Москва, «Радиофизика», 2008).

Рассматриваемый метод анализа сигнала был проверен на экспериментальных данных по диаграмме переизлучения самолета B-26 Marauder.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 11 работ, в том числе 2 работы в изданиях, рекомендуемых ВАК России.

Структура и объем работы

Диссертация содержит введение, четыре главы, заключение, список литературы, приложения. Основная часть изложена на 122 страницах машинописного текста, содержит 36 рисунков, 5 таблиц. Список литературы содержит 52 наименования. Приложения занимают 32 страницы.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Амплитудное распределение сигнала на апертуре антенны радиоприемной системы не зависит от случайных изменений сдвигов фазы сигнала в разных точках приемной антенны и содержит необходимую информацию об относительном расположении отражающих элементов конструкции лоцируемого объекта.

2. Возможна реализация метода Гудмена, предполагающего наличие хорошо отражающей излучение точки, достаточно удаленной от наблюдаемого объекта, если такой точки нет, а на самом объекте имеются «блестящие» точки с различными свойствами (например, во временной области).

3. Возможно использование огибающей амплитудно-модулированного сигнала в качестве несущей частоты для реализации метода голограммы интенсивности и метода Гудмена.

4. Использование излучения оптического диапазона с амплитудной модуляцией на радиочастоте обеспечивает комплексирование достоинств оптического и радио диапазонов: широкий диапазон однозначных измерений положений отражающих точек с высокой направленностью и определенностью точек формирования отраженных сигналов оптического диапазона и их способностью распространения в водной среде и отражения от радиопрозрачных материалов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель и задачи исследований для ее достижения, раскрыты научная новизна, практическая ценность, приведены результаты реализации и апробации работы, основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** проведен анализ методов радиовидения. В случае наблюдения наземного объекта с помощью самолетного локатора для получения высокой разрешающей способности применяется метод синтезированной апертуры. В реальных условиях при синтезировании апертуры возникают искажения траекторного сигнала, обусловленные различными дестабилизирующими факторами. К ним, в первую очередь, относятся неустойчивости движения летательного аппарата (ЛА) - носителя радиолокационной станции с синтезированной апертурой (РСА), среды распространения электромагнитных волн и приемопередающей аппаратуры РСА. Искажениям подвергаются как амплитуда, так и фаза траекторного сигнала. Обычно амплитудные флуктуации траекторного сигнала за время синтезирования невелики и их влиянием можно пренебречь.

Компенсация траекторных неустойчивостей (случайные отклонения от траектории) может осуществляться с помощью инерциальной навигационной системы (ИНС). Она обеспечивает измерение параметров движения носителя на интервале синтезирования с высокой точностью. Проводится расчет фазового поправочного множителя и последующая коррекция фазы опорного или отраженного сигнала. Часто требования по точности датчиков ИНС не выполняются, ошибки измерения параметров движения носителя РСА, имеющие случайный характер, приводят к наличию в полученном радиолокационном изображении (РЛИ) некомпенсированной фазовой составляющей.

Также используются алгоритмы автофокусировки, в которых информация о фазовых неустойчивостях для их компенсации извлекается из самого траекторного сигнала.

Значительное место в первой главе занимает анализ методов построения и описания изображений объектов, алгоритмов распознавания.

Структурное представление изображений позволяет существенно сократить объем необходимой для хранения изображения памяти. Оно основано на априорном выявлении в обрабатываемом изображении важных и существенных элементов и их структурных взаимосвязей и подборе удобных и компактных способов их описания. Структурное изображение наблюдаемого объекта целесообразно создавать на основе отдельных изображений элементов его конструкции, дающих сильный отраженный сигнал, то есть формирующих «блестящие» точки объекта.

Следует подчеркнуть, что положение «блестящих» точек и мощность отраженной волны остаются стабильными при значительных изменениях углов облучения, наблюдения и длины волны. Сохраняемость структурного изображения в большом диапазоне углов ракурса наблюдаемых объектов является важным моментом для решения задачи распознавания. Она необходима, чтобы при сравнении изображения с эталоном избежать трудоемкой процедуры перебора с малым шагом дискретизации по углам наблюдения, приводящей к большим вычислительным затратам.

Анализируется возможность описания структуры объекта через бинарные отношения ее элементов.

Объект наблюдения A можно представить в виде конечного множества элементов a_i ($A = \{a_i\}_{i=1}^m$). Каждый i -й элемент характеризуется параметрами: независимые сигнальные параметры B_i и зависимые параметры $\gamma_{i,j,...m}$ (параметры связи с элементами $a_i, a_j, \dots, a_m$ множества A).

С учетом того, что при автоматизированной обработке сигналов используются не все элементы множества, а только некоторые из них, а также структурные связи между ними, удаленный объект наблюдения можно представить в виде A :

$$A = \bigcup_{i,j,...l}^n (B_i, B_j, \dots, B_l, \gamma_{i,j,...l}), \quad (1)$$

где $i, j, \dots, l = 1, 2, \dots, n$ – индексы используемых элементов структурного представления множества A ; $\gamma_{i,j,...l}$ – структурная связь (зависимый параметр) элементов $a_i, a_j, \dots, a_l$.

Бинарные отношения γ_{ij} являются простейшими отношениями и характеризуются наиболее простым техническим исполнением.

При рассматриваемом структурном представлении объекта в виде небольшого числа «блестящих» точек и стабильности их положения при существенном изменении углов облучения, наблюдения целесообразно использование классического корреляционного алгоритма распознавания. При обработке в ЭВМ для оценки близости наблюдаемого изображения к эталонному может быть использован корреляционный функционал вида

$$R = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i \bar{v}_i - \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i \right) \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{v}_i \right)}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(v_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i \right)^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\bar{v}_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{v}_i \right)^2}}, \quad (1)$$

(где N – размерность наблюдаемого вектора v и вектора эталонного изображения $\bar{v}$), который представляет собой выборочный нормированный и центрированный коэффициент корреляции векторов v и $\bar{v}$.

Во **второй главе** разрабатывается и анализируется новый метод радиовидения на основе метода голограммы интенсивности.

В оптическом диапазоне для устранения влияния турбулентности атмосферы на трассе распространения излучения используются интерференционные методы. Метод голограммы интенсивности позволяет получить функцию автокорреляции объекта, по которой непосредственное восстановление объекта возможно лишь путем подбора его начального вида и рекурсивного приближения к оригиналу, что трудоемко и требует значительных вычислительных затрат.

Исследование структуры голограммы интенсивности показывает, что в зоне Фраунгофера ее можно представить как линейную сумму пространственных гармоник,

каждая из которых обязана своим появлением взаимодействию сигналов от различных пар «блестящих» точек i и j удаленного объекта.

Пространственная гармоника G_{ij} , образованная i и j отражателем, имеет вид:

$$G_{ij} = 2 \frac{E^2 A_i A_j}{(\lambda z)^2} \cos \left[k \left(\frac{x_i - x_j}{z} \mu + \frac{y_i - y_j}{z} \nu + 2\delta z_{ij} \right) \right], \quad (3)$$

где E – амплитуда поля в области отражающих точек, A_i , A_j – коэффициенты отражения i -й и j -й точек; λ – длина волны излучения; z – расстояние от плоскости приема $\mu\nu$ до области отражающих точек; $k=2\pi/\lambda$; x_i , x_j , y_i , y_j – координаты i -й и j -й точек по осям μ и ν соответственно в плоскости xy , связанной с пространством отражателей; δz – проекция расстояния между i -й и j -й точками на ось z (ось наблюдения). Здесь источник излучения находится в точке $\mu=0$, $\nu=0$, $z=0$.

Анализируется возможность применения метода на основе голограммы интенсивности в радиолокации при обработке сигнала РСА. В этом случае информационная составляющая сигнала при некоторых ограничениях представляет собой линейную сумму слагаемых вида:

$$G_{ij} = CA_i A_j \cos \left(\varphi_0 - \frac{4\pi}{\lambda r_0} (\Delta x V_\mu \sin \beta + \Delta y \cdot V_\nu) t \right), \quad (4)$$

где C – некоторый коэффициент, определяемый мощностью передатчика, дальностью до цели, коэффициентом усиления антенны, длиной волны, r_0 – дальность до цели при $t=0$ (середина интервала накопления сигнала от цели), V_μ , V_ν – проекции вектора скорости V ЛА на соответствующие оси, β – угол наблюдения в горизонтальной плоскости, Δx , Δy – расстояние между отражателями i и j по оси x и y соответственно.

Полученные аналитические выражения и графические зависимости позволяют оценить потенциальное разрешение структурного изображения, необходимые значения параметров для его обеспечения (прежде всего время синтеза T_c (при заданных V , r_0 , λ , β)), ограничения, обусловленные тем, что объект наблюдения находится не в зоне Фраунгофера синтезированной апертуры и связанная с этим невозможность пренебрежения сферичностью фронта волны, влияние траекторных нестабильностей носителя РЛС.

Выделив с помощью спектрального анализа параметры отдельных гармоник, по ним можно определить относительное положение отражателей («блестящих» точек) и их коэффициенты отражения, и, таким образом, восстановить структурное изображение объекта. Получаемая при этом двузначность изображения не играет существенной роли в задаче распознавания наблюдаемых объектов.

Формирование структурного изображения удаленного объекта осуществляется с помощью амплитудной фильтрации гармоник на нескольких интервалах синтеза с последующим совместным анализом их параметров, а именно – амплитуды и частоты. Изображение формируется в системе координат наблюдаемого объекта (а не в системе координат наблюдателя), что сокращает число вариантов перебора по углам ракурса в процедуре распознавания.

В результате амплитудной селекции гармоник и их анализа формируются $n(n-1)/2$ (где n – число отражателей) векторов $\gamma_{ij} = \{|\Delta x_{ij}|, |\Delta y_{ij}|\}$, отображающих бинарные отношения между i и j отражателями. Вектору $\gamma_{ij} = \{|\Delta x_{ij}|, |\Delta y_{ij}|\}$ соответствует два возможных относительных положения отражателей i и j в плоскости xy (рис. 1 (а), (б)). Положение

точки i выбирается произвольно, так как определяются относительные координаты точек i и j (рис. 1 (в)).

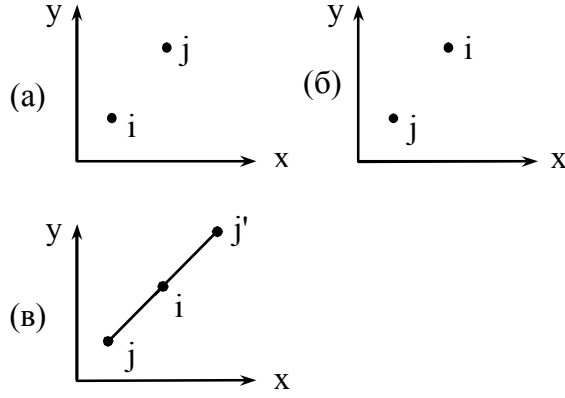


Рис. 1

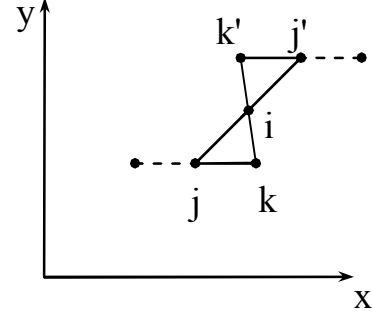


Рис. 2

Три отражателя образуют три гармоники G_{ij} , G_{ik} , G_{jk} , по результатам анализа которых в трех интервалах накопления формируются три вектора γ_{ij} , γ_{ik} , γ_{jk} . По ним можно двузначно зафиксировать относительные положения точек i , j , k (рис. 2). Двузначность обуславливается двузначностью размещения точки j относительно отражателя i на основании $\gamma_{ij} = \{|\Delta x_{ij}|, |\Delta y_{ij}|\}$. Положение k -ой точки может быть определено на основании γ_{ik} , γ_{jk} (рис. 2). Таким образом, восстанавливается положение каждой следующей k -ой точки относительно наиболее ярких i и j .

Проанализирована возможность определения расстояния между «блестящими» точками вдоль оси z . Начальная фаза гармоники пропорциональна Δr разности хода сигнала между ними в момент времени $t=0$, которая в свою очередь $\Delta r \approx \Delta z$. Таким образом $\varphi_0 = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r \approx \frac{4\pi}{\lambda} \Delta z$. Неоднозначность фазовых измерений приводит к неоднозначности определения координаты z .

$$\Delta z \approx (\varphi_0 \pm 2\pi n) \frac{\lambda}{4\pi} = \varphi_0 \frac{\lambda}{4\pi} \pm n \frac{\lambda}{2} = \Delta z_0 \pm n \frac{\lambda}{2}, n=0,1,2,\dots,$$

где Δz_0 – расстояние, соответствующее главному значению фазы (при $n=0$).

Пусть на основании операции $Z_{ijk}^{(z)}$ в пространстве (x, y, z) восстанавливается точка k множества N , размещаемого относительно точки i (точка отражения). Образующая при изменении j последовательность операций $Z_{ijk}^{(z)}$ дает ряд возможных (разрешенных ею) положений искомой точки. Координата точки $\mathcal{G}^{(z)} = \{x_k, y_k, z_k\}$ в пространстве (x, y, z) равна $\mathcal{G}^{(z)} = \bigcap_{j \neq i, k}^n Z_{ijk}^{(z)}$. Если $n \rightarrow \infty$, то координата z_k определяется однозначно.

На самом деле $\Delta r \approx \Delta z \left(1 - \frac{h^2}{2 \cdot r_0^2} \right) - \frac{\Delta y h}{r_0}$. Слагаемым $\frac{\Delta y h}{r_0}$, где h – высота полета, пренебречь нельзя, так как при $\Delta r = 50 \text{ км}$, $\Delta y = 5 \text{ м}$, $h = 1000 \text{ м}$ $\frac{\Delta y h}{r_0} = \frac{5 \cdot 10^3}{5 \cdot 10^4} = 0,1 \text{ м} > \lambda$ (при $\lambda = 3 \text{ см}$).

Значение $|\Delta y|$ может быть определено из рассмотренного ранее анализа периодов гармоник, знак же $|\Delta y|$ не известен, что существенно затрудняет процедуру определения расстояния между «блестящими» точками вдоль оси z . Кроме того, точность определения $|\Delta y|$ не удовлетворяет рассматриваемой задаче восстановления положения отражателей вдоль оси z .

Таким образом, из-за малой длины волны и большой степени неоднозначности восстановление положения отражателей вдоль оси z на практике труднореализуемо.

Структурная схема системы, реализующая предлагаемый метод, представлена на рис. 3.

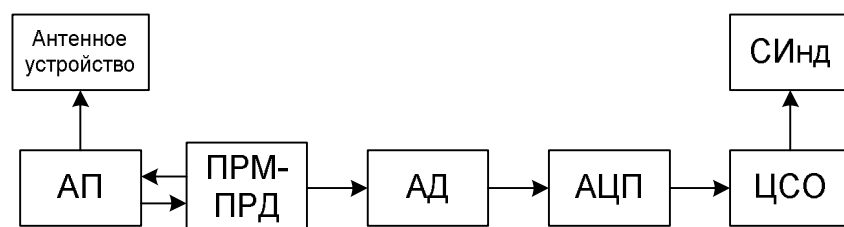


Рис. 3. Структурная схема информационной системы

Высокочастотная часть схемы состоит из передатчика (ПРД), антенного устройства, приемника (ПРМ) и квадратичного амплитудного детектора (АД). Сигнал передатчика (ПРД) через антенный переключатель (АП) попадает в антенну и излучается в направлении наблюдаемого объекта.

Отраженный сигнал через приемник (ПРМ) и квадратичный амплитудный детектор, поступает на АЦП, где преобразуется в цифровую форму. С выхода аналого-цифрового преобразователя АЦП сигнал поступает в цифровую систему обработки (ЦСО), которая представляет собой программируемый процессор сигналов. В блоке ЦСО осуществляется выделение гармоник $\{G_{ij}\}$ и их анализ в соответствии с рассматриваемым способом.

Было проведено моделирование на ЭВМ по восстановлению положения вдоль оси x отражателей и их яркости в одном элементе по дальности. Отражатели вдоль оси x размещались по равномерному закону распределения вероятности. Отраженный сигнал моделировался как сумма сигналов от отражателей $u(t) = \sum_i U_i \exp\left(-\frac{4\pi}{\lambda} r_i(t)\right)$, где $r_i(t)$ – текущее расстояние от фазового центра антенны (ФЦА) ЛА до i -го отражателя. Амплитуды сигнала U_i , а также отсчеты шумового сигнала генерировались по закону Рэлея. Выходной сигнал квадратичного АД математически моделировался как $u_{\text{д.кв}}(t) = \text{Re}^2(u(t)) + \text{Im}^2(u(t))$. Перед дискретным преобразованием Фурье (ДПФ) сигнала осуществлялось вычитание постоянной составляющей, величина которой велика и затрудняет анализ спектра в области низких частот. Для уменьшения уровня боковых лепестков сигнала после ДПФ использовалась амплитудно-весовая обработка. Затем

осуществлялась операция ДПФ сигнала с добавлением $7N_{\text{отсч.}}$ нулей ($N_{\text{отсч.}}$ – число временных отсчетов сигнала) для последующего анализа спектра сигнала с целью селекции гармоник – определения их частот (номера частотного отсчета) и амплитуд.

Селекция гармоник осуществлялась путем анализа ширины областей ненулевых информационных отсчетов спектра. После выделения гармоник, их ранжирования по убыванию амплитуды осуществлялась процедура восстановления положения отражателей вдоль оси x в соответствии с рассмотренным выше методом. Под правильным восстановлением структурного изображения понималось определение положения всех искомых точек объекта по оси x с определением их яркости. Вероятность правильного восстановления определялась как отношение количества правильно восстановленных изображений «блестящих» точек к общему количеству циклов прогона программы по восстановлению изображения.

Результаты моделирования представлены на рис. 4. Здесь представлено семейство кривых для разного количества отражателей. Под отношением сигнал/шум здесь понимается отношение среднеквадратического отклонения (СКО) амплитуды сигнала и шума.

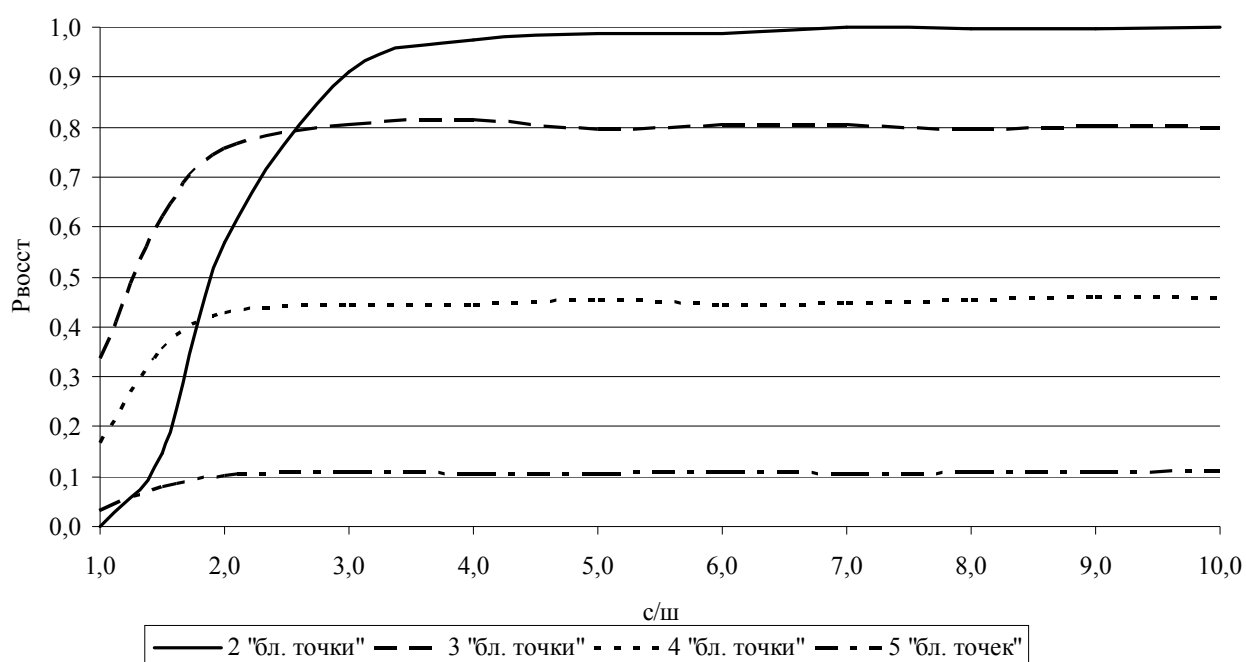


Рис. 4

Из рис. 4 видно, что при отношении с/ш больше, чем 2,5, вероятность правильного восстановления не изменяется с увеличением СКО амплитуды сигнала по отношению шуму. Качество восстановления положения отражателей и их яркости зависит от качества селекции гармоник и реализации процедуры обработки.

Из рис. 4 видно, что вероятность определения относительного положения двух отражателей стремится к единице при отношении с/ш больше четырех. Однако при некоторых меньших значениях с/ш она меньше величины правильного восстановления объектов из трех, четырех и пяти отражателей. Это объясняется тем, что при относительно высоком шуме в спектре появляются ложные максимумы, принимаемые за гармоники. Реальные же гармоники связаны между собой положением на частотной оси

и амплитудами, что при большем их количестве и учете при обработке их взаимосвязи позволяет как бы увеличить отношение с/ш.

Проведенное моделирование позволяет оценить эффективность рассмотренного метода для восстановления структурного изображения объекта.

В качестве примера подтверждения рассматриваемого метода приводится анализ диаграммы переизлучения известного двухмоторного самолета B-26 Marauder (рис. 5). Производится расчет расстояния между «блестящими» точками при наблюдении спереди, предположительно образованными двумя двигателями самолета и носовой частью фюзеляжа, в направлении, перпендикулярном линии наблюдения.

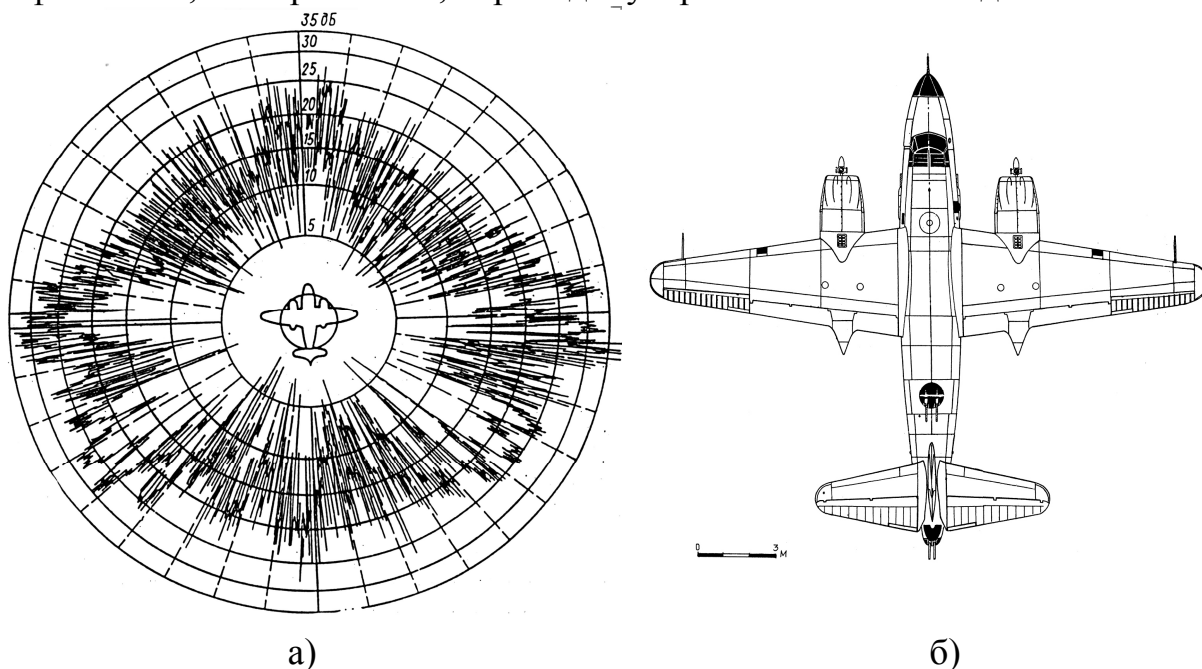


Рис. 5 а) Диаграмма переизлучения самолета B-26 Marauder ($\lambda=10$ см)
б) Конструкция самолета B-26 Marauder (вид сверху)

Рассчитанные по диаграмме переизлучения расстояния между указанными элементами самолета показывают хорошее совпадение с реальными размерами.

Предлагается практическое приложение рассматриваемого выше интерференционного метода получения информации об удаленных объектах – задача поиска пропавших самолетов.

Основной целью поиска является быстрое обнаружение объекта, которое затруднено при обычно используемом визуальном методе обзора при облете районов поиска на малой высоте ввиду ограниченности области обзора и необходимости, вследствие этого, совершать много полетов, чтобы перекрыть большую площадь. Радиолокационный обзор поверхности с большой высоты с регистрацией интерференционной картины, формируемой с элементов разрешения с большими линейными размерами, позволяет, во-первых, существенно сократить время поиска, во-вторых, проводить поиск в сложных метеоусловиях и в ночное время суток, при которых метод визуального поиска не работает.

Анализируется возможность применения метеонавигационной радиолокационной станции «Гроза» для решения данной задачи.

В третьей главе разрабатывается метод радиовидения на основе метода Гудмена. Метод Гудмена является частным случаем метода голограммы интенсивности, но, в отличие от последнего, позволяет получить изображения удаленного объекта, а не его

автокорреляционную функцию при наличии точечного отражателя вблизи объекта наблюдения.

В качестве примера объектом наблюдения служил двухмоторный самолет, при работе двигателей которого возникают вибрации (левый двигатель с частотой f_1 , правый – f_2). Следовательно, коэффициент отражения «блестящей» точки, образованной выпуклой поверхностью двигателя будет изменяться во времени с частотой f_1 (f_2). Зависимость коэффициента отражения от времени позволяет определить, какие из гармоник образованы левым, а какие правым двигателем, т.е. разделить эти гармоники. Такое разделение гармоник можно осуществить с помощью временных фильтров.

Для восстановления относительного положения «блестящих» точек, расположенных на левом (правом) крыле, используется метод Гудмена. В этом случае «блестящая» точка, образованная правым (левым) двигателем, является точечным отражателем, необходимым, в соответствии с методом Гудмена, для получения изображения «блестящих» точек, расположенных на левом крыле (правом крыле).

Чтобы исключить влияние близких к двигателям «блестящих» точек, которые усложняют восстанавливаемое изображение, используется высокочастотная фильтрация (исключаются низкочастотные гармоники) на выходе каждого из двух временных фильтров.

На выходе ВЧ фильтров в соответствии с методом Гудмена осуществляется операция дискретного преобразования Фурье (ДПФ) и стыковка результатов друг с другом.

В соответствии с вышесказанным схема обработки распределения интенсивности сигнала выглядит следующим образом (рис. 6).

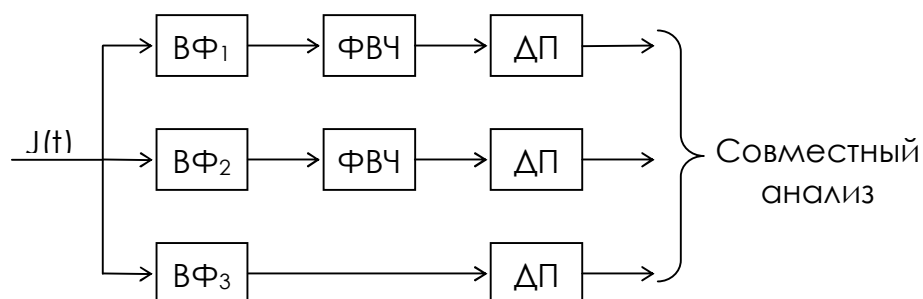


Рис. 6

В **четвертой главе** предлагается метод наблюдения удаленных объектов, не обладающих достаточно сильным отражением энергии в радиодиапазоне (например, неметаллические беспилотные летательные аппараты, а также наблюдение подводных объектов) при помощи информационных систем оптического диапазона с гармонической модуляцией излучения.

Использование в качестве носителя информации огибающей оптического излучения значительно уменьшает влияние искажений, вызываемых неоднородностями и турбулентностью на трассе распространения излучения.

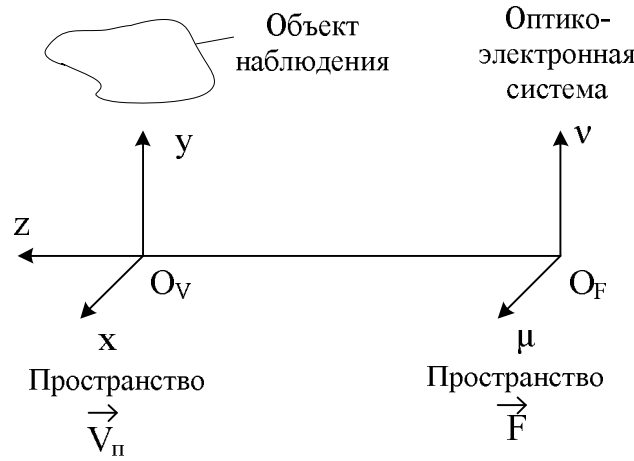


Рис. 7. Взаимное расположение систем координат в пространстве предмета $\vec{V}_n$ и в пространстве оптико-электронной системы $\vec{F}$

Использование излучения оптического диапазона с гармонической амплитудной модуляцией (АМ) или модуляцией по интенсивности (МИ) на радиочастоте уменьшает степень неоднозначности при определении бинарных отношений элементов структуры удаленного объекта в направлении оптической оси z (рис. 7), обусловленной малой длиной волны оптического сигнала.

Формирование переменной составляющей, отображающей бинарное отношение i -го и j -го элементов γ_{ij} , в пространстве $\vec{F}$ (рис. 7) происходит аналогично сложению полей на несущей частоте излучения: например, для отражённых от двух точек сигналов с гармонической модуляцией по интенсивности $J = J_0(1 + m \sin 2\pi f_M t)$ (J – интенсивность излучения) при некогерентном суммировании сигналов на фоточувствительной поверхности фотодетектора результирующая интенсивность равна

$$J_\Sigma = J_{0i} + J_{0j} + mJ_{0i} \sin(2\pi f_M t + \varphi_i) + mJ_{0j} \sin(2\pi f_M t + \varphi_j) = J_{0\Sigma} + J_{M\Sigma} \sin(2\pi f_M t + \varphi_\Sigma); \quad J_{0\Sigma} = J_{0i} + J_{0j} \quad (5)$$

$$J_{M\Sigma} = \sqrt{(J_{mi})^2 + (J_{mj})^2 + 2J_{mi}J_{mj} \cos(\varphi_j + \varphi_i)};$$

$$\operatorname{tg} \varphi_\Sigma = \frac{J_{mi} \sin \varphi_i + J_{mj} \sin \varphi_j}{J_{mi} \cos \varphi_i + J_{mj} \cos \varphi_j}; \quad J_{mi} = mJ_{0i}; \quad J_{mj} = mJ_{0j}$$

Исследуется влияние фазовых искажений σ_ϕ на относительную яркость возникающих с ростом величины искажений ложных точек в пространстве $\vec{V}_n$. Увеличение числа суммируемых сигналов приводит к ослаблению влияния фазовых искажений (сравнивались апертуры с числом элементов 32×32 и 64×64), однако пороговые значения флуктуаций фазы $\sigma_{\phi n}$, определяемые как область резкого возрастания зависимости относительной яркости ложных точек от σ_ϕ , практически не изменяются.

Определен критерий выбора частоты модуляции f_M на основе величины предельных флуктуаций фазы.

Определено пороговое значение флуктуаций фазы, равное $\sigma_{\phi n} = (2 - 2.5)$ рад.

Неоднородности и турбулентность на трассе распространения электромагнитной волны приводят к тому, что помимо рассеяния и поглощения излучения наблюдаются изменения δt во времени его распространения и связанные с ними флуктуации фазы на трассе распространения ($\sigma_{\phi \text{тр}}$), оказывающие существенное искажающее влияние на фазу сигнала. Очевидно, что чем ниже частота электромагнитного излучения, тем меньше

отношение $\delta t/T$ (T – период излучения) и, следовательно, меньше среднеквадратическое значение флуктуаций фазы на трассе. Поэтому использование в качестве носителя информации огибающей оптического излучения, частота которой на несколько порядков ниже (радиодиапазон) и, следовательно, отношение $\delta t/T_M$ (T_M – период модуляции) существенно меньше, значительно уменьшает влияние искажения фазы сигнала, вызываемых неоднородностями и турбулентностью на трассе его распространения.

Среднеквадратическая величина флуктуаций фазы равна

$$\sigma_{\phi\Sigma} = \sqrt{\sigma_{\phi,TP}^2 + \sigma_{\phi,\Phi}^2}, \quad (6)$$

где $\sigma_{\phi\Phi}$ – среднеквадратические значения флуктуаций фазы из-за ошибок в измерении фазы, обусловленных шумами электронного тракта и погрешностями измерителя фазы.

Предельные значения f_M обусловлены необходимостью выполнения условия $\sigma_{\phi\Sigma} < \sigma_{\phi\Pi}$.

Произведена оценка разрешения двух отражателей рассматриваемым в работе методом. Например, при $\Delta x = 1$ см, расстоянии между окнами приема сигнала $b = 20$ м и $f_M > 0,2$ ГГц разность фаз от двух отражателей превышает $0,1^\circ$, что больше погрешности измерителей фазы.

Актуальной задачей является наблюдение морских подводных объектов, что в сантиметровом радиодиапазоне является невозможным. Излучение оптического диапазона дает возможность наблюдения объектов под водой, однако, даже небольшое волнение морской поверхности вызывает сильное искажение фазовой составляющей сигнала. По результатам моделирования на рис. 8 представлены значения относительной разности времени распространения сигнала $\delta t/T_M$ при наблюдении объекта в воде на разной глубине l на дальности 500 м. Из-за волнения морской поверхности принимаемый разными окнами сигнал проходит разное расстояние в воде. При этом возникает задержка одного сигнала относительно другого из-за разной скорости распространения света в воде и в воздухе. Здесь расстояние между окнами приема сигнала $b = 20$ м, амплитуда морской волны $A_{MB} = 1$ м, период $T_{MB} = 5$ м (рис. 8 (а)), амплитуда морской волны $A_{MB} = 0,1$ м, период $T_{MB} = 1$ м (рис. 8 (б)).

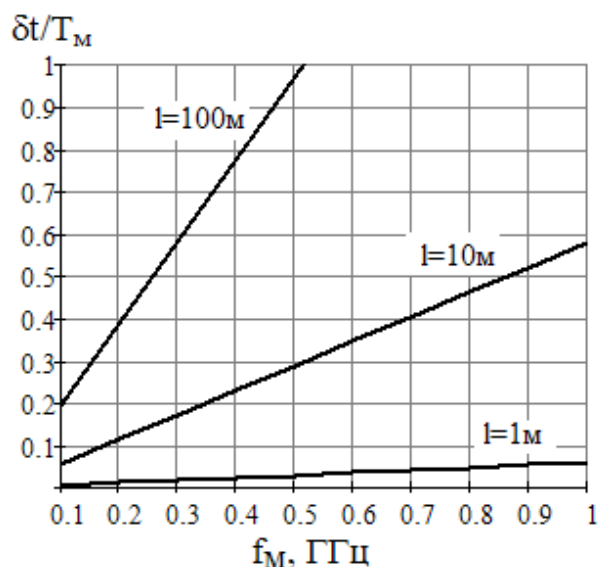


Рис. 8 (а)

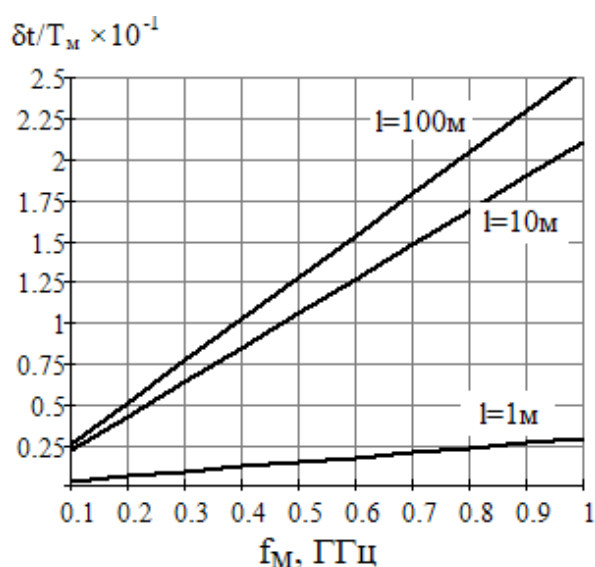


Рис. 8 (б)

Значения относительной разности времени распространения сигнала при а) $A_{MB} = 1$ м, $T_{MB} = 5$ м, б) $A_{MB} = 0,1$ м, $T_{MB} = 1$ м.

Приведенные значения $\delta t / T_M$ позволяют качественно оценить ожидаемые результаты по восстановлению изображения подводных объектов.

Описана возможность по созданию синтезированной апертуры с помощью оптических систем с малым числом каналов в зоне Фраунгофера.

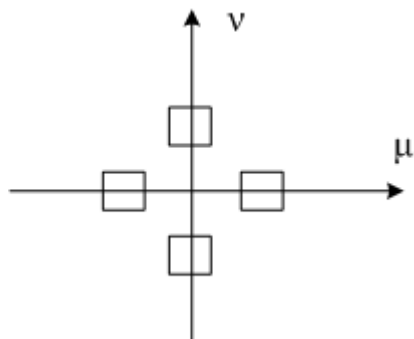


Рис. 9. Синтезированная апертура $f_{M1}, f_{M2} \dots f_{Mm}$

На рис. 9 представлена четырёхоконная система, позволяющая создать крестообразную синтезированную апертуру по осям μ и ν . Для этой цели частота f_M изменяется. Так как отражение сигнала от объекта определяется несущей частотой, т.е. частотой оптического излучения, то диаграмма отражения не изменяется при разных f_M . Изменение же частоты f_M эквивалентно смещению окон по осям μ и ν . При использовании m частот модуляции (т.е. имеется набор значений $f_{M1}, f_{M2} \dots f_{Mm}$) в пространстве $\vec{F}_M$ реализуется многооконное преобразование с количеством окон $2m$ по осям μ и ν .

ОСНОВНЫЕ ВЫВОодЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработан способ формирования структурного изображения удаленного объекта на основе метода голограммы интенсивности. Предложенный метод заключается в формировании структурного изображения наблюдаемого объекта на основе пространственного распределения интенсивности сигнала. Получены необходимые зависимости и соотношения для определения разрешающей способности системы и требований к ее энергетике.

2. Описана методика обобщенного описания структурного изображения наблюдаемого объекта в его системе координат на основе использования бинарных отношений между элементами конструкций объекта, дающими сильный отраженный сигнал.

3. Сделана оценка эффективности рассматриваемого метода на базе проведенного моделирования по определению положения «блестящих» точек и их яркости.

4. Подтверждена практическая ценность формирования некоординатной информации по методу голограммы интенсивности на примере определения геометрических параметров самолета В-26.

5. Предложено практическое приложение интерференционного метода получения информации об удаленных объектах – поиск пропавших самолетов, позволяющий, во-первых, существенно сократить время поиска, во-вторых, проводить поиск в сложных метеоусловиях и в ночное время суток, при которых метод визуального поиска невозможен.

6. Разработан способ формирования структурного изображения удаленного объекта на основе «окрашенных» «блестящих» точек и метода Гудмена.

7. Разработан метод регистрации параметров удаленных объектов с помощью оптических систем с модулированным по интенсивности излучением, позволяющий решать следующие задачи:

формирование изображения объектов, не обладающих достаточным отражением в радиодиапазоне;

формирование изображения объектов, находящихся под водой;

формирование изображения объектов, обладающих «блестящими» точками в оптическом диапазоне (оптико-электронные приборы обычной и специальной техники). Определены требования по выбору частоты модуляции.

8. Разработана методика расчета ЭПР реальных объектов, содержащих хорошо отражающие элементы конструкции с известными характеристиками отражающих свойств, позволяющая проводить быструю оценку диаграммы переизлучения, не требующая больших вычислительных затрат.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России

1. Г.В. Меркишин, Д.С. Потапов. Оптико-электронные информационные системы с модулированным излучением. //Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2007. – № 11.

2. М.С. Орлов, С.А. Винокуров, Д.С. Потапов. Расчёт параметров зон обзора поверхности Земли и их связь с размерами поля отображения бортового индикатора в авиационных РЛС. - М.: Радиотехника, 2007 – №11.

Публикации в других изданиях

3. Д.М. Гончаров, М.А. Наумов, Д.С. Потапов, И.В. Сливин. «Анализ и синтез радиосистем поиска пропавших самолетов». Радиоэлектроника, электроника и энергетика // Десятая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тез. докл. – М.:МЭИ, 2004.

4. Потапов Д.С., Меркишин Г.В. «Система радиовидения технических объектов (объектов с металлической поверхностью) на базе амплитудной информации». Радиоэлектроника, электроника и энергетика // Одиннадцатая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тез. докл. – М.:МЭИ, 2005. Т. 1.

5. Г.В. Меркишин, Д.С. Потапов. «Комплексные системы формирования изображений удаленных объектов». 4-я международная конференция «Авиация и космонавтика-2005». 10 – 13 октября 2005 года. Москва. Тезисы докладов. – М.: Изд-во МАИ, 2005. – 168 с.

6. Г.В. Меркишин, В.В. Попов, Д.С. Потапов. «Системы радиовидения с повышенным разрешением на основе голограммы интенсивности и метода Гудмена». Труды IV молодежной научно-технической конференции «Радиолокация и связь – перспективные технологии». – М.: 17 – 18 марта, ОАО «Радиофизика», 2005.

7. Г.В. Меркишин, Д.С. Потапов. «Система радиовидения технических объектов». Проектирование, конструирование и производство авиационной техники / Под ред. Проф. Ю.Ю. Комарова. – М.: Изд-во МАИ, 2005. – 340 с.: ил.

8. Афонин К. Н., Евстигнеев В. Л., Меркишин Г. В., Потапов Д. С. «Интерференционные системы для определения геометрических параметров удаленного объекта». Конференция КрыМиКо'2007. Тезисы докладов. – Севастополь, 2007.

9. Афонин К. Н., Евстигнеев В. Л., Меркишин Г. В., Потапов Д. С. «Влияние помех в быстродействующих интерференционных измерителях». Конференция КрыМиКо'2007. Тезисы докладов. – Севастополь, 2007.

10. Г.В. Меркишин, В.В. Попов, Д.С. Потапов. «Системы радиовидения на основе метода голограммы интенсивности». Труды VI молодежной научно-технической конференции «Радиолокация и связь – перспективные технологии». – М.: ОАО «Радиофизика», 2008.

11. Г.В. Меркишин, В.В. Попов, Д.С. Потапов. «Системы видения под водой с модулированным оптическим излучением». Труды VI молодежной научно-технической конференции «Радиолокация и связь – перспективные технологии». – М.: ОАО «Радиофизика», 2008.

12. Г.В. Меркишин, Д.С. Потапов. «Устройство формирования изображения подводных объектов». Патент на полезную модель №69647.