

**БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

Для служебного пользования

Инв. № 33/605

Экз. № 56

УДК 621.396.96

**Ивлев Игорь Игоревич**

**ЗАЩИТА ПОЛУАКТИВНОЙ РЛС С ТЕЛЕВИЗИОННЫМ ПОДСВЕТОМ  
ОТ НЕПРЕДНАМЕРЕННЫХ ПОМЕХ**

**Специальность 05.12.21 – радиотехнические системы специального  
назначения, включая технику СВЧ и  
технологии их производства**

**Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук**

**Минск – 2000**

Работа выполнена в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники.

Научный руководитель –

доктор технических наук, профессор Охрименко А.Е.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Чердынцев В.А.

кандидат технических наук Драгун В.С.

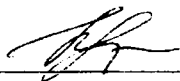
Оппонирующая организация – Военная академия Республики Беларусь.

Защита состоится 29 июня 2000 г. в 14.00. на заседании совета по защите диссертаций Д.02.15.02 при Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники, г. Минск, ул. П. Бровки, д.6, тел. 239-89-89.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке БГУИР.

Автореферат разослан 26 мая 2000 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций



Тарченко Н.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** В связи с резким повышением требований к РЛС в 50-х и 60-х годах в ряде случаев стало невозможным использование совмещённой РЛС с расположенными рядом приёмником и передатчиком, что привело к появлению РЛС с разнесёнными передатчиком, приёмником, передающей и приёмной антеннами. У одних РЛС передающая и приёмная позиции располагаются недалеко друг от друга, у других – на расстояниях в сотни километров. В настоящее время развитие радиолокационной техники (разработка методов формирования и обработки сложных сигналов, фазированных антенных решёток, голографических методов обработки) и повышение требований к РЛС (обеспечение высокой разрешающей способности и высокой помехоустойчивости в условиях организованных помех) приводят к тому, что разработчики РЛС всё больше обращаются к варианту расположения передающего и приёмного устройств, когда они разнесены на значительное расстояние.

Для наименования радиолокационной станции с разнесёнными в пространстве приёмником и передатчиком в современной литературе применяются два термина: разнесённая радиолокационная станция; двухпозиционный, или бистатический радиолокатор. Так как в ряде случаев радиолокационная система имеет число позиций больше двух, часто применяется термин "многопозиционная" РЛС.

В связи с бурным развитием в настоящее время всевозможных связных, вещательных, навигационных и пр. радиотехнических систем, закономерным является вопрос: возможно ли использование источников уже существующих электромагнитных полей в качестве передающих устройств бистатических или многопозиционных РЛС. Несомненным преимуществом таких РЛС является то, что они, используя уже существующее электромагнитное излучение, не вызывают новых экологических проблем, дешевле в производстве и эксплуатации в сравнении с обычными радиолокационными системами.

Особенно привлекательным в этой связи является использование электромагнитного поля телевизионных передатчиков. Действительно, телевизионные передатчики имеют сравнительно большие мощности излучения, работают в достаточно освоенном диапазоне длин волн (МВ и ДМВ), высоты передающих антенн измеряются сотнями метров. Фактически непрерывное телевизионное поле покрывает территории всех индустриально развитых стран, в том числе и территорию Республики Беларусь, вещание осуществляется круглосуточно (или почти круглосуточно). Телевизионный сигнал является достаточно информативным как с точки зрения определения скорости движения источника отраженного сигнала, так и измерения расстояния до него.

В 90-е годы научные коллективы разных стран обращались к идее использования телевизионного сигнала, как радиолокационного сигнала подсвета. В 1996 г. французскими учёными отмечалось, что «большое количество TV-передатчиков позволяет в любом месте обнаруживать самолёты с применением чисто пассивных радиолокаторов, которые невозможно обнаружить и уничтожить. Однако на пути реализации этой идеи имеется проблема, которая заключается в том, что отражённый сигнал мал по сравнению с поступающим прямым сигналом от TV-передатчика».

В 1997 году в печати сообщалось об исследованиях в этой области компании Thompson. Её разработчики также отмечают выделение отражённых от цели сигналов на фоне сигналов непосредственного излучения телепередатчиков как главную проблему. В настоящее время специалистами Thompson создана экспериментальная приёмная станция в стационарном варианте и проведены её успешные испытания. Данные о точности измерения координат и скоростей движения воздушных целей не стали достоянием гласности, однако, по заявлению руководителей проекта, они сопоставимы с характеристиками классических РЛС обзора воздушного пространства. Несмотря на то, что, по мнению разработчиков, французское военное руководство на текущий момент не проявляет должного внимания к проекту, будущее его оптимистично. Одним из действенных аргументов в пользу этого является невысокая стоимость системы, так как при её создании применяются достаточно разработанные технологии радио и телевидения. В частности, при проведении эксперимента в приёмной станции использовались антенны стоимостью не более 400 франков. Предполагается, что оперативный макет для проведения войсковых испытаний, удовлетворяющий требованиям министерства обороны, будет создан уже в 2000 году.

В 1998 году появилось сообщение о том, что американская компания Lockheed-Martin разработала пассивный радар, названный «Безмолвный страж» (Silent Sentry), который использует для обнаружения целей теле- или радиосигналы. Новый радар благодаря мощности вещательных сигналов в состоянии обнаруживать цели в радиусе 220 километров. И это при условии, что сама система состоит из четырех совмещенных компьютерных секций, каждая из которых не превышает по высоте 50 см, и имеет антенны с размерами 75×20 см. Для создания "Silent Sentry" компании Lockheed-Martin потребовалось 10 лет. Эта система стоимостью от 3 до 5 миллионов долларов должна была быть готова к производству уже в ноябре 1999 года, как сообщал осведомленный в военных вопросах американский еженедельник "Defense News".

В ноябре 1999 года в сети Internet появился ряд сообщений агентства ИТАР-ТАСС о том, что Китай близок к развёртыванию совершенно новой системы ПВО, в основе которой лежит технология пассивной радиолокации, когда для отслеживания движения воздушных целей используются сигналы коммерческих теле- и радиостанций, а также пассивный радиоприёмник. По словам еженедельника "Newsweek", эксперты Пентагона пришли к выводу, что новая система сможет легко противостоять нынешней тактике подавления ВВС США противовоздушной обороны противника. По сообщению британской газеты "Sunday Times", эта система способна обнаруживать так называемые самолёты-невидимки, построенные с использованием технологии «стелс», включая истребитель-бомбардировщик F-117 и даже разрабатываемый сейчас истребитель будущего F-22.

Конечно РЛС, работа которой всецело зависит от гражданских объектов (телевизионных передатчиков), является системой мирного времени. Поэтому в её структуре будут отсутствовать узлы и блоки, применяемые в обычных радиолокационных системах для борьбы с постановщиками преднамеренных помех в военное время. Поскольку в такой РЛС используется сигнал не «тот, который нужен, а тот, который уже есть», при её эксплуатации необходимо бороться с раз-

личного рода непреднамеренными помехами. Основная проблема при этом – прямой сигнал от TV-центра, который с одной стороны необходим для решения задачи обнаружения и определения координат и параметров движения цели, а с другой стороны является очень сильным мешающим излучением, проникающим по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны целевого канала и превышающим отражённый сигнал на  $70 \div 90$  дБ. Ни одним существующим в настоящее время способом невозможно подавить такое сильное мешающее излучение, подавление однозначно должно быть комплексным.

Работа в телевизионных диапазонах предполагает наличие в месте расположения приёмной позиции РЛС мешающих отражений, проникающих как по основному, так и по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны целевого канала, значительно превышающих по мощности отражённый сигнал. Несмотря на то, что мощность мешающих отражений существенно меньше мощности прямого сигнала, их подавление не является простой задачей, поскольку в отличие от прямого сигнала они деполаризованы, демодулированы и имеют различные направления прихода.

Наконец, сами составляющие телевизионного сигнала, многие из которых используются для радиолокационного обзора, могут являться помехами друг для друга.

Данная работа посвящена рассмотрению характеристик телевизионного сигнала с точки зрения радиолокации и обобщению методов борьбы с непреднамеренными помехами в полуактивных РЛС с телевизионным подсветом, как варианта активной бистатической РЛС. Полученные научно обоснованные результаты обеспечат решение прикладной задачи – возможность использования вторичного излучения существующих жизнеобеспечивающих электромагнитных полей для радиолокационного контроля воздушного пространства.

**Связь работы с крупными научными программами, темами.** Теоретические исследования проводились в рамках республиканского проекта, реализовывавшемся БГУИР, в период 1996-2000 гг.

**Цель и задачи научных исследований.** Целью данной работы является разработка способов защиты полуактивной РЛС с телевизионным подсветом от непреднамеренных помех, т.е. способов обеспечения её функционирования. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- теоретическое и экспериментальное исследование энергетических, спектрально-временных, пространственных и поляризационных характеристик, расчёт параметров обнаружения составляющих полного телевизионного сигнала, позволяющих организовать с их помощью радиолокационный обзор воздушного пространства;
- сравнительный расчёт энергетических характеристик отражённого сигнала и непреднамеренных помех с учётом интерференционного множителя сферической Земли, выбор методов и средств по снижению уровня непреднамеренных помех;
- определение параметров системы электродинамического экранирования и поляризационной режекции прямого сигнала и её эффективности;
- определение структуры пространственного когерентного автокомпенсатора прямого сигнала, определение ошибок установившегося и переходного ре-

жимов, расчёт эффективности и быстродействия, оценка влияния неидентичности каналов автокомпенсатора на его эффективность;

- определение эффективности временной когерентной компенсации в процессе спектральной режекции помех с аподизацией и без аподизации АЧХ когерентного накопителя;
- оптимизация базы полуактивной РЛС с телевизионным подсветом в целях достижения наибольшего отношения сигнал/помеха на выходах информационных каналов изображения и звука с учётом предложенных мер по борьбе с непреднамеренными помехами.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования является полуактивная РЛС с телевизионным подсветом как вариант активной бистатической РЛС. Предметом исследования являются различные способы её защиты от непреднамеренных помех.

**Методология и методы проведённого исследования.** Основным методом исследований является математическое моделирование, а также экспериментальная проверка адекватности разработанных моделей. В качестве технических средств исследований использовались узлы экспериментального образца полуактивной РЛС с телевизионным подсветом, ПЭВМ, спектроанализаторы фирмы «Hewlett-Packard», осциллографы фирмы «Fluke», генераторы фирмы «Nameg».

**Научная новизна и значимость полученных результатов.**

1. Разработанный комплекс технических средств подавления непреднамеренных помех позволяет реализовать полуактивные РЛС с телевизионным подсветом.
2. Впервые были достаточно подробно исследованы характеристики телевизионного сигнала с точки зрения радиолокации, определены параметры обнаружения для информационных каналов, работающих по различным его составляющим. Впервые экспериментально были сделаны оценки ширины спектра сигнала яркости, ширины спектра межстрочных флукуаций сигнала яркости, ширины спектра межкадровых флукуаций и ширины спектра ЧМ сигнала звука.
3. Получены параметры систем электродинамического экранирования и поляризационной режекции прямого сигнала с учётом впервые исследованных изодоп и сектора нулевых доплеровских сдвигов частоты отражённого сигнала полуактивной РЛС с телевизионным подсветом.
4. В результате обобщения известных теоретических и экспериментальных исследований в области радиолокации и радионавигации принята модель экспоненциально-параболической формы пространственной корреляционной функции прямого сигнала у раскрыва антенной системы РЛС, с учётом этого впервые проведен синтез и анализ двухканального пространственного автокомпенсатора прямого сигнала с двукратным пространственным дифференцированием.
5. Получено соотношение, определяющее оптимальную базу полуактивной РЛС, при которой достигается приемлемое соотношение сигнал/помеха на выходах её информационных каналов.

**Практическая значимость полученных результатов.** Идея использования электромагнитного поля телевизионных ретрансляторов для радиолокационного контроля воздушного пространства по сравнению с использованием обычных РЛС имеет ряд преимуществ:

1. Отсутствие передающей системы существенно снижает массогабаритные характеристики системы, следовательно, повышается её мобильность.
2. Абсолютная скрытность, поскольку РЛС ничего не излучает. Она может использовать телевизионное поле сопредельных стран для контроля воздушного пространства над границами и приграничными районами.
3. Низкая стоимость полуактивных РЛС с телевизионным подсветом по сравнению с обычными активными и бистатическими РЛС, как в производстве, так и в эксплуатации.

#### **Основные положения диссертации, выносимые на защиту.**

1. Характеристики временной, спектральной, пространственной и поляризационной структуры составляющих телевизионного сигнала как радиолокационного сигнала подсвета.
2. Энергетические характеристики отражённого сигнала, мешающего прямого сигнала и мешающих отражений с учётом интерференционного множителя сферической Земли.
3. Система электродинамического экранирования и поляризационной режекции целевого канала РЛС с телевизионным подсветом с учётом наличия сектора "нулевых" доплеровских частот отражённого сигнала.
4. Синтез структуры и анализ характеристик двухканального пространственного автокомпенсатора мешающего прямого сигнала в каналах изображения и звука.
5. Обоснование дополнительных мер временной и спектральной селекции составляющих телевизионного сигнала в информационных каналах изображения и звука.
6. Оптимизация базы полуактивной РЛС с телевизионным подсветом.

#### **Личный вклад соискателя.**

1. Исследование энергетических, спектрально-временных, пространственных и поляризационных характеристик телевизионного сигнала, как радиолокационного сигнала подсвета (совместно с Романовым А.В.) – 50%.
2. Оценка энергетических характеристик отражённого сигнала и непреднамеренных помех с учётом интерференционного множителя Земли – 100%.
3. Система электродинамического экранирования с учётом сектора "нулевых" доплеровских частот (совместно с Юрцевым О.А., Чмырёвым Н.А., Шаляпиным С.В.) – 25%.
4. Синтез структуры и анализ характеристик двухканального автокомпенсатора прямого сигнала – 100%.
5. Оценка спектральной режекции помех с применением и без применения аподизации АЧХ когерентного накопителя (совместно с Семашко П.Г.) – 50%.
6. Оптимизация базы полуактивной РЛС с телевизионным подсветом (совместно с Романовым А.В., Семашко П.Г.) – 33%.

**Апробация результатов диссертации.** Результаты теоретических и экспериментальных исследований докладывались на:

1. Третьей республиканской научной конференции студентов и аспирантов Республики Беларусь (БГУ, 1997 г., июнь);
2. II Международной научно-технической конференции «Современные средства связи» (Нарочь, 1997 г., сентябрь);

3. XXXIII научно-технической конференции аспирантов и студентов БГУИР (1998 г., апрель);
4. Третьем Международном молодёжном форуме «Радиоэлектроника и молодёжь в XXI веке» (Харьков, 1999 г., июнь).

**Опубликованность результатов.** Результаты диссертации:

- опубликованы в республиканском межведомственном научном издании – 3 статьи;
- депонированы в республиканском издании – 3 статьи;
- опубликованы в тезисах 3-х докладов на международном форуме и республиканских научных конференциях – 3 доклада.

Всего 68 страниц опубликованного материала.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти основных глав, заключения, списка использованных источников и приложения. Полный объём диссертации составляет 167 страниц, таблицы и рисунки занимают 37 страниц, приложения занимают 27 страниц. Список использованной в работе литературы включает 80 источников на 6 страницах.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе теоретически и экспериментально исследованы энергетические, спектрально-временные, пространственные и поляризационные характеристики телевизионного сигнала как радиолокационного сигнала подсвета. Показано, что не все составляющие телевизионного сигнала пригодны для использования при радиолокационном обзоре. Внимания заслуживают: сигнал яркости с несущей изображения, сигнал звука, строчные синхрои импульсы, кадровые синхрои импульсы. Цветоразностные сигналы и сигналы цветовой синхронизации обладают низкой энергетикой и по спектру расположены отдельно от сигнала изображения и сигнала звука, поэтому являются как бесполезными, так и безвредными с точки зрения решения задач радиолокационного наблюдения. Сделан вывод о том, что при построении РЛС с телевизионным подсветом целесообразна организация трёх информационных каналов:

- информационного канала обнаружения и обзора по азимуту и скорости, работающего по несущей сигнала изображения (с подавленными сигналом яркости, строчными и кадровыми синхрои импульсами);
- информационного канала обзора по дальности с однозначным грубым определением дальности, работающего по сигналу звука;
- информационного канала обзора по дальности с неоднозначным, но более точным определением дальности, работающего по сигналу яркости (с подавленной несущей).

По результатам исследований характеристик телевизионного сигнала даны рекомендации по устранению возможного вредного влияния его составляющих друг на друга:

1. Поскольку самой энергоёмкой составляющей телевизионного сигнала является несущая сигнала изображения, целесообразным является её использование для построения информационного канала обнаружения и обзора по азимуту и ско-



рости. При этом АМ сигнал яркости, строчные и кадровые синхроимпульсы прямого и отражённого сигналов являются мешающими сигналами, которые необходимо подавлять методами временной, спектральной, пространственной и поляризационной селекции.

2. Подавление прямого сигнала в информационном канале обнаружения и обзора по азимуту и скорости методами пространственной автокомпенсации возможно при предварительном подавлении в прямом сигнале путём спектральной режекции несущей изображения и той части спектра сигнала яркости, которая находится вне диапазона доплеровских сдвигов отражённого сигнала ( $\pm 1,5$  кГц). Применение спектральной селекции межстрочных флуктуаций сигнала яркости невозможно, поскольку их ширина спектра ( $150 \div 300$  Гц) находится в диапазоне доплеровских сдвигов отражённого сигнала.
3. Для подавления строчных синхроимпульсов в информационном канале обнаружения и обзора по азимуту и скорости до пространственной когерентной компенсации прямого сигнала эффективно может быть использована спектральная селекция, учитывая, что диапазон доплеровских частот значительно меньше частоты строк.
4. Для подавления кадровых синхроимпульсов прямого сигнала эффективно может быть использована их временная селекция с использованием специально сформированных импульсов гашения. Применение спектральной селекции кадровых синхроимпульсов нецелесообразно, поскольку спектральные составляющие кадровых синхроимпульсов попадают в диапазон доплеровских сдвигов отражённого сигнала ( $\pm 1,5$  кГц).
5. Сигнал звука, занимающий самостоятельный диапазон частот, может быть эффективно отсеleктирован спектральными методами и использован для создания самостоятельного информационного канала обзора по дальности и скорости или только по дальности.
6. При использовании сигнала яркости для построения третьего информационного канала обзора по дальности, мешающим сигналом будет несущая изображения. Для её подавления целесообразно применение спектральной режекции.

Проведены экспериментальные исследования телевизионного поля по высоте. Подтверждена многолепестковая структура телевизионного поля в вертикальной плоскости, определяемая произведением диаграммы направленности передающей антенны ТВ-центра и интерференционного множителя сферической земной поверхности. Установлено, что на расстояниях 20-50 км от телецентра высота телевизионного поля обычно ограничена величиной 1 – 2 км, а на расстояниях  $\sim 100$  км может достигать величины 4 км, поэтому полуактивные РЛС с телевизионным подсветом можно использовать для контроля воздушного пространства на малых и средних высотах.

Выявлена возможность использования поляризационной селекции для частичного подавления прямого сигнала, проникающего по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны целевого канала, если осуществлять приём на ортогональной, по отношению к ТВ-центру, поляризации. При этом примерно половина деполаризованного при отражении от цели сигнала будет принята антенной с поляризационным фильтром.

Вторая глава посвящена исследованию энергетических характеристик (с учётом интерференционного множителя сферической земной поверхности) отражённого от цели сигнала и непреднамеренных помех: прямого сигнала от TV-центра, принимаемого по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны целевого канала, и мешающих отражений от подстилающей поверхности, принимаемых по главному и боковым лепесткам диаграммы направленности антенны целевого канала. Установлено, что прямой сигнал превышает отражённый сигнал на  $(70 \div 90)$  дБ, а мешающие отражения превышают отражённый сигнал на  $(30 \div 50)$  дБ, поэтому задача подавления прямого сигнала и мешающих отражений и выделение полезного сигнала превращается в серьёзную научно-техническую проблему, осложняющуюся необычайно большим динамическим диапазоном изменения уровней помех и сигналов. Учитывая ограниченный динамический диапазон работы аналоговых и цифровых устройств обработки сигналов на фоне помех, во избежание проявления необратимых по отрицательным последствиям нелинейных эффектов, при решении задач выделения сигнала и подавления различных слагаемых телевизионного сигнала в составе прямого сигнала и мешающих отражений наряду с традиционным использованием поляризационных, пространственных, временных и спектральных различий сигналов и помех, показана целесообразность использования нетрадиционного способа подавления прямого сигнала – электродинамического экранирования антенной системы со стороны телевизионного центра. Вместе с тем обозначена возможность использования рельефа местности для ослабления прямого сигнала путём расположения приёмной позиции за возвышенностью по отношению к TV-центру (при этом должна сохраняться прямая видимость TV-центра со стороны антенн компенсационных каналов).

В третьей главе рассмотрена система электродинамического экранирования и поляризационной режекции антенны целевого канала с учётом характерного для полуактивной РЛС с телевизионным подсветом сектора "нулевых" доплеровских сдвигов частоты отражённого сигнала. В качестве электродинамического экрана для уменьшения парусности предложена металлическая сетка прямоугольной формы. Поляризационная режекция прямого сигнала осуществляется антенной целевого канала, настроенной на приём волны с поляризацией, ортогональной излучаемой TV-центром волны путём соответствующей ориентацией вибраторов синфазной антенной решётки или ориентации рупора облучателя параболического зеркала. В качестве дополнительных поляризационных фильтров, расположенных параллельно раскрытию антенны или раскрытию рупора облучателя в непосредственной близости от них, предложены рамочные конструкции с набором параллельно расположенных проводников, ориентация которых совпадает с поляризацией прямого телевизионного сигнала.

На базе ранее разработанных математической модели системы "сетчатый экран – антенна – поляризационный фильтр" и методики приближенного решения в этой системе задач дифракции, учитывающей, во-первых, поля дифракции от четырёх кромок экрана, во-вторых, прошедшую через сетку экрана электромагнитную волну и, в-третьих, ослабление поляризационным фильтром суммарного поля на раскрытии антенны, определены параметры системы, обеспечивающие требуемые характеристики:

- размер экрана;
- расстояние между центрами раскрыва антенны и экрана;
- размер ячейки и диаметр проводников сетчатого экрана;
- диаметр проводников поляризационного фильтра и расстояние между ними;
- угол электродинамического экранирования;
- эффективность электродинамического экранирования и поляризационной режекции.

Стремление уменьшить угол электродинамического экранирования с целью расширения сектора обзора по азимуту, что достигается уменьшением размеров экрана и увеличением расстояния до него, неизбежно приводит к уменьшению эффективности электродинамического экранирования. В этой связи показано, что сектор электродинамического экранирования не имеет смысла делать меньше так называемого, сектора "нулевых" доплеровских сдвигов частоты отражённого сигнала. По мере приближения цели к базе бистатической РЛС уменьшается доплеровское смещение частоты отражённого сигнала, во-первых, потому что бистатический угол приближается к 180 градусам, а во-вторых, потому что уменьшается радиальная составляющая скорости цели как проекция вектора скорости цели на биссектрису бистатического угла. Определены, так называемые, изодопы полуактивной РЛС с телевизионным подсветом – линии равных доплеровских смещений частоты отражённого сигнала, как совокупность геометрических мест нахождения цели, движущейся с фиксированной скоростью в сторону РЛС. Расположение изодоп свидетельствует о том, что существует определённый сектор в направлении на телевизионный центр, в котором доплеровские смещения частоты отражённого сигнала настолько малы, что спектральная селекция отражённого сигнала на фоне мешающих отражений и межстрочных флуктуаций остатков прямого сигнала (после его пространственной когерентной компенсации) невозможна. Например, при скорости цели  $V_{ц} = 200$  м/с, времени когерентного накопления  $T_{кн} = 30$  мс, т.е. разрешающей способности по доплеровской частоте  $\Delta F_{дс} = 33$  Гц, сектор "нулевых" доплеровских смещений частоты отражённого сигнала составляет  $40 \div 45$  градусов. При уменьшении скоростей целей этот сектор увеличивается. Практически оправданным может считаться сектор электродинамического экранирования, согласованный с сектором "нулевых" доплеровских смещений частоты отражённого сигнала, размером в 90 градусов.

Экспериментальной проверке подвергались два варианта систем "электродинамический экран – антенна – поляризационный фильтр":

1. Система "сетчатый экран – параболическая антенна – поляризационный фильтр" с параметрами:

- размеры экрана 15 м × 15 м;
- расстояние между центрами раскрыва антенны и экрана 20 м;
- угол экранирования около 45°;
- размер ячейки сетчатого экрана 5 мм × 5 мм;
- диаметр проводников сетки экрана 0,7 мм;
- диаметр проводников поляризационного фильтра 3 мм;
- расстояние между проводниками поляризационного фильтра 25 мм;
- эффективность электродинамического экранирования 35 дБ.

2. Система "сетчатый экран – синфазная антенная решётка – поляризационный фильтр" с параметрами:

- размеры экрана 3 м × 3 м;
- расстояние между центрами раскрыва антенны и экрана 1,5 м;
- угол экранирования около 90°;
- размер ячейки сетчатого экрана 5 мм × 5 мм;
- диаметр проводников сетки экрана 0,7 мм;
- диаметр проводников поляризационного фильтра 3 мм;
- расстояние между проводниками поляризационного фильтра 25 мм;
- эффективность электродинамического экранирования 30 дБ.

Четвёртая глава посвящена синтезу и анализу пространственного когерентного автокомпенсатора прямого сигнала. В результате обобщения известных теоретических и экспериментальных исследований в области радиолокации и радионавигации принята модель экспоненциально-параболической формы пространственной корреляционной функции прямого сигнала у раскрыва антенной системы РЛС. Из этого сделан вывод, что для подавления прямого сигнала необходимо и достаточно двукратного междуканального вычитания (двухканальной пространственной автокомпенсации). Антенны компенсационных каналов целесообразно располагать симметрично относительно антенны целевого канала, поскольку потенциально достижимая эффективность автокомпенсации оказывается в 4 раза выше по сравнению с эффективностью несимметричной схемы. Установлено, что при практической реализации двухканального квадратурного автокомпенсатора отказ от вторых квадратур компенсационных каналов фактически приводит к неработоспособности автокомпенсатора. Рассмотрены причины, снижающие реальную эффективность по сравнению с потенциально достижимой:

- ошибки самонастройки (флуктуационные и динамические);
- шумы квантования из-за ограниченной разрядности АЦП;
- периодическое нарушение равенства расстояний между целевой и компенсационными антеннами из-за перемещения фазового центра целевой антенны в процессе её вращения, в результате чего двухканальный автокомпенсатор с двухканальным пространственным дифференцированием как бы трансформируется в два одноканальных с однократным пространственным дифференцированием;
- факторы неидентичности и нелинейности в каналах приёма (снижение междуканальной корреляции прямого сигнала из-за междуканальной разности хода; неидентичность АЧХ и ФЧХ каналов приёма; нелинейные искажения в трактах обработки).

Показано, что выбор оптимальной полосы автокомпенсации в целях уменьшения ошибок самонастройки не является очень критичным. При полосе автокомпенсации, равной половине ширины спектра мешающего излучения, время автокомпенсации составит около шести интервалов корреляции мешающего излучения, т.е. десятки микросекунд, как для канала изображения, так и для канала звука, что много меньше времени корреляции задающего воздействия. Определено, что в реальных условиях двухканальный автокомпенсатор обеспечивает снижение уровня прямого сигнала примерно на 40 дБ. Для достижения такой эффек-

тивности разность электрических длин основного и компенсационных каналов не должна превышать единиц дециметров, а неидентичность АЧХ каналов приёма не должна превышать десятипроцентную величину.

В пятой главе рассмотрено подавление мешающих отражений и прямого сигнала в процессе спектрально-временной селекции отражённого сигнала. Определено, что спектрально-временная когерентная компенсация мешающих отражений и прямого сигнала эффективна лишь в информационных каналах, работающих по сигналам несущей изображения и яркости. При этом эффективность спектрально-временной когерентной компенсации тем выше, чем больше радиальная скорость цели. В канале, работающем по сигналу звука, из-за его большой ширины спектра, спектрально-временная когерентная компенсация помех фактически не осуществляется. Показано, что применение аподизации прямого сигнала и мешающих отражений по закону  $\cos^m(\pi t/T_2)$  существенно повышает эффективность спектрально-временной когерентной компенсации. Оптимальный индекс аподизации  $m = 2$ . При этом мощность помех в каналах, работающих по сигналам несущей изображения и яркости, снижается не менее, чем на  $\sim 15 \div 20$  дБ. На основании этого сделан вывод о том, что применение в этих каналах спектральной селекции в сочетании с электродинамическим экранированием, поляризационной режекцией и пространственной автокомпенсацией, фактически снимает проблему прямого сигнала. Показано, что широкий и сплошной спектр сигнала звука исключает возможность использования спектрально-временной когерентной компенсации прямого сигнала и мешающих отражений в канале звука. Тем не менее, приемлемое отношение сигнал/помеха в канале звука достигается (в сочетании с другими способами, аналогичными используемым в канале изображения) благодаря "кнопочной" функции неопределённости звука и увеличению, в связи с этим, отношения сигнал/помеха в результате спектральной селекции отражённого сигнала в число раз, равное базе звука ( $\Delta f_{зв} \cdot T_{кн}$ ). Установлено, что временной, пространственной и поляризационной селекции оказывается недостаточно для того, чтобы при любых базах обеспечить достаточное отношение сигнал/помеха. Анализ, связанный с оптимизацией базы РЛС, показал, что в эволюции отношения сигнал/помеха при изменении базы объективно существуют две противоположные тенденции: отношение сигнал/шум убывает с увеличением базы, а отношения "отражённый сигнал / мешающие отражения" и "отражённый сигнал / прямой сигнал" растут с увеличением базы, т.к. телевизионное поле подсвета в приземном слое убывает быстрее, чем в районе цели. При некоторых значениях базы достигается сбалансированность спектральной плотности внутренних шумов с одной стороны, и суммарной спектральной плотности прямого сигнала и мешающих отражений с другой стороны. Эти значения базы ( $r_{\text{опт}} = (0,5 \div 0,7) r_{\text{рТв}}$ ) следует считать оптимальными. При этом приемлемое отношение сигнал/помеха обеспечивается на выходах всех трёх информационных каналов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показана целесообразность вторичного использования неизбежно существующих жизнеобеспечивающих электромагнитных полей для решения других (например радиолокационных) задач [1,2]. В этой связи выявлена возможность

использования полного телевизионного сигнала в качестве радиолокационного сигнала подсвета [4]. Определено, что для организации радиолокационного контроля воздушного пространства интересны (с точки зрения энергетики) лишь некоторые составляющие телевизионного сигнала: сигнал яркости с несущей изображения, сигнал звука, строчные синхронимпульсы, кадровые синхронимпульсы [7]. Теоретически и экспериментально исследованы спектрально-временные, пространственные и поляризационные характеристики этих составляющих [1,4,7]. Показана целесообразность организации трёх информационных каналов при построении полуактивной РЛС с телевизионным подсветом: информационного канала обнаружения и обзора по азимуту и скорости, работающего по несущей изображения; информационного канала обзора по дальности с однозначным грубым определением дальности, работающего по сигналу звука; информационного канала обзора по дальности с неоднозначным, но более точным определением дальности, работающего по сигналу яркости [1,2,4].

2. Исследованы энергетические характеристики отражённого от цели сигнала, прямого сигнала, принимаемого по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны и мешающих отражений от подстилающей поверхности в окрестности РЛС с учётом интерференционного сомножителя сферической земной поверхности [1,2]. На основании этого обозначена серьёзная научно-техническая проблема по подавлению прямого сигнала и мешающих отражений и выделению полезного сигнала, осложняющаяся необычайно большим динамическим диапазоном изменения уровней помех и сигналов. В этой связи показана целесообразность использования комплекса мер по борьбе с помехами: как традиционное использование поляризационных, пространственных, временных и спектральных различий сигналов и помех, так и нетрадиционное использование электродинамического экранирования антенной системы от прямого сигнала ТВ-центра [1,2,8].
3. Рассчитаны и экспериментально подтверждены следующие параметры систем электродинамического экранирования и поляризационной режекции прямого сигнала ТВ-центра: размер экрана; расстояние между центрами раскрыва антенны и экрана; размер ячейки и диаметр проводников сетчатого экрана; диаметр проводников поляризационного фильтра и расстояние между ними; угол электродинамического экранирования; эффективность электродинамического экранирования. Установлено, что у полуактивной РЛС с телевизионным подсветом существует определённый сектор обзора в направлении на телевизионный центр, в котором доплеровские смещения частоты отражённого сигнала настолько малы, что спектральная селекция отражённого сигнала на фоне мешающих отражений и межстрочных флуктуаций остатков прямого сигнала, подвергнутого пространственной автокомпенсации, невозможна. Для различных скоростей целей этот сектор имеет величину  $40 \div 90^\circ$ . Оправданное согласование сектора электродинамического экранирования с сектором "нулевых" доплеровских частот отражённого сигнала приводит к таким соотношениям размеров экрана и расстояния до него, при которых эффективность экранирования составляет  $30 \div 35$  дБ.

4. Показано, что пространственная корреляционная функция прямого сигнала у раскрыва приёмной антенны РЛС имеет экспоненциально-параболическую форму и поэтому пространственный когерентный автокомпенсатор прямого сигнала должен быть двухканальным [3,8]. При этом, с точки зрения потенциально достижимой эффективности, антенны компенсационных каналов должны иметь симметричное расположение относительно антенны целевого канала [3]. Установлено, что потенциально достижимая эффективность автокомпенсатора в реальных условиях может снижаться из-за: флуктуационных и динамических ошибок самонастройки; шумов квантования, обусловленных ограниченной разрядностью АЦП; периодического нарушения симметричности расположения компенсационных антенн, вызванного перемещением фазового центра антенны целевого канала в процессе её вращения; факторов неидентичности в каналах приёма [3,5,6,9]. Теоретически установлено и экспериментально подтверждено, что реально достижимая эффективность двухканального автокомпенсатора прямого сигнала равна  $v_{\text{кк}} = (30 \div 40)$  дБ [3,8]. Определено, что выбор оптимальной полосы автокомпенсации в целях уменьшения ошибок самонастройки не является очень критичным. При этом быстрдействие автокомпенсатора (время переходных процессов) составляет десятки микросекунд, что много меньше времени корреляции задающего воздействия [3].
5. Показано, что спектрально-временная компенсация помех эффективна лишь в информационных каналах, работающих по сигналам несущей изображения и яркости [1,2]. В информационном канале, работающем по сигналу звука, она фактически не осуществляется. Определено, что для повышения эффективности спектрально-временной когерентной компенсации в реальных условиях необходимо применение аподизации прямого сигнала и мешающих отражений по закону  $\cos^m(\pi t/T_a)$ . Оптимальный индекс аподизации при этом  $m = 2$ , поскольку при дальнейшем его увеличении спектральная плотность помехи становится меньше спектральной плотности внутренних шумов, а эффективное время когерентного накопления сокращается.
6. Установлено, что комплексное применение всех вышеперечисленных средств борьбы с непреднамеренными помехами не обеспечивает приемлемое отношение сигнал / помеха при любых базах [1,2]. Анализ, связанный с оптимизацией базы РЛС, показал, что в эволюции отношения сигнал/помеха при изменении базы объективно существуют две противоположные тенденции: отношение сигнал/шум убывает с увеличением базы, а отношения "отражённый сигнал / мешающие отражения" и "отражённый сигнал / прямой сигнал" растут с увеличением базы, т.к. телевизионное поле подсвета в приземном слое убывает быстрее, чем в районе цели [2]. При этом, оптимальным является размещение приёмной позиции РЛС на расстоянии  $r_{\text{опт}} = (0,5 \div 0,7)r_{\text{рТV}}$ , поскольку при таких значениях базы достигается сбалансированность спектральной плотности внутренних шумов с одной стороны, и суммарной спектральной плотности прямого сигнала и мешающих отражений с другой стороны. В результате этого приемлемое отношение сигнал/помеха обеспечивается на выходах всех трёх информационных каналов [2].

**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Охрименко А.Е., Ивлев И.И., Давыденко И.Н., Агишев А.Г., Романов А.В., Бондарь Д.В. Автокомпенсация прямого сигнала в активной бистатической РЛС // Радиотехника и электроника: Республиканский межведомственный сборник научных трудов. Выпуск 23 – Мн.: БГУИР, 1999. – С. 21-30.
2. Ивлев И.И., Романов А.В., Охрименко А.Е. Характеристики телевизионного сигнала яркости как радиолокационного сигнала подсвета // Радиотехника и электроника: Республиканский межведомственный сборник научных трудов. Выпуск 23 – Мн.: БГУИР, 1999. – С. 31-36.
3. Агишев А.Г., Ивлев И.И., Давыденко И.Н. Синтез малопараметрического корректора частотных характеристик // Радиотехника и электроника: Республиканский межведомственный сборник научных трудов. Выпуск 24 – Мн.: БГУИР, 1999. – С. 122-125.
4. Ивлев И.И., Романов А.В. Характеристики телевизионного сигнала изображения как радиолокационного сигнала подсвета // Третья республиканская научная конференция студентов Республики Беларусь (14 – 16 мая 1997 г., Минск): Тезисы докладов. В пяти частях. Ч.5б – Мн.: Белгосуниверситет, 1997. – С. 162-163.
5. Ивлев И.И., Охрименко А.Е. Пространственная автокомпенсация прямого сигнала в РЛС с телевизионным подсветом // Известия Белорусской инженерной академии. Специальный выпуск журнала: материалы II международной научно-технической конференции «Современные средства связи» (22 – 26 сентября 1997 г., Нарочь, Беларусь) / Высший колледж связи. – 1997. – № 1(3)/1. – С. 144-148.
6. Ивлев И.И., Охрименко А.Е. К вопросу о неидентичности каналов автокомпенсатора мешающих излучений // 3-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка і молодь у XXI ст.» (20 – 23 квітня 1999 г., Харків): Тезиси докладов. В двух частях. Ч.1 – Харьков.: ХТУРЭ, 1999. – С. 68-71.
7. Романов А.В., Ивлев И.И., Гейстер С.Р., Охрименко А.Е. Энергетические характеристики сигналов и помех в РЛС с телевизионным подсветом / Белорусский университет информатики и радиоэлектроники. – Мн., 1998. – 19 с. – Деп. В БелИСА 13.07.1998. – № Д199847 // Реферативный сборник непубликуемых работ. – 1998. – №11. – С. 63.
8. Ивлев И.И., Романов А.В., Семашко П.Г., Охрименко А.Е. Оптимизация базы активной бистатической РЛС / Белорусский университет информатики и радиоэлектроники. – Мн., 1998. – 12 с. – Деп. В БелИСА 13.11.1998. – № Д199882 // Реферативный сборник непубликуемых работ. – 1999. – №1(12). – С. 77.
9. Ивлев И.И., Охрименко А.Е., Храпун И.С. Неидентичность каналов и эффективность автокомпенсатора мешающих излучений / Белорусский университет информатики и радиоэлектроники. – Мн., 1999. – 8 с. – Деп. в БелИСА 9.04.1999. – № Д199948 // Реферативный сборник непубликуемых работ. – 1999. – №2(13). – С. 89.





## РЭЗЮМЭ

Іўлеў Ігар Ігаравіч

**АБАРОНА ПАЎАКТЫЎНАЙ РЛС З ТЭЛЕВІЗІЙНЫМ ПАДСВЕТАМ АД  
НЕНАЎМЫСНЫХ ПЕРАШКОД**

*Бістатычная радыёлакацыя, РЛС з тэлевізійным падсветам, характарыстыкі выяўлення, прамы сігнал ад тэлецэнтра, перашкоджаючыя адбіткі, электрадынамічнае экранаванне, палярызацыйная ражэкцыя, прасторавая кагярэнтная аўтакампянасацыя, часовая кагярэнтная кампянасацыя, база бістатычнай РЛС.*

Аб'ектам даследавання з'яўляецца паўактыўная РЛС з тэлевізійным падсветам як варыянт актыўнай бістатычнай РЛС. Прадметам даследавання з'яўляюцца розныя спосабы яе абароны ад ненаўмысных перашкод. Мэтай дадзенай работы з'яўляецца распрацоўка спосабаў абароны паўактыўнай РЛС з тэлевізійным падсветам ад ненаўмысных перашкод, г.зн. спосабаў забеспячэння яе функцыянавання.

Асноўным метадам даследавання ў з'яўляецца матэматычнае мадэліраванне, а таксама эксперыментальная праверка адпаведнасці распрацаваных мадэляў. У якасці тэхнічных сродкаў даследавання ў выкарыстоўваліся вузлы эксперыментальнага ўзора паўактыўнай РЛС з тэлевізійным падсветам, ПЭВМ, спектрааналізатары фірмы «Hewlett-Packard», асцыляграфы фірмы «Fluke», генератары фірмы «Nameg».

У ходзе праведзеных даследаванняў атрыманы наступныя вынікі:

1. Упершыню падрабязна даследаваны характарыстыкі тэлевізійнага сігналу з пункту гледжання радыёлакацыі.
2. Упершыню атрыманы краявыя тэхнічныя характарыстыкі для паўактыўнай РЛС з тэлевізійным падсветам.
3. Распрацаваны комплекс тэхнічных сродкаў барацьбы з ненаўмыснымі перашкодамі дае магчымасць рэалізаваць паўактыўныя РЛС з тэлевізійным падсветам.
4. Прапанаваны лічбовыя аўтакампенсатары, забеспечваючыя падаўленне прамога TV-сігналу да 40 дБ, могуць выкарыстоўвацца ў іншых сістэмах апрацоўкі радыёлакацыйных сігналаў.

Вынікі, атрыманыя ў дысертацыйнай рабоце, дазваляюць арганізаваць радыёлакацыйны кантроль паветранай прасторы з дапамогай паўторнага выкарыстоўвання непазбежна існуючых жыццёзабяспечваючых электрамагнітных палёў. Разам з тым істотна павысіць мабільнасць і скрытнасць радыёлакацыйных сістэм, панізіць іх масагабарытныя і вартасныя характарыстыкі.

Ивлев Игорь Игоревич

## ЗАЩИТА ПОЛУАКТИВНОЙ РЛС С ТЕЛЕВИЗИОННЫМ ПОДСВЕТОМ ОТ НЕПРЕДНАМЕРЕННЫХ ПОМЕХ

*Бистатическая радиолокация, РЛС с телевизионным подсветом, характеристики обнаружения, прямой сигнал от телецентра, мешающие отражения, электродинамическое экранирование, поляризационная режекция, пространственная когерентная автокомпенсация, временная когерентная компенсация, база бистатической РЛС.*

Объектом исследования является полуактивная РЛС с телевизионным подсветом как вариант активной бистатической РЛС. Предметом исследования являются различные способы её защиты от непреднамеренных помех. Целью данной работы является разработка способов защиты полуактивной РЛС с телевизионным подсветом от непреднамеренных помех, т.е. способов обеспечения её функционирования.

Основным методом исследований является математическое моделирование, а также экспериментальная проверка адекватности разработанных моделей. В качестве технических средств исследований использовались узлы экспериментального образца полуактивной РЛС с телевизионным подсветом, ПЭВМ, спектроанализаторы фирмы «Hewlett-Packard», осциллографы фирмы «Fluke», генераторы фирмы «Hameg».

В ходе проведенных исследований получены следующие результаты:

1. Впервые подробно исследованы характеристики телевизионного сигнала с точки зрения радиолокации.
2. Впервые установлены предельные технические характеристики для полуактивной РЛС с телевизионным подсветом.
3. Разработанный комплекс технических средств подавления непреднамеренных помех позволяет реализовать полуактивные РЛС с телевизионным подсветом.
4. Предложенные цифровые автокомпенсаторы, обеспечивающие подавление прямого TV-сигнала до 40 дБ, могут быть использованы в других системах обработки радиолокационных сигналов.

Результаты, полученные в диссертационной работе, позволяют организовать радиолокационный контроль воздушного пространства при помощи вторичного использования неизбежно существующих жизнеобеспечивающих электромагнитных полей. При этом возможно существенно повысить мобильность и скрытность радиолокационных систем, понизить их массогабаритные и стоимостные характеристики.

## ABSTRACT

Ivlev Igor Igorevich

**GUARD OF SEMIACTIVE RADAR WITH TELEVISION DESIGNATION  
FROM CASUAL INTERFERENCE**

*Bistatic radar-location, radar with television designation, performances of a acquisition, direct signal from a TV-center, clutter, electrodynamic screening, polarizing rejection, space coherent self-cancellation, temporal coherent cancelation, baseline of semiactive radar.*

Object of a research is semiactive radar with television designation as variant active bistatic radar. A subject of a research are the various methods of a guard from casual interference. The purpose of the given work is the development of methods of a guard semiactive radar with television designation from casual interference, i.e. methods of support of operation.

A basic method of researches is the mathematical simulation, and also experimental check of adequacy of the developed models. As means of researches the knots of an experimental example of semiactive radar with television designation, computer, spectrum analyzer of the "Hewlett-Packard" corporation, oscillographs of the "Fluke" corporation, generators of the "Hameg" corporation were used.

During of the carried out researches the following outcomes are obtained:

1. Characteristics of a television signal for the first time are detailed investigated from the point of view of a radar-location.
2. Limiting characteristics for half-active radar with television designation for the first time are established.
3. The developed complex of means of suppression of inadvertent handicapes allows to realize half-active radars with television designation.
4. The offered digital self-balancing potentiometers ensuring suppression of a direct TV-signal up to 40 dB, can be used in other systems of processing of radar-tracking signals.

The outcomes obtained in dissertation, allow to organize radar-tracking monitoring of air space with the help of secondary use inevitably existing lifeassurance electromagnetic fields. Thus probably it is essential to increase mobility and secrecy of radar-tracking systems, to reduce them dimensions and cost performances.

ИВЛЕВ ИГОРЬ ИГОРЕВИЧ

**ЗАЩИТА ПОЛУАКТИВНОЙ РЛС С ТЕЛЕВИЗИОННЫМ ПОДСВЕТОМ  
ОТ НЕПРЕДНАМЕРЕННЫХ ПОМЕХ**

Специальность 05.12.21 – радиотехнические системы  
специального назначения  
включая технику СВЧ и  
технологии их производства

Автореферат диссертации  
на соискание учёной степени кандидата технических наук

---

Подписано в печать	19.05.2000.	Формат 60×84 1/16
Бумага писчая	Печать ризографическая	Усл.печ.л. 1, 89.
Уч.-изд.л. 1, 0.	Тираж 70 экз.	Заказ 4.

---

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Отпечатано в БГУИР. Лицензия ЛП №156  
220027, Минск, ул. П.Бровки, 6