



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
Технологический институт  
Федерального государственного образовательного  
учреждения высшего профессионального образования  
«Южный федеральный университет»**

---

КАФЕДРА РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Д.т.н., профессор ДЯТЛОВ А. П.

Дисциплина «Методы оптимального проектирования РЭС»

Семестровый курс лекций на модульной основе  
с диагностико-квалиметрическим обеспечением

**МОДЕЛИ РАДИООБСТАНОВКИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ  
РАДИОМОНИТОРИНГА**

Сведения о специальности:

210304 «Радиоэлектронные системы»

210402 «Средства связи с подвижными объектами»

Таганрог 2008

**Дятлов А. П.** Модели радиообстановки при проведении радиомониторинга. Семестровый курс лекций. Электронная версия. — Таганрог, 2008.

Рассмотрены модели радиообстановки при проведении радиомониторинга для различных тактических ситуаций.

Семестровый курс лекций предназначен для магистрантов специальностей 210304 «Радиоэлектронные системы» и 210402 «Средства связи с подвижными объектами».

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение к курсу лекций.....	4
1 учебный модуль «Цели и задачи радиомониторинга излучений СРНС» .....	5
1.1. Комплексная цель модуля.....	5
1.2. Содержание 1 модуля.....	5
1.3. Проектное задание .....	10
1.4. Квалиметрия по 1 модулю.....	11
1.4.1. Вопросы для самопроверки.....	11
1.4.2. Тесты для самопроверки.....	12
1.4.3. Таблица для переводов ответов в оценку.....	13
Список литературы к 1 модулю.....	13
2 учебный модуль «Формулировка статистических задач при радиомониторинге излучений СРНС».....	15
2.1. Комплексная цель модуля.....	15
2.2. Содержание 2 модуля.....	15
2.3. Проектное задание .....	26
2.4. Квалиметрия по 2 модулю.....	26
2.4.1. Вопросы для самопроверки.....	26
2.4.2. Тесты для самопроверки.....	28
2.4.3. Таблица для переводов ответов в оценку.....	29
Список литературы ко 2 модулю .....	29
3 учебный модуль «Рабочие модели радиообстановки».....	30
3.1. Комплексная цель модуля.....	30
3.2. Содержание 2 модуля.....	30
3.3. Проектное задание .....	38
3.4. Квалиметрия по 3 модулю.....	38
3.4.1. Вопросы для самопроверки.....	38
3.4.2. Тесты для самопроверки.....	39
3.4.3. Таблица для переводов ответов в оценку.....	40
Список литературы к 3 модулю.....	40

## **ВВЕДЕНИЕ К КУРСУ ЛЕКЦИЙ**

Семестровый курс лекций «Модели радиообстановки при проведении радиомониторинга» является составной частью дисциплины «Методы оптимального проектирования РЭС» и предназначен для изучения моделей радиообстановки, соответствующих условиям применения различных информационных радиосистем.

С целью конкретизации материала используются модели радиообстановки при проведении радиомониторинга излучений спутниковых радионавигационных систем (СРНС).

# 1 УЧЕБНЫЙ МОДУЛЬ

## «ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ РАДИОМОНИТОРИНГА ИЗЛУЧЕНИЙ СРНС»

### 1.1. КОМПЛЕКСНАЯ ЦЕЛЬ МОДУЛЯ

— ознакомление с состоянием развития СРНС и формулировкой целей радиомониторинга излучений СРНС для различных тактических ситуаций.

### 1.2. СОДЕРЖАНИЕ 1 МОДУЛЯ

**1.2.1.** Радиомониторинг (РМ) является областью радиоэлектроники, связанной с исследованием объектов и явлений на основе использования их электромагнитных излучений.

Решение проблем РМ осуществляется на основе первичной, вторичной и третичной обработки информации. Наиболее важными этапами первичной обработки информации являются задачи обнаружения и оценивания параметров сигналов, которые должны решаться в условиях отсутствия априорной информации не только о параметрах, но и виде сигналов, а также разнообразных помеховых ситуациях.

Одним из типов объектов, использующих радиоизлучения и заслуживающих большого внимания, являются космические аппараты (КА) спутниковых радионавигационных систем (СРНС) второго поколения «Навстар» и «Глонасс».

При создании СРНС второго поколения была поставлена цель обеспечения непрерывного действия при глобальном высокоточном определении трех пространственных координат и трех составляющих скорости потребителей и неограниченной пропускной способности.

Технико-экономический анализ большого числа проектов СРНС показал, что для реализации требований, предъявляемых к СРНС второго поколения, необходимо использовать КА со средневысотными орбитами.

Первыми универсальными СРНС второго поколения, введенными в эксплуатацию, являются СРНС «НАВСТАР» (США, 1993 г.) и СРНС «ГЛОНАСС» (Россия, 1995 г.).

Обе из вышеназванных СРНС являются системами двойного назначения, обеспечивающими решение задач как гражданских, так и военных потребителей.

За истекшее время с момента ввода в эксплуатацию СРНС «НАВСТАР» и «ГЛОНАСС» их значение и роль существенно возросли при решении транспортных, геодезических, геоинформационных и других научных и прикладных задач как гражданского, так и военного назначения.

Универсальность СРНС «НАВСТАР» и «ГЛОНАСС» сделало эти системы основным, а иногда единственным, поставщиком навигационной информации для гражданских пользователей, что потребовало существенного повышения требований к точностным характеристикам и таким показателям надежности, как готовность (доступность), целостность, непрерывность обслуживания.

Успешное применение СРНС «НАВСТАР» в военных конфликтах позволило изменить концепцию войн путем перехода от контактных к бесконтактным действиям.

Это обстоятельство повысило статус СРНС «НАВСТАР» и «ГЛОНАСС» до уровня стратегических военных средств и привело к тому, что с целью повышения противодействия вышеназванным СРНС началась разработка специальных мер противодействия, включая радиоэлектронную борьбу (РЭБ).

Для повышения помехозащищенности и живучести СРНС второго поколения предусмотрена реализация целого набора организационно-технических мер:

1) по космическому сегменту:

- увеличение энергетического потенциала излучений;
- увеличение количества КА, находящихся в зоне радиовидимости аппаратуры потребителей (АП), СРНС «НАВСТАР», за счёт расширения со-

звездия КА и комплексирования СРНС со спутниковыми системами связи типа «Инмарсат», «Глобалстар» и т.п.;

- использование дополнительных частот для излучений навигационных сигналов (НС);
- использование НС с различными видами и параметрами модуляции;

2) по сегменту потребителей:

- использование в АП алгоритмов, обеспечивающих повышение помехозащищённости;
- комплексирование АП с другими навигационными датчиками;
- усложнение алгоритмов первичной и вторичной обработки информации в АП.

**1.2.2.** Диалектика развития СРНС с учетом постоянного роста требований к качеству и номенклатуре предоставляемых потребителям услуг требует их постоянного совершенствования.

После ввода в эксплуатацию СРНС «НАВСТАР» и «ГЛОНАСС» начались работы по созданию СРНС нового поколения в рамках проектов «Пропнасс», «Галилео», «Инмарсат-Р».

Предварительные системные исследования показывают, что СРНС третьего поколения должны обеспечивать возможность совмещения режимов навигации и связи, обладать высокими энергетической и структурной скрытностью и помехозащищенностью, обеспечивать конфиденциальность и устойчивость к ядерным взрывам.

Для достижения вышеуказанных целей исследуются различные варианты орбитальных группировок КА с привлечением псевдоспутников, использование различных частотных диапазонов, эффективных методов модуляции, видов коллективного доступа, структуры и параметров сигналов.

Для обеспечения нормального функционирования СРНС в его составе используется аппаратура контроля поля, которая обеспечивает радиомониторинг (РМ) излучений КА, входящих в состав СРНС, с целью оценки качества нави-

гационного обеспечения. Особенность такого РМ состоит в том, что он осуществляется при использовании априорной пространственной, временной и частотной информации о НС.

Поскольку упомянутые выше СРНС представляют собой стратегические военные средства, то с целью повышения безопасности РФ необходима разработка комплекса мер по противодействию СРНС вероятного противника.

Одним из направлений такого комплекса мер является организация РМ с целью контроля текущего состояния, выявления тенденций развития СРНС, определения состава и режимов функционирования, определения видов и параметров НС, формирования целеуказаний для комплексов РЭБ, использования радиоизлучений КА СРНС для решения прикладных задач.

В настоящее время при организации РМ наибольший интерес представляет СРНС «НАВСТАР». При функционировании этой СРНС в «штатном» режиме реализация РМ облегчается из-за наличия достаточно большого объема априорной информации о параметрах НС. Однако в соответствии с планом модернизации СРНС «НАВСТАР» в будущем она сможет функционировать в «нештатном» режиме с изменяющимися пространственными, временными и частотными параметрами НС, что затрудняет организация РМ и требует проведения специальных исследований.

**1.2.3.** Одним из направлений концепции обеспечения национальной безопасности РФ является разработка и внедрение специальной оборонительной системы мер, направленных на минимизацию степени риска быть подверженным информационному нападению, а также на минимизацию возможного ущерба от этого нападения.

Опыт использования СРНС «НАВСТАР» в военных конфликтах показал ее высокую эффективность и обеспечил переход к новой «бесконтактной» концепции военных действий. Эти обстоятельства требуют разработки в РФ набора мер, направленных на снижение эффективности использования СРНС «НАВСТАР». К числу первоочередных задач этого набора мер следует отнести



разработку и внедрение методов радиоэлектронной борьбы (РЭБ) в сочетании с радиомониторингом (РМ) излучений КА, входящих в космический сегмент СРНС «НАВСТАР».

Таким образом, из всех целей РМ излучений СРНС, сформулированных в предисловии, приоритет следует отдать разработке принципов РМ, обеспечивающего противодействие данному классу информационных систем.

При этом, разрабатывая методологию РМ излучений СРНС, основное внимание из всех потенциально возможных СРНС уделяется СРНС «НАВСТАР», поскольку она превосходит по тактико-техническим возможностям другие подобные системы, успешно функционирует и динамично развивается и потенциально представляет наибольшую угрозу для безопасности РФ.

РМ излучений СРНС является одним из направлений радиоэлектронной разведки (РЭР). Наиболее близким к данному направлению является радиоразведка излучений систем спутниковой связи (ССС). Однако у исследуемого направления имеется большое количество специфических особенностей, которые приводят к необходимости использования при построении комплексов радиомониторинга (КРМ) различных принципов, методов, алгоритмов и вариантов их реализации.

К числу особенностей СРНС, оказывающих существенное влияние на организацию РМ их излучений, относятся:

- глобальная зона обслуживания;
- большое количество одновременно излучающих КА;
- многокомпонентный характер радиоизлучений КА с использованием кодового и частотного уплотнения каналов;
- использование сложных непрерывных фазоманипулированных навигационных сигналов с низким энергетическим потенциалом и различным уровнем априорной информации об энергетических, временных, частотных и статистических характеристиках;
- низкая скорость передачи навигационных данных;
- модернизация космического сегмента СРНС, направленная на повыше-

В настоящее время доступ всех потенциальных потребителей к услугам, предоставляемым СРНС «НАВСТАР», является бесплатным. Однако такая ситуация, судя по экономическим и политическим тенденциям, является временной. С целью снижения экономических рисков от использования СРНС «НАВСТАР» необходима организация систематического РМ и разработка на его основе асимметричных мер, например, таких, как организация радиоэлектронной борьбы (РЭБ), вскрытие в случае необходимости кода доступа и расшифровка навигационных данных или разработка специальных методов определения местоположения на основе использования радиоизлучений СРНС «НАВСТАР» в условиях большой априорной неопределенности.

Систематический РМ также необходим для изучения тенденций развития, выявления нештатных режимов функционирования СРНС «НАВСТАР», определения степени потенциальных угроз в различных регионах и выработки ответных мер.

Реализация систематического РМ в глобальном масштабе является сложным и дорогостоящим проектом, который может быть рассмотрен в перспективе.

В рамках данной работы рассмотрим особенности эпизодического локального РМ излучений СРНС «НАВСТАР», необходимого для организации РЭБ путём радиоэлектронного подавления аппаратуры потребителей (АП) СРНС «НАВСТАР», находящихся в некотором локальном районе, соответствующем зоне обслуживания комплексов РЭБ (КРЭБ).

### **1.3. ПРОЕКТНОЕ ЗАДАНИЕ**

Обосновать целесообразность организации режимов эпизодического радиомониторинга, исходя из

- тактических целей радиомониторинга;
- перечня решаемых задач;
- сложности аппаратурной реализации.

## 1.4. КВАЛИМЕТРИЯ ПО 1 МОДУЛЮ

### 1.4.1. Вопросы для самопроверки

1. Для каких целей используется в процессе радиомониторинга этап экспресс-анализа?
2. Какие основные характеристики используются в спектральных анализаторах сигналов?
3. Назовите область применения корреляционных методов радиомониторинга?
4. Что собой представляют многофункциональные средства радиомониторинга?
5. При каком уровне априорной информации используют когерентный обнаружитель?
6. Для каких типов сигналов используют некогерентный обнаружитель с квадратурной обработкой?
7. Когда используется согласованная фильтрация?
8. Назовите область применения энергетических обнаружителей.
9. За счет чего корреляционные обнаружители превосходят по помехоустойчивости энергетические обнаружители?
10. Чем отличается автокорреляционный обнаружитель с типовой структурой от автокорреляционного обнаружителя с квадратурной обработкой?
11. Назовите основные характеристики амплитудных детекторов.
12. Назовите основные характеристики фазовых детекторов.
13. Назовите основные характеристики частотных детекторов.
14. Назовите основные характеристики временных детекторов.
15. При каких условиях необходимо использовать автоматическую регулировку усиления?
16. Что обеспечивает частотная автоподстройка частоты?
17. Область применения фазовой автоподстройки частоты.
18. Какие типы антенн вам известны?
19. Какие типы преселекторов используются в приемниках?

20. Какие типы синтезаторов частоты используются в супергетеродинных приемниках?
21. Когда необходимо использовать методы пространственной селекции?
22. Когда необходимо использовать методы поляризационной селекции?
23. Когда необходимо использовать методы амплитудной селекции?
24. Когда используется временная селекция?
25. Что собой представляет селекция сигналов по форме?
26. Назовите основные характеристики демодуляторов с амплитудной телеграфией.
27. Назовите основные характеристики демодуляторов с частотной телеграфией.
28. Назовите основные характеристики демодуляторов фазоманипулированных сигналов.
29. При каких условиях необходимо использовать синхронизацию по несущей частоте?
30. При каких условиях необходимо использовать тактовую синхронизацию?

#### 1.4.2. Тесты для самопроверки

**Тест 1.** Чему равна дальность радиовидимости, если высота подъема антенны передатчика составляет 16 м, а высота подъема антенны приемника — 4 м?

**Ответы:** 1) 10 м; 2) 15 м; 3) 40 км; 4) 23,5 км.

**Тест 2.** Параметрами, какого из функциональных узлов приемника определяется минимальное значение коэффициента шума?

**Ответы:** 1) преселектором; 2) смесителем; 3) усилителем промежуточной частоты; 4) усилителем высокой частоты.

**Тест 3.** Какая информационная радиосистема обладает наибольшей дальностью?

**Ответы:** 1) РЛС; 2) система радиоуправления; 3) система радиоэлектронной борьбы; 4) средства радиомониторинга.

**Тест 4.** Чему равна среднеквадратичная погрешность оценивания частоты  $\sigma f$  в параллельном спектроанализаторе с известной полосой пропускания фильтра  $\Delta f$ ?

**Ответы:** 1)  $\sigma f = \Delta f$ ; 2)  $\sigma f = \Delta f/2$ ; 3)  $\sigma f = \Delta f/3$ ; 4)  $\sigma f = \Delta f/2 \sqrt{3}$ .

### 1.4.3. Таблица для переводов ответов в оценку

№ теста	Ответ № 1	Ответ № 2	Ответ № 3	Ответ № 4
Тест № 1				✓
Тест № 2				✓
Тест № 3				✓
Тест № 4				✓

Знаком «✓» обозначены правильные ответы. При наличии у студента трех или четырех правильных ответов — оценка «зачет», при прочих вариантах количества правильных ответов — оценка «незачет».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К 1 МОДУЛЮ

1. Дятлов А.П. Оптимизация РСПОИ: Учебное пособие. — Таганрог: ТРТУ, 1990.
2. Гуткин Л.С. Проектирование радиосистем и радиоустройств. — М.: Радиосвязь, 1986.
3. Дятлов А. П., Кульбикаян Б. Х. Радиомониторинг излучений спутниковых радионавигационных систем. — М.: Радио и связь, 2006.
4. Дятлов А.П. Обнаружители и измерители параметров сигналов в радиоконтроле: Учебное пособие. — Таганрог: ТРТУ, 1993.
5. Дятлов А. П., Дятлов П. А. Анализ и моделирование обнаружителей и демодуляторов связных сигналов: Учебное пособие № 3793. — Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2005.
6. Дятлов А. П. Анализ помехоустойчивости и оптимизации параметров обнаружителей: Учебное пособие. — Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1991.

7. Дятлов А. П., Дятлов П. А. Анализ и моделирование обнаружителей сигналов: Методические указания к лабораторно-практическим занятиям № 3312. –Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2002.
8. Дятлов А. П., Дятлов П. А. Анализ и моделирование демодуляторов сигналов: Методические указания к лабораторно-практическим занятиям. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2003.

## **2 УЧЕБНЫЙ МОДУЛЬ**

### **«ФОРМУЛИРОВКА СТАТИСТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ПРИ РАДИОМОНИТОРИНГЕ ИЗЛУЧЕНИЙ СРНС»**

#### **2.1. КОМПЛЕКСНАЯ ЦЕЛЬ МОДУЛЯ**

— ознакомление с алгоритмами статистических задач радиомониторинга излучений СРНС на примерах различных тактических ситуаций.

#### **2.2. СОДЕРЖАНИЕ 2 МОДУЛЯ**

**2.2.1.** РМ является начальным этапом при организации РЭБ, задачей которого является выработка достоверных, полных и своевременных целеуказаний, необходимых для формирования эффективных помех.

Сложность и состав задач РМ существенно зависит от особенностей режима функционирования СРНС «НАВСТАР».

Основной режим функционирования СРНС «НАВСТАР», который назовём штатным режимом, предполагает использование АП при наличии радиовидимости излучений КА, входящих в космический сегмент СРНС, при нормальных условиях распространения радиоволн и отсутствии организованных помех.

Для штатного режима функционирования СРНС «НАВСТАР» характерно наличие априорной информации о траекториях полётов космических аппаратов, виде навигационного сигнала (НС) и его энергетических, частотных и временных параметров. При этом априорно неизвестными параметрами НС, которые необходимо оценивать в результате РМ, являются амплитуда, доплеровское смещение частоты, временное запаздывание огибающей сигнала, а также закон формирования кодовой (манипулирующей) последовательности.

При постоянном закреплении некоторого варианта кодовой последовательности, формирующей манипулирующую функцию НС, за определённым КА, для её распознавания достаточно одного сеанса РМ, обеспечивающего накопление массива элементов НС, превышающего его базу. Затем в ходе даль-

нейшей обработки информации манипулирующая функция НС, излучаемого конкретным КА, полагается априорно известной. Однако в случае непредсказуемой смены номеров кодовых последовательностей для КА манипулирующая функция сигнала является априорно неизвестной, и в процессе РМ необходимо осуществлять её распознавание.

В «штатном» режиме функционирования СРНС «НАВСТАР» возможно несколько вариантов реализации НС.

Первый вариант характеризуется использованием в качестве НС фазоманипулированного сигнала (ФМС) на частоте  $L_1$  с манипуляцией «С» кодом.

Второй вариант характеризуется использованием в качестве НС двухкомпонентного ФМС на частоте  $L_1$  с манипуляцией «С» и «Р» кодами.

Третий вариант характеризуется использованием в качестве НС двухкомпонентного ФМС на частоте  $L_1$  с манипуляцией «С» и «Р» кодами, а на частоте  $L_2$  использованием ФМС с манипуляцией «Р» кодом.

В зависимости от варианта «штатного» режима СРНС «НАВСТАР» РМ осуществляется в одном или двух частотных поддиапазонах и включает в себя набор таких статистических задач, как обнаружение, автосопровождение КА, оценивание доплеровского смещения частоты, оценивание временного запаздывания огибающей сигнала, и в случае необходимости – распознавание манипулирующей функции.

В соответствии с планом модернизации СРНС «НАВСТАР», описанным в предисловии, в её характеристики вносятся существенные изменения при наличии угрозы радиоэлектронного противодействия. При этом после модернизации СРНС «НАВСТАР» сможет функционировать как в «штатном», так и в «нештатном» режиме, отличительной особенностью которого является существенное увеличение априорной неопределённости о пространственных, энергетических, частотных, временных и статистических характеристиках сигналов, что приводит к увеличению набора и сложности задач РМ.



В процессе РМ излучений СРНС «НАВСТАР», функционирующей в «нештатном» режиме, особого внимания заслуживают тактические ситуации, которые связаны с необходимостью проведения следующих действий:

- 1) своевременного выявления фактов как прекращения излучений отдельными КА, так и изменения их энергетического потенциала;
- 2) своевременного выявления изменения в структуре и параметрах радиоизлучений отдельных КА;
- 3) своевременного выявления дополнительных КА и траекторных изменений существующих КА с целью перегруппировки космического сегмента СРНС «НАВСТАР».

Модели радиообстановки при проведении РМ в зависимости от особенностей тактических ситуаций описываются двухкомпонентными и многокомпонентными процессами.

**2.2.2.** При формализации задач РМ целесообразно использовать их систематизацию и унификацию на основе положений теории распознавания образов.

К числу наиболее простых тактических ситуаций при РМ излучений СРНС «НАВСТАР» следует отнести задачу установления факта наличия или отсутствия излучений от отдельного КА, входящего в состав космического сегмента СРНС «НАВСТАР», при наличии целеуказаний по пространственным, частотным и временным характеристикам радиоизлучений.

Данная тактическая ситуация соответствует статистической задаче обнаружения при следующих исходных данных.

Целеуказания по каждому КА для сеанса РМ могут быть описаны следующими соотношениями:

$$|\hat{\alpha} - \alpha_n| < \frac{\theta_{0,5}}{2}; |\hat{\beta} - \beta_n| < \frac{\theta_{0,5}}{2}; |f_s - f_0| \leq \frac{\Delta f_d}{2}; \Delta f_s = \frac{2}{T_s}; t_0 \leq t \leq t_0 + T_c; \theta_{0,5} < \theta_p,$$

где  $\alpha_n, \beta_n$  – истинное значение пеленга и угла места КА относительно позиции комплекса радиомониторинга (КРМ);  $\hat{\alpha}, \hat{\beta}$  – оценки пеленга и угла места КА от-

носителю позиции КРМ;  $\theta_{0,5}$  – ширина диаграммы направленности антенны КРМ;  $\theta_p$  – величина элемента пространственного разрешения радиоизлучений от различных КА;  $f_0$  – частота радиоизлучения КА;  $f_s$  – частота сигнала, принимаемого КРМ;  $\Delta f_d$  – диапазон доплеровских смещений радиоизлучений КА, входящих в космический сегмент СРНС «НАВСТАР»;  $\Delta f_s$  – ширина спектра сигнала, принимаемого КРМ;  $T_s$  – длительность элемента сигнала;  $t_0, T_c$  – момент начала и длительность сеанса РМ.

Наряду с вышеперечисленными исходными данными априорно известно, что радиоизлучения всех КА СРНС «НАВСТАР» используют однократную фазовую манипуляцию по закону Голда с разными коэффициентами порождающего полинома для каждого КА.

Наличие пространственных и частотных целеуказаний при использовании в КРМ пространственной и частотной селекции позволяет преобразовать многокомпонентный входной процесс  $y_n(t)$  в двухкомпонентный входной процесс

$$y_2(t) = S(t) + n(t) \text{ при } t_0 \leq t \leq t_0 + T_c,$$

где  $y_2(t)$  – аддитивная смесь ФМС  $S(t)$  и гауссовой стационарной помехи  $n(t)$ , образованной космическими, атмосферными помехами, а также внутренним шумом комплекса радиомониторинга.

Алгоритм обнаружения ФМС в общем случае имеет вид:

$$\left. \begin{array}{l} H_0 : F_1[y_2(t)] = U_y(T) > U_{\text{пор}} \\ \overline{H}_0 : F_1[y_2(t)] = U_n(T) < U_{\text{пор}} \end{array} \right\} \text{ при } t_0 \leq t \leq t_0 + T, T \leq T_c,$$

где  $H_0, \overline{H}_0$  – гипотеза о наличии и отсутствии сигнала;  $F_1[y_2(t)]$  – оператор, описывающий функциональные преобразования в обнаружителе;  $U_y(T), U_n(T)$  – выходной эффект при воздействии на вход КРМ процессов  $y_2(t)$  и  $n(t)$ ;  $U_{\text{пор}}$  – пороговое напряжение;  $t_0, T$  – момент начала и постоянная интегрирования при обнаружении.

Вторая тактическая ситуация связана с контролем за изменением энергетического потенциала радиоизлучений КА СРНС «НАВСТАР» во времени за

счёт регулировки мощности передатчиков или использования управляемых фазированных многолучевых антенн.

Данная тактическая ситуация соответствует при интервальном оценивании статистической задаче различения уровней сигнала.

Исходные данные для этой задачи эквивалентны исходным данным рассмотренной выше задачи обнаружения.

Алгоритм различения уровней сигнала имеет следующий вид:

$$\{H_i\} \cup H_0; \{H_i\} = \{H_1, \dots, H_i, \dots, H_{m_u}\};$$

$$H_i: F_1[y_2(t)] = \hat{U}_i(T);$$

$$U_{\text{пор } i} < \hat{U}_i(T) < U_{\text{пор } i+1} \text{ при } \hat{t}_i < t < \hat{t}_i + \hat{T}_i;$$

$$U_{\text{пор } i+1} - U_{\text{пор } i} = \Delta U; \sum_i^{m_u} \hat{T}_i \leq T_c;$$

$$m_u = \frac{U_B - U_{\text{пор } 1}}{\Delta U},$$

где  $\{H_i\}$  – множество гипотез, соответствующих множеству оценок уровня сигнала  $\{U_i(T)\}$ ;  $U_{\text{пор } i}$  – пороговое напряжение;  $\hat{t}_i, \hat{T}_i$  – оценка начала установления уровня  $\hat{U}_i(T)$  и длительности его существования;  $U_B$  – верхняя граница ожидаемого уровня сигнала;  $\Delta U$  – шаг квантования уровня сигнала;  $m_u$  – количество возможных уровней сигнала.

Третья тактическая ситуация связана с выявлением радиоизлучений КА в «нештатных» участках частотного диапазона при исходных данных, аналогичных для случая, соответствующего первой тактической ситуации, за исключением того факта, что средняя частота «нового» сигнала  $f_s$  априорно неизвестна [ $f_s \in (f_n, f_b)$ ], где  $f_n, f_b$  – нижняя и верхняя границы частотного диапазона.

Данная тактическая ситуация соответствует статистической задаче совместного обнаружения и оценивания частоты сигнала:

$$\{H_{jf}\} \cup H_0; \{H_{jf}\} = \{H_{1f}, \dots, H_{jf}, \dots, H_{mf}\}; H_{jf}: F_2[y_2(t)] = \hat{f}_{sj}; \hat{f}_{sj} \in \left[ \hat{f}_{jf} \pm \frac{\Delta f_{\text{дов}}}{2} \right];$$

$$\Delta f_n \gg \Delta f_{\text{см}}; \Delta f_n = f_b - f_n; m_f = \frac{\Delta f_n}{\Delta f_{\text{дов}}} \text{ при } t_0 \leq t \leq t_0 + T_f, T_f \leq T_c,$$

где  $\{H_{jf}\}$  – множество гипотез, соответствующих множеству оценок частоты  $\{\hat{f}_{sj}\}$  при интервальном оценивании;  $F_2[y_2(t)]$  – оператор, описывающий функциональные преобразования при оценивании частоты;  $\Delta f_{\text{дов}}$  – доверительный интервал при оценивании частоты;  $\Delta f_n$  – ширина рабочего частотного диапазона;  $m_f$  – количество гипотез  $H_{jf}$ ;  $\Delta f_{\text{см}}$  – максимальная ширина спектра ожидаемых сигналов;  $T_f$  – длительность сеанса оценивания частоты;  $\hat{f}_{jf}$  – оценка средней частоты  $j$ -го доверительного интервала.

Четвертая тактическая ситуация связана с определением состава и параметров радиообстановки при наличии пространственных целеуказаний об исследуемом КА и наличии в эфире, кроме полезного радиоизлучения, непреднамеренных и организованных помех.

Исходные данные для этой ситуации соответствуют исходным данным для первой тактической ситуации за исключением того, что модель радиообстановки на входе КРМ описывается не двухкомпонентным процессом  $y_2(t)$ , а многокомпонентным

$$y_n(t) = S(t) + \sum_{j=1}^{n_p} P_j(t) + n(t),$$

где  $P_j(t)$  – квазидетерминированный процесс, представляющий собой коррелированную помеху;  $n_p$  – ожидаемое количество коррелированных помех.

Данная тактическая ситуация может быть формализована в виде статистической задачи совместного разрешения, обнаружения и оценивания.

Алгоритм для данной задачи в общем виде может быть описан следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \{H_{0i}\} \cup \{H_{fi}\}; \{H_{0i}\} &= \{H_{01}, \dots, H_{0i}, \dots, H_{0n}\}; \\ \{H_{fi}\} &= \{H_{f1}, \dots, H_{fi}, \dots, H_{fn}\}; n \in [2, n_p + 2]; \end{aligned}$$

$$H_{0i}: F_3[y_n(t)] \rightarrow y_{2i}(t) \rightarrow F_4[y_{2i}(t)] = U_i(T) > U_{\text{пор}};$$

$$H_{fi}: F_3[y_n(t)] \rightarrow y_{2i}(t) \rightarrow F_5[y_{2i}(t)] = \hat{f}_{si};$$

$$\hat{f}_{si} \in \left[ \hat{f}_i \pm \frac{\Delta f_{p1}}{2} \right] \text{ при } t_0 \leq t \leq t_0 + T_{\text{of}}, T_{\text{of}} \leq T_c,$$

где  $\{H_{0i}\}$  – множество гипотез, соответствующих обнаружению  $(n_p + 1)$  компонентов;  $\{H_{fi}\}$  – множество гипотез, соответствующих оцениванию частоты  $(n_p + 1)$  компонентов;  $F_3[y_n(t)]$  – оператор разрешения компонентов на основе частотной селекции;  $F_{4(s)}[y_{2i}(t)]$  – оператор, описывающий функциональные преобразования при обнаружении и интервальном оценивании частоты  $i$ -го компонента  $S_i(t)$ ;  $U_i(T)$  – эффект на выходе обнаружителя сигнала  $S_i(t)$ ;  $\Delta f_{p1}$  – разрешающая способность по частоте;  $T_{\text{of}}$  – длительность сеанса при решении задачи совместного обнаружения и оценивания частоты;  $\hat{f}_i$  – оценка средней частоты  $i$ -го доверительного интервала;  $\hat{f}_{si}$  – оценка средней частоты  $i$ -го компонента.

Пятая тактическая ситуация связана с проведением контроля за энергетическим потенциалом радиоизлучений КА при отсутствии точных пространственных целеуказаний. Такая ситуация возникает при нестационарных траекториях КА и в случае необходимости проведения РМ в режиме сопровождения радиоизлучений различных КА «на проходе».

Данная тактическая ситуация может быть формализована в виде статистической задачи совместного пространственного поиска, обнаружения и различения.

Алгоритм для данной задачи в общем виде может быть описан следующими соотношениями:

$$H_0 \cup \{H_{j\theta}\}; \{H_{j\theta}\} = \{H_{1\theta}, \dots, H_{i\theta}, \dots, H_{m\theta}\};$$

$$H_{j\theta}: F_6[y_2(t)] = \hat{\theta}_j = (\hat{\alpha}_j, \hat{\beta}_j);$$

$$\hat{\theta}_j \in \left[ \theta_j \pm \frac{\Delta\theta_d}{2} \right]; \Delta\theta_d \leq \theta_{0,5}; m_\theta = \frac{\Delta\alpha\Delta\beta}{\theta_{0,5}^2} \text{ при } t_0 \leq t \leq t_0 + T_\theta, T_\theta \leq T_c,$$

где  $\{H_{j\theta}\}$  – множество гипотез, соответствующих множеству оценок пространственных координат КА  $\{\hat{\theta}_j\}$  при интервальном оценивании;  $\hat{\alpha}_j, \hat{\beta}_j$  –  $j$ -я оценка пеленга и угла места, соответствующая гипотезе  $H_{j\theta}$ ;  $F_6[y_2(t)]$  – оператор, описывающий функциональные преобразования при определении пространственных координат КА;  $\Delta\theta_d$  – доверительный интервал при оценивании пространственных координат;  $\Delta\alpha, \Delta\beta$  – сектор неопределённости по азимуту и углу места;  $m_\theta$  – количество гипотез  $H_{j\theta}$ ;  $T_\theta$  – длительность сеанса оценивания пространственных координат КА.

Шестая тактическая ситуация связана с долговременным мониторингом радиоизлучений конкретных КА на основе автосопровождения с целью контроля их траекторных, энергетических и частотных характеристик.

Исходные данные для этой ситуации характеризуются многокомпонентной радиообстановкой, в состав которой могут входить не только один или несколько полезных сигналов, а также и коррелированные помехи. В зависимости от конкретизации исходных условий эта ситуация соответствует целому набору статистических задач.

В случае необходимости контроля состава радиоизлучения исследуемого КА, например, при наличии сигналов на частоте  $L_1$  с использованием «С» и «Р» кодов, и на частоте  $L_2$  с использованием «Р» кода, следует решать статистическую задачу совместного обнаружения, автосопровождения и классификации.

Алгоритм для данной задачи в общем виде может быть представлен следующим образом:

$$H_0 \cup H_{\hat{\theta}} \cup \{H_{ki}\}; \{H_{ki}\} \in \{H_{k1}, \dots, H_{ki}, \dots, H_{km}\};$$

1) на частоте  $L_1$   $m_s = 2$ :

$$H_{k1} \equiv H_c: F_7[y_n(t)] = \hat{S}_c(t);$$

$$H_{ki} \equiv H_p: F_8[y_n(t)] = \hat{S}_p(t);$$

$$H_{km} \equiv H_{cp}: F_9[y_n(t)] = \hat{S}_c(t) + \hat{S}_p(t);$$

$$y_n(t) = \hat{S}_c(t) + \hat{S}_p(t) + n(t) \text{ при } t_0 \leq t \leq t_0 + T_{k1}, T_{k1} \leq T_c,$$

2) на частоте  $L_2$   $m_s = 1$ :

$$H_{k1} \equiv H_p: F_{10}[y_2(t)] = \hat{S}_{p_2}(t); \bar{H}_0 \cup \bar{H}_{k1}(\bar{H}_p);$$

$$y_2(t) = \hat{S}_{p_2}(t) + n(t) \text{ при } t_0 \leq t \leq t_0 + T_{k2}, T_{k2} \leq T_c,$$

где  $m$  – количество сигналов;  $\{H_{ki}\}$  – множество гипотез, соответствующих различным вариантам состава компонентов в радиоизлучениях КА;  $H_c, H_p$  – гипотеза о наличии в радиоизлучении КА сигнала  $S_c(t)$  или  $S_p(t)$ , т.е. кодов «С» или «Р»;  $H_{cp}$  – гипотеза о наличии в радиоизлучении КА одновременно сигналов  $S_c(t)$  и  $S_p(t)$ ;  $\hat{S}_c(t)$  и  $\hat{S}_p(t)$  – классификация сигналов  $S_c(t)$  и  $S_p(t)$ ;  $F_7[y_n(t)], F_8[y_n(t)], F_9[y_n(t)]$  – операторы, соответствующие функциональным преобразованиям, обеспечивающим разделение и оценку наличия сигналов  $S_c(t)$  и  $S_p(t)$ ;  $F_{10}[y_2(t)]$  – оператор, обеспечивающий функциональные преобразования по выделению сигнала  $S_p(t)$ ;  $T_{k1}, T_{k2}$  – длительность сеанса классификации состава радиоизлучения КА.

В случае необходимости обеспечения автосопровождения радиоизлучения контролируемого КА в условиях воздействия на боковые лепестки диаграммы направленности антенны комплекса радиомониторинга (КРМ) организованных помех на частоте  $L_1$  следует решать статистическую задачу совместного разрешения, обнаружения, автосопровождения.

Алгоритм для данной задачи в общем виде может быть представлен следующим образом:

$$H_{0s} \cup H_{0p} \cup H_0;$$

$$H_{0s}: F_{11}[y_3(t)] = \hat{U}_s(t) > U_{пор1};$$

$$H_{0p} \equiv H_p: F_{12}[y_3(t)] = \hat{U}_p(t) > U_{пор2};$$

$$H_0: F_{13}[y_3(t)] = \hat{\theta}; f_s - f_p \leq \frac{\Delta f_s}{2};$$

$$y_3(t) = S_c(t) + P(t) + n(t) \text{ при } t_0 \leq t \leq t_0 + T_c,$$

где  $H_{0s}$ ,  $H_{0p}$  – гипотезы о наличии полезного сигнала  $S_c(t)$  и коррелированной помехи  $P(t)$ ;  $H_0$  – гипотеза об интервальной оценке пространственных координат КА;  $\hat{U}_s(t)$ ,  $\hat{U}_p(t)$  – оценка амплитуды сигнала  $S_c(t)$  и помехи  $P(t)$ ;  $U_{\text{пор}1}$ ,  $U_{\text{пор}2}$  – пороговые напряжения при обнаружении  $S_c(t)$  и  $P(t)$ ;  $f_s, f_p$  – средняя частота сигнала  $S_c(t)$  и помехи  $P(t)$ .

В случае необходимости обеспечения демодуляции сигналов контролируемого КА для вскрытия закона и параметров манипулирующей функции, например, с целью формирования сигналоподобной помехи, используемой для радиоэлектронного подавления (РЭП) АП СРНС «НАВСТАР», следует решать статистическую задачу совместного обнаружения, автосопровождения, классификации, оценивания, демодуляции.

Алгоритм для данной задачи в общем виде может быть представлен следующим образом:

$$H_0 \cup H_c \cup H_\theta \cup \{H_{fi}\} \cup \{H_{\tau i}\} \cup H_d;$$

$$\{H_{\tau i}\} = \{H_{1i}, \dots, H_{\tau i}, \dots, H_{m_\tau}\}, m_\tau = \frac{2\Delta\tau}{T_\tau};$$

$$H_{\tau i}: F_{14}[y_{2i}(t)] = \hat{\tau}_i; \hat{\tau}_i \in \left[ \tau_i \pm \frac{\Delta\tau_d}{2} \right]; \Delta\tau_d \leq \frac{T_\tau}{2};$$

$$H_d: F_{15}[y_2(t)] = \Pi(t - \hat{\tau}_i) \text{ при } t_0 \leq t \leq t_0 + T_d, T_d \leq T_c,$$

где  $\{H_{fi}\}$  – множество гипотез, соответствующих множеству оценок временного сдвига  $\tau_i$  манипулирующей функции сигнала, обусловленного разносом  $i$ -го КА и КРМ;  $\Delta\tau$  – интервал неопределённости для параметра  $\tau_i$ ;  $m_\tau$  – количество гипотез  $H_{\tau i}$ ;  $\Delta\tau_d$  – доверительный интервал при оценивании  $\tau_i$ ;  $\hat{\tau}_i$  – оценка временного сдвига  $\tau_i$ ;  $F_{14}[y_{2i}(t)]$  – оператор, описывающий функцио-



нальные преобразования при оценивании параметра  $\tau_i$ ;  $H_d$  – гипотеза о достоверной демодуляции;  $F_{15}[y_2(t)]$  – оператор, описывающий функциональные преобразования при демодуляции;  $T_d$  – длительность сеанса демодуляции.

Седьмая тактическая ситуация связана с РМ излучений всех КА СРНС «НАВСТАР», находящихся в зоне обслуживания КРЭБ с использованием КРМ.

Целесообразность использования однопозиционного КРМ обусловлена возможностью существенного снижения объёма используемой аппаратуры, а также стоимости организации и проведения РМ по сравнению с вариантами многопозиционного построения КРМ.

Данная тактическая ситуация соответствует статистической задаче сопровождения на «проходе» совместно с задачами разрешения, обнаружения, различения, классификации, оценивания, демодуляции.

Набор совместно решаемых задач определяется целями и исходными данными РМ, примеры которых рассмотрены при описании вышеприведенных тактических задач.

Важным достоинством РМ с использованием сопровождения на «проходе» является возможность повышения пропускной способности и формирование комплексного целеуказания для РЭП аппаратуре потребителей СРНС «НАВСТАР», использующих радиоизлучения от КА, входящих в космический сегмент СРНС «НАВСТАР» и находящихся в зоне наблюдения КРМ в течение сеанса противодействия.

Алгоритм для данной задачи может быть представлен в следующем виде:

$$\{H_{0j}\} \cup \{H_{cj}\} \cup \{H_{\theta j}\} \cup \{H_{fj}\} \cup \{H_{tj}\} \cup \{H_{dj}\} \text{ при } t_0 \leq t \leq t_0 + T_{ка};$$

$$H_{0j} \cup H_{cj} \cup H_{\theta j} \cup H_{fj} \cup H_{tj} \cup H_{dj},$$

$$j \in [1, n_{ка}] \text{ при } t_{(j-1)} \leq t \leq t_{(j-1)} + T_{cj}, T_{cj} \leq \frac{T_{ка}}{n_{ка}},$$

где  $\{H_{0j}\}, \{H_{cj}\}, \{H_{0j}\}, \{H_{fj}\}, \{H_{tj}\}, \{H_{dj}\}$  – множество рассмотренных выше гипотез для РМ радиоизлучений КА, входящих в космический сегмент СРНС «НАВСТАР» и находящихся в зоне обслуживания КРМ;  $T_{ка}$  – длительность возможного контакта КРМ с КА;  $t_{(j-1)}, T_{cj}$  – начало и длительность РМ радиоизлучения  $j$ -го КА;  $n_{ка}$  – количество КА, находящихся в зоне наблюдения КРМ.

Конкретизация алгоритмов рассмотренных выше задач РМ возможна на основе использования результатов синтеза при применении следующих статистических критериев эффективности:

- 1) для задач поиска и обнаружения – критерия Неймана-Пирсона;
- 2) для задач различения, классификации, интервального оценивания и демодуляции – критерия идеального наблюдателя;
- 3) для задач разрешения и точечного оценивания – критерия максимального правдоподобия;
- 4) для задач совместного решения нескольких частных статистических задач – критерия среднего риска.

### **2.3. ПРОЕКТНОЕ ЗАДАНИЕ**

Обосновать алгоритм радиомониторинга излучений СРНС при разных уровнях априорной неопределенности о

- координатах космических аппаратов;
- границах рабочего частотного диапазона.

### **2.4. КВАЛИМЕТРИЯ ПО 2 МОДУЛЮ**

#### **2.4.1. Вопросы для самопроверки**

1. Какими основными характеристиками должен обладать обнаружитель сигналов?
2. В чем разница между различением и обнаружением сигналов?
3. В каких случаях необходимо использовать разрешение сигналов?

4. Какие информативные параметры сигналов необходимо классифицировать в процессе радиомониторинга?
5. Приведите перечень параметров сигнала, которые необходимо определять на этапе оценивания параметров сигналов?
6. Чем отличается задача фильтрации от задачи оценивания?
7. Дайте определение функции правдоподобия?
8. Какими свойствами обладает гауссов процесс?
9. Назовите необходимые условия для обеспечения стационарности случайного процесса?
10. Какие виды негауссовых процессов вам известны?
11. Какие параметры вызывают нестационарность случайных процессов?
12. Для решения каких статистических задач используется критерий Неймана-Пирсона?
13. Назовите достоинства и недостатки при использовании в качестве критерия помехоустойчивости отношения сигнал/шум.
14. При решении каких статистических задач необходимо использовать критерий минимума среднеквадратичной погрешности?
15. Какие требования по помехоустойчивости предъявляются к радиосистеме передачи информации высокой достоверности?
16. Какие помехи называются коррелированными?
17. Какие помехи называются некоррелированными?
18. Назовите типы процессов, которые можно отнести к классу узкополосных помех?
19. Назовите типы процессов, которые можно отнести к широкополосным помехам?
20. Какие типы помех представляют собой класс естественных помех?
21. Какие классы процессов используются при реализации организованных помех?
22. Дайте определение комплексного спектра процесса?
23. В каких случаях необходимо определять амплитудный спектр процесса?

24. В каких случаях необходимо определять фазовый спектр процесса?
25. В каких случаях используется энергетический двухсторонний спектр процесса?
26. В каких случаях используется энергетический односторонний спектр процесса?
27. Для решения каких задач используется преобразование Фурье?
28. Для решения каких задач используется преобразование Винера-Хинчина ?
29. Перечислите основные характеристики простых импульсных сигналов?
30. Перечислите основные характеристики квазибелого шума?

#### 2.4.2. Тесты для самопроверки

**Тест 1.** Каким параметром антенны определяется разрешающая способность по углу?

**Ответы:** 1) коэффициентом усиления антенны; 2) коэффициентом полезного действия антенны; 3) уровнем боковых лепестков ДНА; 4) шириной ДНА.

**Тест 2.** Каким необходимо выбрать нормированный порог, чтобы обеспечить уровень доверительной вероятности 0,997?

**Ответы:** 1) нормированный порог равен 1; 2) нормированный порог равен 5; 3) нормированный порог равен 2; 4) нормированный порог равен 3.

**Тест 3.** При каких значениях коэффициента фильтрации обеспечивается нормализация выходного эффекта?

**Ответы:** 1) коэффициента фильтрации равен 1; 2) коэффициента фильтрации равен 5; 3) коэффициента фильтрации равен 10; 4) коэффициента фильтрации равен 100.

**Тест 4.** Какой из типов обнаружителей обеспечивает наибольшую помехоустойчивость?

**Ответы:** 1) энергетический обнаружитель; 2) некогерентный обнаружитель; 3) автокорреляционный обнаружитель; 4) когерентный обнаружитель.

**2.4.3. Таблица для переводов ответов в оценку**

<b>№ теста</b>	<b>Ответ № 1</b>	<b>Ответ № 2</b>	<b>Ответ № 3</b>	<b>Ответ № 4</b>
Тест № 1				✓
Тест № 2				✓
Тест № 3				✓
Тест № 4				✓

Знаком «✓» обозначены правильные ответы. При наличии у студента трех или четырех правильных ответов — оценка «зачет», при прочих вариантах количества правильных ответов — оценка «незачет».

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ КО 2 МОДУЛЮ**

1. Дятлов А.П. Обнаружители и измерители параметров сигналов в радио-контроле: Учебное пособие. — Таганрог: ТРТУ, 1993.
2. Дятлов А. П., Дятлов П. А. Анализ и моделирование обнаружителей и демодуляторов связных сигналов: Учебное пособие. — Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2005.

## 3 УЧЕБНЫЙ МОДУЛЬ

### «РАБОЧИЕ МОДЕЛИ РАДИООБСТАНОВКИ»

#### 3.1. КОМПЛЕКСНАЯ ЦЕЛЬ МОДУЛЯ

— ознакомление с особенностями формирования моделей радиобстановки в зависимости от набора исходных условий.

#### 3.2. СОДЕРЖАНИЕ 2 МОДУЛЯ

**3.2.1.** Каждый КА, входящий в космический сегмент СРНС «НАВСТАР», может формировать набор радиоизлучений, соответствующий различным вариантам НС.

В настоящее время в СРНС «НАВСТАР» применяются одночастотные и двухчастотные излучения с использованием частот  $L_1$  и  $L_2$ . При модернизации СРНС «НАВСТАР» планируется осуществление радиоизлучений на нескольких дополнительных частотах.

НС представляют собой одно- и двухкомпонентные фазоманипулированные (ФМ-2) процессы с использованием псевдослучайных манипулирующих функций на основе «С» и «Р» кодов. В зоне радиовидимости КРМ могут одновременно находиться от 4 до 8 КА.

При проведении РМ необходимо учитывать динамику движения КА, условия распространения радиоволн, а также различные помехи естественного и искусственного происхождения.

Условия распространения радиоволн могут изменяться в зависимости от состояния тропосферы и ионосферы, а также геометрии наблюдаемых КА.

Глубина замираний радиоволн в L диапазоне составляет порядка 6 дБ, период замираний находится в интервале от 2 до 15 с, а интервал изменения временной задержки находится в промежутке от  $10^{-7}$  с до  $3,3 \cdot 10^{-7}$  с.

При функционировании СРНС «НАВСТАР» необходимо учитывать фазовые искажения сигналов, которые обусловлены большим количеством факто-

ров, прежде всего эффектом Доплера, тропосферными и ионосферными аномалиями и уходом частоты опорного генератора, расположенного на КА. Величина доплеровского сдвига частоты определяется параметрами орбиты КА и расположением КРМ, причём для каждого КА эта величина индивидуальна.

РМ осуществляется в присутствии аддитивных и неаддитивных помех. Аддитивные помехи отличаются большим многообразием. Они могут быть обусловлены наличием собственных шумов КРМ, космических и атмосферных шумов, излучения Земли, непреднамеренными и организованными помехами различных типов.

В соответствии с общепринятой классификацией аддитивные помехи подразделяются на гауссовские и негауссовские, стационарные и нестационарные, узкополосные и широкополосные, коррелированные и некоррелированные.

Неаддитивные (мультипликативные) помехи проявляются в виде замираний сигналов за счёт наличия переотражений и изменения во времени параметров эфира и аппаратуры.

В соответствии с рассмотренными в подразделе 1.3 тактическими ситуациями, при проведении РМ излучений СРНС «НАВСТАР» целесообразно использовать следующий набор рабочих моделей радиообстановки.

Первая модель радиообстановки соответствует двухкомпонентному процессу. Такая модель имеет место при одновременном использовании пространственной и частотной селекции, что и обеспечивает разрежение потока сигналов и помех. Эта модель описывается аддитивным двухкомпонентным процессом:

$$y_2(t) = S_i(t) + N(t) \text{ при } t_0 \leq t \leq t_0 + T_c,$$

где  $S_i(t)$  – навигационный сигнал (НС) от  $i$ -го КА;  $N(t)$  – гауссовая помеха;  $t_0$ ,  $T_c$  – момент начала и длительность сеанса РМ.

С учётом кодовой структуры фазоманипулированный сигнал (ФМС) СРНС «НАВСТАР» на входе комплекса радиомониторинга, имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 S_i(t) &= U_{\text{msi}} \Pi_i(t - \tau_i) \cos[\omega_{\text{si}}(t - \tau_i) + \varphi_{\text{si}}]; \quad \omega_{\text{si}} = \omega_0 + \omega_{\text{дi}} \\
 \omega_0 &= 2\pi f_0; \quad f_0 \in [L_1, L_2, \dots, L_x]; \quad \omega_{\text{дi}} = 2\pi f_{\text{дi}}; \\
 \Pi_i(t) &= D_i(t) Q_i(t) = \sum_{j_0=1}^{M_0} v_i \text{rect}[t - (j_0 - 1)T_9]; \\
 M_0 &= \text{ent}\left[\frac{T_c}{T_9}\right] = M_1 M_2 M_3; \quad M_1 = \frac{T_{\text{к}}}{T_9}; \quad M_2 = \frac{T_6}{T_{\text{к}}}; \quad M_3 = \text{ent}\left[\frac{T_c}{T_6}\right]; \\
 D_i(t) &= \sum_{j_3=1}^{M_3} a_i \text{rect}[t - (j_3 - 1)T_6]; \quad Q_i(t) = \sum_{j_2=1}^{M_2} g_i[t - (j_2 - 1)T_{\text{к}}]; \\
 g_i(t) &= \sum_{j_1=1}^{M_1} b_i \text{rect}[t - (j_1 - 1)T_9],
 \end{aligned}$$

где  $S_i(t)$  – НС, соответствующий излучению  $i$ -го КА;  $\omega_{\text{si}}$  – частота НС  $S_i(t)$  на входе КА;  $U_{\text{msi}}, f_{\text{дi}}, \varphi_{\text{si}}$  – амплитуда, доплеровский сдвиг и начальная фаза ФМС;  $f_0$  – средняя частота ФМС, излучаемого КА;  $\text{rect}[x]$  – временное окно;  $L_1, L_2, \dots, L_x$  – набор частот излучений КА СРНС «НАВСТАР» (в настоящее время  $L_1$  и  $L_2$ , в будущем добавится  $L_5$ );  $\tau_i$  – временное запаздывание ФМС, соответствующее дальности между КА и КРМ;  $\Pi_i(t)$  – псевдослучайная последовательность, осуществляющая манипуляцию ФМС  $S_i(t)$ ;  $D_i(t)$  – навигационные данные;  $g_i(t)$  – манипулирующая последовательность ФМС  $S_i(t)$  на кодовом интервале  $T_{\text{к}}$ ;  $Q_i(t)$  – кодовая последовательность ФМС  $S_i(t)$  на интервале, равном длительности бита  $T_6$ ;  $T_9$  – длительность элемента манипулирующей функции ФМС;  $a_i, b_i, v_i$  – коэффициенты, принимающие значение  $\pm 1$  согласно закону чередования элементов в функциях  $D_i(t), g_i(t), \Pi_i(t)$ ;  $\text{ext}[x]$  – целая часть  $x$ ;  $M_1, M_2, M_3$  – количество временных окон на временных интервалах  $T_{\text{к}}, T_6, T_c$ ;  $M_0$  – количество элементов на интервале  $T_c$ .

Гауссовская помеха  $N(t)$ , обусловленная совокупностью внутреннего шума КРМ, космических и атмосферных помех, может быть стационарной  $n(t)$  и



нестационарной  $\varphi(t)n(t)$ , где  $\varphi(t)$  – функция, соответствующая изменению уровня помехи.

В качестве модели гауссовой стационарной помехи  $n(t)$  используется квазибелый шум с автокорреляционной функцией

$$R(\tau) = \sigma_n^2 r_n(\tau) \cos \omega_n \tau \quad \text{при} \quad r_n(\tau) = \text{sinc}(\pi \Delta f_n \tau); \quad \omega_n = 2\pi f_n,$$

где  $\sigma_n^2$  – дисперсия помехи  $n(t)$ ;  $r_n(\tau)$  – огибающая коэффициента автокорреляции помехи  $n(t)$ ;  $f_n$ ,  $\Delta f_n$  – средняя частота и ширина спектра помехи  $n(t)$ .

При априорно известных частоте  $f_0$  и длительности элемента  $T_3$  ФМС параметры помехи  $n(t)$  соответствует следующим условиям:

$$f_n \approx f_0, \Delta f_n = 2/T_3.$$

При функционировании СРНС «НАВСТАР» в «штатном» режиме ФМС относится к классу квазидетерминированных сигналов с неизвестными параметрами  $U_{\text{msi}}, f_{\text{дi}}, \tau_i, \varphi_{\text{si}}$ . Для случаев, когда отсутствует априорная информация о манипулирующей функции  $g_i(t)$ , ФМС относятся к классу сигналов с неизвестной формой.

Вторая рабочая модель радиообстановки описывается аддитивным трёхкомпонентным процессом

$$y_3(t) = S(t) + P(t) + n(t) \quad \text{при} \quad t_0 \leq t \leq t_0 + T_c,$$

где  $P(t)$  – коррелированная помеха.

Для ситуаций, когда радиоизлучение КА является двухкомпонентным, при использовании в КРМ пространственной селекции модель радиообстановки является трехкомпонентной:

$$y_3(t) = S_c(t) + S_p(t) + n(t) \quad \text{при} \quad t_0 \leq t \leq t_0 + T_c,$$

где  $S_c(t)$  – ФМС с манипулирующей функцией на основе «С» кода;  $S_p(t)$  – ФМС с манипулирующей функцией на основе «Р» кода.

Для ситуаций, когда радиоизлучение КА является однокомпонентным, а по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны КРМ воздействует мощная коррелированная помеха  $P(t)$ , модель радиообстановки также является

трехкомпонентной. Коррелированная помеха  $P(t)$  может представлять собой гармонические, частотно-модулированные, фазоманипулированные и т. п. процессы с шириной спектра, не превышающей ширину спектра ФМС  $\Delta f_s$ .

Третья рабочая модель радиообстановки описывается многокомпонентным аддитивным процессом в следующем виде:

$$y_n(t) = S(t) + \sum_{j=1}^{n_p} P_j(t) + n(t) \quad \text{при} \quad t_0 \leq t \leq t_0 + T_c,$$

где  $P_j(t)$  –  $j$ -я коррелированная помеха;  $n_p$  – количество коррелированных помех.

Многокомпонентная модель радиообстановки соответствует ситуациям, когда в КРМ используется слабонаправленная антенна. При этом приём контролируемого ФМС  $S_i(t)$  приходится осуществлять в присутствии ФМС от всех КА, находящихся в зоне радиовидимости комплекса радиомониторинга, и аддитивный процесс выглядит следующим образом

$$y_{n1}(t) = S_i(t) + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq i}}^{n_{\text{ка}}-1} S_m(t) + n(t) \quad \text{при} \quad t_0 \leq t \leq t_0 + T_c,$$

где  $S_m(t)$  – ФМС, соответствующий радиоизлучению  $m$ -го КА и представляющий собой коррелированную помеху.

Для ситуаций, когда в КРМ используется направленная антенна, модель радиообстановки может быть многокомпонентной при многолучевом приёме НС за счёт переотражений или при приеме организованных сигналоподобных помех. При этом имеем:

$$y_{n2}(t) = S_i(t) + \sum_{m=1}^{M_{\Pi}} K_m S_i(t - \tau_m) + n(t) \quad \text{при} \quad t_0 \leq t \leq t_0 + T_c,$$

где  $S_i(t - \tau_m)$  – ФМС с временным сдвигом относительно  $S_i(t)$  на  $\tau_m$  и представляющий собой коррелированную помеху;  $K_m$  – нормированный уровень ФМС  $S_i(t - \tau_m)$ ;  $M_{\Pi}$  – количество сопутствующих ФМС.

Модели радиообстановки, представленные процессами  $y_{n1}(t)$  и  $y_{n2}(t)$ , являются наиболее сложными, поскольку соответствуют проведению РМ в присутствии как внутренних шумов, так и взаимных или сигналоподобных помех.

Рассмотренные рабочие модели радиообстановки адекватно и полно отражают набор возможных тактических ситуаций, возникающих при проведении РМ излучений СРНС.

Использование рабочих моделей радиообстановки обеспечивает формализацию статистических задач обработки информации при декомпозиции процесса РМ на этапы.

$$M_0 = \text{ent} \left[ \frac{T_c}{T_3} \right] = M_1 M_2 M_3; \quad M_1 = \frac{T_k}{T_3}; \quad M_2 = \frac{T_6}{T_k}; \quad M_3 = \text{ent} \left[ \frac{T_c}{T_6} \right];$$

$$D_i(t) = \sum_{j_3=1}^{M_3} a_i \text{rect}[t - (j_3 - 1)T_6]; \quad Q_i(t) = \sum_{j_2=1}^{M_2} g_i[t - (j_2 - 1)T_k];$$

$$g_i(t) = \sum_{j_1=1}^{M_1} b_i \text{rect}[t - (j_1 - 1)T_3],$$

где  $S_i(t)$  – НС, соответствующий излучению  $i$ -го КА;  $\omega_{si}$  – частота НС  $S_i(t)$  на входе КА;  $U_{msi}, f_{di}, \varphi_{si}$  – амплитуда, доплеровский сдвиг и начальная фаза ФМС;  $f_0$  – средняя частота ФМС, излучаемого КА;  $\text{rect}[x]$  – временное окно;  $\overline{L_1, L_2, \dots, L_x}$  – набор частот излучений КА СРНС «НАВСТАР» (в настоящее время  $L_1$  и  $L_2$ , в будущем добавится  $L_5$ );  $\tau_i$  – временное запаздывание ФМС, соответствующее дальности между КА и КРМ;  $\Pi_i(t)$  – псевдослучайная последовательность, осуществляющая манипуляцию ФМС  $S_i(t)$ ;  $D_i(t)$  – навигационные данные;  $g_i(t)$  – манипулирующая последовательность ФМС  $S_i(t)$  на кодовом интервале  $T_k$ ;  $Q_i(t)$  – кодовая последовательность ФМС  $S_i(t)$  на интервале, равном длительности бита  $T_6$ ;  $T_3$  – длительность элемента манипулирующей функции ФМС;  $a_i, b_i, v_i$  – коэффициенты, принимающие значение  $\pm 1$  согласно закону чередования элементов в функциях  $D_i(t), g_i(t), \Pi_i(t)$ ;  $\text{ext}[x]$  – целая часть  $x$ ;  $M_1, M_2, M_3$  – количество временных окон на временных интервалах  $T_k, T_6, T_c$ ;  $M_0$  – количество элементов на интервале  $T_c$ .

Гауссовская помеха  $N(t)$ , обусловленная совокупностью внутреннего шума КРМ, космических и атмосферных помех, может быть стационарной  $n(t)$  и нестационарной  $\varphi(t)n(t)$ , где  $\varphi(t)$  – функция, соответствующая изменению уровня помехи.

В качестве модели гауссовой стационарной помехи  $n(t)$  используется квазибелый шум с автокорреляционной функцией

$$R(\tau) = \sigma_n^2 r_n(\tau) \cos \omega_n \tau \quad \text{при} \quad r_n(\tau) = \text{sinc}(\pi \Delta f_n \tau); \quad \omega_n = 2\pi f_n,$$

где  $\sigma_n^2$  – дисперсия помехи  $n(t)$ ;  $r_n(\tau)$  – огибающая коэффициента автокорреляции помехи  $n(t)$ ;  $f_n$ ,  $\Delta f_n$  – средняя частота и ширина спектра помехи  $n(t)$ .

При априорно известных частоте  $f_0$  и длительности элемента  $T_3$  ФМС параметры помехи  $n(t)$  соответствует следующим условиям:

$$f_n \approx f_0, \Delta f_n = 2/T_3.$$

При функционировании СРНС «НАВСТАР» в «штатном» режиме ФМС относится к классу квазидетерминированных сигналов с неизвестными параметрами  $U_{\text{msi}}$ ,  $f_{\text{дi}}$ ,  $\tau_{\text{i}}$ ,  $\varphi_{\text{si}}$ . Для случаев, когда отсутствует априорная информация о манипулирующей функции  $g_i(t)$ , ФМС относятся к классу сигналов с неизвестной формой.

Вторая рабочая модель радиообстановки описывается аддитивным трёхкомпонентным процессом

$$y_3(t) = S(t) + P(t) + n(t) \quad \text{при} \quad t_0 \leq t \leq t_0 + T_c,$$

где  $P(t)$  – коррелированная помеха.

Для ситуаций, когда радиоизлучение КА является двухкомпонентным, при использовании в КРМ пространственной селекции модель радиообстановки является трехкомпонентной:

$$y_3(t) = S_c(t) + S_p(t) + n(t) \quad \text{при} \quad t_0 \leq t \leq t_0 + T_c,$$

где  $S_c(t)$  – ФМС с манипулирующей функцией на основе «С» кода;  $S_p(t)$  – ФМС с манипулирующей функцией на основе «Р» кода.

Для ситуаций, когда радиоизлучение КА является однокомпонентным, а по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны КРМ воздействует мощная коррелированная помеха  $P(t)$ , модель радиообстановки также является трехкомпонентной. Коррелированная помеха  $P(t)$  может представлять собой гармонические, частотно-модулированные, фазоманипулированные и т. п. процессы с шириной спектра, не превышающей ширину спектра ФМС  $\Delta f_s$ .

Третья рабочая модель радиообстановки описывается многокомпонентным аддитивным процессом в следующем виде:

$$y_n(t) = S(t) + \sum_{j=1}^{n_p} P_j(t) + n(t) \quad \text{при} \quad t_0 \leq t \leq t_0 + T_c,$$

где  $P_j(t)$  –  $j$ -я коррелированная помеха;  $n_p$  – количество коррелированных помех.

Многокомпонентная модель радиообстановки соответствует ситуациям, когда в КРМ используется слабонаправленная антенна. При этом приём контролируемого ФМС  $S_i(t)$  приходится осуществлять в присутствии ФМС от всех КА, находящихся в зоне радиовидимости комплекса радиомониторинга, и аддитивный процесс выглядит следующим образом

$$y_{n1}(t) = S_i(t) + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq i}}^{n_{\text{ка}}-1} S_m(t) + n(t) \quad \text{при} \quad t_0 \leq t \leq t_0 + T_c,$$

где  $S_m(t)$  – ФМС, соответствующий радиоизлучению  $m$ -го КА и представляющий собой коррелированную помеху.

Для ситуаций, когда в КРМ используется направленная антенна, модель радиообстановки может быть многокомпонентной при многолучевом приёме НС за счёт переотражений или при приеме организованных сигналоподобных помех. При этом имеем:

$$y_{n2}(t) = S_i(t) + \sum_{m=1}^{M_n} K_m S_i(t - \tau_m) + n(t) \quad \text{при} \quad t_0 \leq t \leq t_0 + T_c,$$

где  $S_i(t - \tau_m)$  – ФМС с временным сдвигом относительно  $S_i(t)$  на  $\tau_m$  и представляющий собой коррелированную помеху;  $K_m$  – нормированный уровень ФМС  $S_i(t - \tau_m)$ ;  $M_n$  – количество сопутствующих ФМС.

Модели радиообстановки, представленные процессами  $y_{n1}(t)$  и  $y_{n2}(t)$ , являются наиболее сложными, поскольку соответствуют проведению РМ в присутствии как внутренних шумов, так и взаимных или сигналоподобных помех.

Рассмотренные рабочие модели радиообстановки адекватно и полно отражают набор возможных тактических ситуаций, возникающих при проведении РМ излучений СРНС.

### **3.3. ПРОЕКТНОЕ ЗАДАНИЕ**

Обосновать требования к параметрам пространственной и частотной селекции в зависимости от пространственного разнеса космических аппаратов и величины частотного разнеса излучений космических аппаратов и мешающих источников радиоизлучений.

### **3.4. КВАЛИМЕТРИЯ ПО 3 МОДУЛЮ**

#### **3.4.1. Вопросы для самопроверки**

1. Какие процессы можно отнести к классу импульсных процессов?
2. Какие процессы относятся к классу непрерывных процессов?
3. Какие основные характеристики имеют простые сигналы?
4. Какие сигналы называются сложными?
5. Какие процессы следует отнести к классу узкополосных?
6. Какие процессы следует отнести к классу широкополосных?
7. В чем особенность детерминированных сигналов?
8. В чем особенность случайных процессов?
9. Назовите классы сигналов, имеющих постоянную огибающую?
10. Назовите классы сигналов, имеющих переменную огибающую?
11. Назовите классы сигналов, обладающих постоянной несущей частотой?
12. Назовите классы сигналов, обладающих переменной несущей частотой?
13. Назовите классы сигналов, имеющие постоянную фазу?
14. Назовите классы сигналов, имеющие переменную фазу?

15. В чем отличие между видеосигналами и радиосигналами?
16. В чем отличие между аналоговыми сигналами и дискретными сигналами?
17. Назовите классы сигналов, имеющие одночастотный характер и многочастотный характер?
18. Какие процессы являются однокомпонентными и многокомпонентными?
19. Какие виды замираний сигналов вам известны и чем эти замирания обусловлены?
20. Назовите классы сигналов, являющиеся периодическими?
21. Назовите классы сигналов, являющиеся непериодическими?
22. Назовите классы сигналов, имеющие дискретный спектр?
23. Назовите классы сигналов, имеющие непрерывный спектр?
24. Какие обнаружители используются для обработки детерминированных сигналов?
25. Какие обнаружители используются для обработки сигналов с неизвестной фазой?
26. Какие обнаружители используются для обработки сигналов с неизвестной формой?
27. Назовите основные характеристики амплитудно-модулированных сигналов?
28. Назовите основные характеристики частотно-модулированных сигналов?
29. Назовите основные характеристики фазокодо-манипулированных сигналов?
30. Назовите основные характеристики сигналов со случайной перестройкой несущей частоты?

### 3.4.2. Тесты для самопроверки

**Тест 1.** Чему равен интервал корреляции  $\tau_k$  простого импульсного сигнала с известной длительностью импульса  $\tau_{и}$ ?

**Ответы:** 1)  $\tau_k = 0,1\tau_{и}$ ; 2)  $\tau_k = 0,3\tau_{и}$ ; 3)  $\tau_k = 0,7\tau_{и}$ ; 4)  $\tau_k = \tau_{и}$ .

**Тест 2.** При каком соотношении несущей частоты  $f_c$  к ширине спектра  $\Delta f_c$  выполняется условие узкополосности процесса?

**Ответы:** 1)  $f_c/\Delta f_c = 1$ ; 2)  $f_c/\Delta f_c = 3$ ; 3)  $f_c/\Delta f_c = 5$ ; 4)  $f_c/\Delta f_c > 10$ .

**Тест 3.** Чему равна ширина спектра амплитудно-модулированного сигнала  $\Delta f_c$  с известной частотой модуляции  $f_\Omega$ ?

**Ответы:** 1)  $\Delta f_c = f_\Omega$ ; 2)  $\Delta f_c = 3f_\Omega$ ; 3)  $\Delta f_c = 10f_\Omega$ ; 4)  $\Delta f_c = 2f_\Omega$ .

**Тест 4.** Чему равен интервал корреляции  $\tau_k$  фазоманипулированного сигнала с псевдослучайной манипулирующей последовательностью при известной тактовой частоте  $f_T$ ?

**Ответы:** 1)  $\tau_k = 0,3/f_T$ ; 2)  $\tau_k = 0,5/f_T$ ; 3)  $\tau_k = 5/f_T$ ; 4)  $\tau_k = 1/f_T$ .

### 3.4.3. Таблица для переводов ответов в оценку

№ теста	Ответ № 1	Ответ № 2	Ответ № 3	Ответ № 4
Тест № 1				✓
Тест № 2				✓
Тест № 3				✓
Тест № 4				✓

Знаком «✓» обозначены правильные ответы. При наличии у студента трех или четырех правильных ответов — оценка «зачет», при прочих вариантах количества правильных ответов — оценка «незачет».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К 3 МОДУЛЮ

1. Дятлов А. П. Анализ помехоустойчивости и оптимизации параметров обнаружителей: Учебное пособие. — Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1991.
2. Дятлов А. П., Дятлов П. А. Анализ и моделирование обнаружителей сигналов: Методические указания к лабораторно-практическим занятиям № 3312. — Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2002.
3. Дятлов А. П., Дятлов П. А. Анализ и моделирование демодуляторов сигналов: Методические указания к лабораторно-практическим занятиям. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2003.