

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
Институт электроники и телекоммуникаций

На правах рукописи

**Рачицкая Антонина Павловна**

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ОБРАБОТКА РАДИОСИГНАЛОВ ПРИ  
КОНТРОЛЕ ЦЕЛОСТНОСТИ НАВИГАЦИОННОГО ПОЛЯ ГЛОБАЛЬНЫХ  
НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ**

Направление подготовки: 11.06.01 «Электроника, радиотехника и системы связи»

Направленность: 11.06.01\_01 «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД**

Автор работы:

**Рачицкая Антонина Павловна**

Научный руководитель:

**доктор технических наук, профессор,  
Цикин Игорь Анатольевич**

Санкт-Петербург – 2021

Научный доклад выполнен в Высшей школе прикладной физики и космических технологий (ВШПФиКТ) Института электроники и телекоммуникаций (ИЭиТ) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»).

Директор ВШПФиКТ:

*Гельгор Александр Леонидович*  
*к.т.н., доцент*

Научный руководитель:

*Цикин Игорь Анатольевич*  
*д.т.н., профессор*

Рецензент:

*Жуков Геннадий Анатольевич*  
*Заслуженный конструктор РФ, к.т.н.,*  
*доцент, советник Генерального кон-*  
*структора*  
*ПАО «Интелтех»*  
*(г. Санкт-Петербург)*

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Прием и обработка сигналов ГНСС в условиях воздействия помех.....	12
2. Синтез алгоритмов кцнп при «прямой» обработке сигналов .....	20
3. Синтез алгоритма КЦНП на основе постобработки результатов пеленгационных измерений .....	25
5. Полунатурное моделирование алгоритма контроля целостности навигационного поля ГНСС .....	47
результаты и их обсуждение .....	60
заключение .....	62
список работ, опубликованных по теме исследования.....	64
список литературы .....	66

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Радиосигналы навигационных космических аппаратов (НКА) глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) применяются для решения таких научно-практических задач, как оценка параметров движения навигационных объектов (НО), синхронизация устройств телекоммуникационных систем, ориентация НО в пространстве и т.п. Указанные задачи решаются на основе приема и обработки радиосигналов одновременно от нескольких НКА наблюдаемой в точке нахождения НО группировки спутников ГНСС.

Ситуация, когда отклонения измеренных значений хотя бы одного из параметров НО от их истинных значений превысят допустимый уровень (например, уровень «нормальных» ошибок, т.е. отклонений, которые всегда имеют место при обработке сигналов в условиях воздействия аддитивного белого гауссового шума), интерпретируется как нарушение целостности навигационного поля (НП). Подобные нарушения могут быть обусловлены воздействием как мультипликативных (внутрисистемные нарушения, влияние среды распространения радиосигнала и т.п.) [1, 2, 23-30], так и аддитивных помех, в том числе структурных, подобных по форме сигналам рассматриваемой ГНСС («легитимным» сигналам) [16, 17, 22, 31-43]. Такие помехи, генерируемые источниками группы навигационных сигналов (ИГНС), могут приводить к значительным ошибкам в определении параметров НО.

Многие из существующих методов контроля целостности навигационного поля (КЦНП) [2, 12, 28, 31, 36, 37, 109, 103, 111] рассчитаны на специфику конкретного типа воздействия и в связи с этим в реальных условиях не всегда обеспечивают требуемую эффективность контроля [37]. Эффективность алгоритмов КЦНП принято оценивать на основе анализа таких вероятностных характеристик (ВХ), как вероятность ошибочного решения о наличии нарушения при условии отсутствия такового (вероятность  $P_{лт}$  ложной тревоги), а также вероятность ошибочного решения о том, что нарушение отсутствует при условии, что такое нарушение имеется (вероятность

$P_{\text{пн}}$  пропуска нарушения), когда обе вероятности вычисляются при условии наличия сигналов ГНСС.

Применительно к случаю внутрисистемных нарушений, а также нарушений, обусловленных средой распространения сигнала, в навигационной аппаратуре широко применяются такие методы, как RAIM, E-RAIM, дифференциальные методы систем GBAS и SBAS, внутрисистемный контроль целостности ГНСС [16, 22, 57, 96, 103, 107].

В то же время для нарушений, модель которых описывается воздействием ИГНС, задача КЦНП может быть успешно решена на основе пространственно-временной обработки сигналов (ПВОС), реализуемой с использованием антенных решеток (АР). Такой подход позволяет учесть вероятные различия направлений на источники как легитимных (НКА), так и «ложных» (ИГНС) навигационных сигналов [37, 113]. Существует ряд эвристических решений, в той или иной степени использующих ПВОС и учет направлений на НКА и ИГНС. Например, подход основанный на анализе т. н. измеренных и расчетных разностей фаз между сигналами, принятыми разнесенными в пространстве антенными элементами, очевидно, может производить эффективное обнаружение факта воздействия со стороны ИГНС в случае большой мощности излучаемых им сигналов. Однако такой метод не может гарантировать максимально возможную эффективность процедуры КЦНП в условиях, когда мощность сигналов ИГНС окажется на уровне теплового шума радиоприемного тракта аппаратуры НО. Так например, полученные в работах [125,126] вероятностные характеристики КЦНП недопустимо велики (более  $10^{-1}$ ) значения вероятности пропуска нарушения для случая наличия даже очень большого (4-6) количества сигналов НКА при  $P_{\text{лт}}=10^{-7}$ . Есть основание предполагать что такая низкая эффективность может быть улучшена при использовании оптимальных методов, основанных на статистической теории принятия решений, когда построение функций правдоподобия (ФП) и отношения правдоподобия (ОП) строятся непосредственно для реализаций анализируемых процессов на каждом из элементов АР [88]. При этом если какие-либо параметры в ОП оказываются неизвестными («мешающими»), то их исключение может быть произведено в соответствии с обобщенным критерием

отношения правдоподобия (ООП) [88]. Необходимость такого подхода может оказаться тем более обоснованной, чем меньшее число элементов AP используется. Последнее является особенно актуальным, например, в случае реализации процедуры КЦНП на малогабаритных беспилотных летательных аппаратах.

Реализация оптимальных алгоритмов обработки сигналов обычно требует высоких вычислительных затрат, в связи с чем актуальным является рассмотрение различных подоптимальных решений с целью поиска компромисса между эффективностью и вычислительной сложностью в условиях использования AP с малым числом элементов.

Соответствующие алгоритмы (как оптимальные, так и подоптимальные), в которых решение о наличии или отсутствии нарушения целостности навигационного поля принимается непосредственно в ходе первичной обработки анализируемых процессов на элементах AP без привлечения результатов каких-либо промежуточных измерений, принято называть «прямыми» («direct») [7,18,19]. Как правило, такие «прямые» алгоритмы оказываются значительно сложнее, чем соответствующие упрощенные алгоритмы, когда решение принимается на основе вторичной обработки («постобработки») результатов промежуточных измерений (напр., измеренных разностей фаз сигналов на различных антенных элементах AP, измеренных угловых направлений на источники навигационных сигналов и т.п.) [37, 113]. Однако эффективность алгоритмов постобработки может оказаться невысокой, в особенности если рассматривать эвристические формы таких алгоритмов [37, 113]. Повышения эффективности алгоритмов постобработки при вероятном сохранении невысокой вычислительной сложности можно было бы достичь, применяя статистическую теорию принятия решений в отношении использования промежуточных результатов измерений (далее – «оптимальные алгоритмы постобработки»).

Экспериментальное исследование эффективности алгоритмов КЦНП требует наличия специальных имитаторов группы навигационных сигналов (ИГНС), способных в условиях полунатурного (или натурного) эксперимента симитировать работу ИГНС. Существующие имитаторы (напр., [114-116]) отличаются высокой ценой, обеспечивают ограниченный набор режимов работы и, кроме того, выпускают-

ся, в основном, зарубежными производителями, в силу чего не всегда могут оказаться доступными для использования. Кроме этого, необходимыми являются также исследования влияния характеристик имитатора на степень его соответствия рассматриваемой модели ИГНС.

---

**Объектом** исследования в работе являются алгоритмы обработки навигационных радиосигналов в условиях воздействия структурных помех, обусловленных работой источников группы навигационных сигналов.

**Предметом** исследования является эффективность процедуры КЦНП, выражаемая как максимально достижимая вероятность пропуска нарушения целостности навигационного поля, при заданной величине вероятности «ложной тревоги» и заданных энергетических и геометрических параметрах сигналов НКА и ИГНС в условиях минимизации вычислительных и аппаратных затрат на реализацию алгоритма КЦНП.

**Целью работы** является повышение эффективности контроля целостности навигационного поля ГНСС на основе совершенствования алгоритмов обработки навигационных радиосигналов при использовании антенных решеток с малым числом элементов

Достижение поставленной цели требует решения следующих **задач**:

1. Синтез оптимальных, по критерию ООП, и разработка соответствующих подоптимальных алгоритмов КЦНП при «прямой» обработке процессов, наблюдаемых на элементах АР;
2. Поиск оптимальных и подоптимальных алгоритмов КЦНП при постобработке результатов пеленгационных измерений;
3. Разработка универсальной имитационной модели приема и обработки сигналов в соответствии с исследуемыми алгоритмами КЦНП
4. Моделирование и сравнительный анализ эффективности и вычислительной сложности исследуемых алгоритмов КЦНП.
5. Разработка программно-аппаратного устройства имитации группы навигационных сигналов и полунатурное моделирование исследуемых ал-

горитмов КЦНП с использованием записей реальных сигналов созвездий НКА современных ГНСС.

---

### **Научная новизна**

- осуществлен синтез оптимального, по критерию ООП, алгоритма КЦНП и разработаны соответствующие ему подоптимальные алгоритмы при «прямой» обработке процессов, наблюдаемых на элементах АР;
- произведена оптимизация алгоритмов КЦНП при постобработке результатов навигационных измерений;
- проведен сравнительный анализ исследуемых алгоритмов КЦНП одновременно по их эффективности и вычислительной сложности с учетом их реализации на современной программируемой элементной базе;
- произведена оценка степени достоверности полученных в работе вероятностных характеристик исследуемых алгоритмов КЦНП путем их сравнения с результатами проведенного в работе полунатурного моделирования с использованием записей реальных сигналов созвездий НКА современных ГНСС.

---

### **Теоретическая значимость:**

- получены аналитические зависимости для оценки вероятностных характеристик и вычислительной сложности синтезированных алгоритмов КЦНП;
- оценена степень соответствия результатов, получаемых на идеализированной Matlab модели, тем результатам, которые следует ожидать в реальных условиях приема радионавигационных сигналов НКА и ИГНС при использовании реальных радиоприемных устройств;
- получены аналитические выражения для описания точности работы ИГНС от параметров его функциональной схемы.

### **Практическая ценность новых научных результатов:**

- предложен подоптимальный алгоритм КЦНП, обеспечивающий высокий уровень эффективности при том, что его вычислительная сложность сравнима со сложностью однократной процедуры пеленгования источника навигационных сигналов;
- показано, что предложенный подоптимальный алгоритм обеспечивает высокий уровень эффективности даже в условиях использования сигналов не более, чем 4-х НКА при 2- элементной АР;
- определены условия, при которых для реализации процедуры КЦНП может использоваться радиоприемный тракт без компенсации фазовых неидентичностей каналов, а также определены условия, когда такая компенсация является обязательной

---

При проведении данного исследования использовались следующие **методы и подходы:**

- при синтезе оптимальных и подоптимальных алгоритмов КЦНП применяется метод статистического синтеза алгоритмов принятия решения;
- при измерении ВХ алгоритмов КЦНП применяется метод Монте-Карло;
- выбор порога принятия решения производится в соответствии с критерием Неймана-Пирсона;
- исключение мешающих параметров в алгоритме принятия решения осуществляется в соответствии с методом максимума правдоподобия;
- при реализации процедуры численной оптимизации, предусмотренной особенностями исследуемых алгоритмов, используются методы последовательного поиска и Нелдера-Мида.

### **Достоверность научных результатов**

Оптимизация алгоритмов принятия решения осуществлялась с использованием классического обобщенного критерия отношения правдоподобия, известного своей высокой эффективностью. Реализация универсальной имитационной модели для ис-

следования алгоритмов КЦНП произведена на основе Matlab пакета прикладных программ для решения технических задач, в том числе задач цифровой обработки сигналов (ЦОС), включая большое число встроенных ЦОС-функций (БПФ, численные максимизации, сортировки, матричные вычисления, формирование выборок случайных величин с заданным распределением, и т.д.), Численная максимизация функций правдоподобия, необходимая для реализации ООП, осуществлялась проверенными методами поиска локальных максимумов (Нелдера-Мида и прямого поиска). Проведенное полунатурное моделирование с учетом реальной обстановки распространения сигналов и реальных характеристик радиоприемного тракта позволило уточнить полученные на идеализированной модели результаты.

---

**Положения, выносимые на защиту:**

- Синтез алгоритма КЦНП в соответствии с методом ООП при прямой обработке сигналов с элементов AP обеспечивает снижение вероятности пропуска нарушения на несколько порядков по сравнению с алгоритмами постобработки.
- Предложенный подоптимальный алгоритм прямой обработки позволяет более, чем на порядок снизить требования к объему вычислительных ресурсов при незначительном (не более, чем в несколько раз) ухудшении вероятностных характеристик.
- Разработанный программно-аппаратный имитатор группы навигационных сигналов учитывает особенности формирования сигналов реальных ГНСС на современной программируемой элементной базе и обеспечивает точность координатных точек порядка 1 м.
- Разработанная методика полунатурного моделирования алгоритмов КЦНП, предусматривающая использование записей реальных сигналов ГНСС и сигналов программно-аппаратного имитатора ИГНС, позволяет учесть влияние неидентичности каналов радиоприемной аппаратуры НО.

## Апробация работы

Материалы исследования прошли **апробацию на 12 конференциях** различного уровня, в том числе:

1. International Youth Conference on Electronics, Telecommunications and Information Technologies, Congress Center of Peter the Great, St. Petersburg Polytechnic University,  
2019 г, 11–12 июля, Санкт-Петербург, Российская Федерация
2. International Conference on Electrical Engineering and Photonics - IEEE EExPolytech-2018, Congress Center of Peter the Great, St. Petersburg Polytechnic University,  
2018 г, 22-23 октября, Санкт-Петербург, Российская Федерация
3. International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)  
2018 г, 4-6 июля, Афины, Греция  
2016 г, 27–29 июня, Вена, Австрия
4. 25th anniversary Saint Petersburg international conference on integrated navigation systems proceedings, Concern Central Scientific and Research Institute Elektropribor,  
2018 г, 28-30 мая, Санкт-Петербург, Российская Федерация
5. 20-я международная конференция "Цифровая обработка сигналов и ее применение", 28-2018, 30 марта, Москва, Российская Федерация
6. International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking,  
2017 г, 28-30 августа, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация  
2016 г, 26-28 сентября, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация  
2015 г, 26-28 августа, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
7. Научно-практическая Конференция с международным участием «Неделя науки 2016», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
2016 г, 14 – 19 ноября, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация  
2015 г, 30 ноября - 5 декабря, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация  
2014 г, 1 - 5 декабря, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

---

По теме исследования опубликовано **25 работ**, в том числе **5 статей** в рецензируемых отечественных журналах, входящих в перечень **ВАК РФ**, **8 работ** – в сборниках материалов международных конференций, входящих в перечень **Scopus**, **12 работ** – в сборниках материалов **отечественных конференций**. При этом все основные результаты проведенного исследования получены лично автором

---

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### 1. ПРИЕМ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ ГНСС В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОМЕХ

#### 1.1. Навигационное поле ГНСС

Совокупность навигационных радиосигналов  $s^{(l)}(t, \mathbf{r})$  ( $l=1 \dots L$ ), излученных данными НКА, позволяющая проводить измерения навигационных параметров в произвольной точке с координатами, определяемыми вектором  $\mathbf{r} = [x_r \ y_r \ z_r]^T$ , с требуемым уровнем доступности, надежности и точности, представляет собой радионавигационное поле ГНСС [11, 12]. Распределение радиосигналов НКА в любой точке пространства может быть представлено через уравнение бегущей волны в виде [13, 14]:

$$\mathbf{s}^{(l)}(t, \mathbf{r}) = \kappa_r^{(l)} A_0^{(l)}(t) \cos \left( \omega_0^{(l)} t - (\mathbf{k}^{(l)})^T (\mathbf{P}_{НКА}^{(l)} - \mathbf{r}) + \varphi^{(l)} \left( t - (\mathbf{k}_0^{(l)})^T (\mathbf{P}_{НКА}^{(l)} - \mathbf{r}) / c \right) + \psi_0^{(l)} \right), \quad (1.1)$$

где  $\mathbf{k}^{(l)} = \frac{2\pi}{\lambda_l} \mathbf{k}_0^{(l)}$  – волновой вектор-столбец [14];  $\lambda_l$  – длина волны радиосигнала  $l$ -го

НКА;  $\mathbf{k}_0^{(l)} = \frac{\mathbf{P}_{НКА}^{(l)} - \mathbf{r}}{\|\mathbf{P}_{НКА}^{(l)} - \mathbf{r}\|}$  – единичный вектор-столбец;  $\mathbf{P}_{НКА}^{(l)} - \mathbf{r}$  – радиус-вектор, проведен-

ный из точки нахождения НКА в рассматриваемую точку пространства;  $\psi_0^{(l)}$ ,  $A_0^{(l)}(t)$  и  $\varphi^{(l)}(t)$  – соответственно начальная фаза, амплитудная и фазовая модуляция радио-

сигнала  $l$ -го НКА;  $\mathbf{P}_{НКА}^{(l)} = [x_{НКА}^{(l)} \ y_{НКА}^{(l)} \ z_{НКА}^{(l)}]^T$  – вектор-столбец координат  $l$ -го НКА;  $\kappa_r^{(l)}$  – амплитудный коэффициент сигнала  $l$ -го НКА, обусловленный затуханием данного радиосигнала при его распространении до точки  $\mathbf{r}$ ;  $c$  – скорость света в вакууме и  $l=1 \dots L$ .

Приемная аппаратура НО может реализовываться как с одним приемным каналом, так и с несколькими ( $M$ ) каналами, принимающими радиосигналы с разнесенных в пространстве  $M$  антенных элементов (АЭ), образующих антенную решетку (АР). Антенные элементы производят пространственную дискретизацию непрерывного навигационного поля в точках своего расположения, определяемых для каждо-

го  $m$ -го АЭ вектор-столбцом  $\mathbf{P}_m = [x_m \ y_m \ z_m]^T$  [15]. В этом случае, с учетом наличия составляющей  $n_m(t)$  аддитивного белого гауссова шума (АБГШ), реализации наблюдаемых процессов на каждом  $m$ -ом элементе АР ( $m=1 \dots M$ ) имеют следующий вид:

$$x_m(t, \mathbf{P}_m) = \sum_{l=1}^L s_m^{(l)}(t) + n_m(t), \quad (1.2)$$

где  $s_m^{(l)}(t) = \kappa_m^{(l)} A_0^{(l)} (t - \tau_m^{(l)}) \cos \left[ \left( \omega_0^{(l)} + \Delta \omega_{dm}^{(l)} \right) (t - \tau_m^{(l)}) + \varphi^{(l)} (t - \tau_m^{(l)}) + \psi_0^{(l)} \right]$  – радиосигнал  $l$ -го НКА, принятый  $m$ -м АЭ;  $\kappa_m^{(l)}$  – амплитудный коэффициент сигнала  $l$ -го НКА, обусловленный затуханием радиосигнала при его распространении до  $m$ -го АЭ, причем для малогабаритных АР, расстояние между элементами которых много меньше, чем расстояние до НКА, можно положить  $\kappa_m^{(l)} = \kappa^{(l)} = \text{const}(m)$ ;  $\omega_0^{(l)} = \frac{2\pi c}{\lambda_l}$  – несущая частота радиосигнала, излученного  $l$ -м НКА;  $\tau_m^{(l)}$  – время его распространения до  $m$ -го антенного элемента,  $\Delta \omega_{dm}^{(l)}$  – доплеровский сдвиг частоты, связанные с координатами  $\mathbf{P}_{НКА}^{(l)}$   $l$ -го НКА и координатами  $\mathbf{P}_m = [x_m \ y_m \ z_m]^T$   $m$ -го АЭ соотношениями [16, 17]:

$$c\tau_m^{(l)} = \left\| \mathbf{P}_m - \mathbf{P}_{НКА}^{(l)} \right\| + c\Delta\tau, \quad (1.3)$$

$$\Delta \omega_{dm}^{(l)} = \omega_0^{(l)} \frac{d\tau_m^{(l)}}{dt}. \quad (1.4)$$

При размещении АР на НО координаты каждого АЭ принято задавать в локальной системе координат, связанной с НО. Начало координат этой системы может быть привязано к любой опорной точке на НО и, для удобства, привязывается к одному из АЭ – далее «опорному» АЭ [9]. Кроме этого, далее под координатами  $\mathbf{P}_1 = [x_1 \ y_1 \ z_1]^T$  опорного АЭ будут пониматься также и координаты  $\mathbf{P}_{НО} = \mathbf{P}_1$  самого НО. В этом случае абсолютные координаты  $\mathbf{P}_m$  всех остальных АЭ выражаются через их собственные координаты  $\tilde{\mathbf{P}}_m = [\tilde{x}_m \ \tilde{y}_m \ \tilde{z}_m]^T$  в указанной локальной системе и через координаты  $\mathbf{P}_1$ , а также через матрицу поворота  $\mathbf{A}(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$  локальной системы координат относительно геоцентрической [7, 8]:

$$\mathbf{P}_m = \mathbf{P}_1 + \mathbf{A}(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) \cdot \tilde{\mathbf{P}}_m, \quad (1.5)$$

$$\text{Где } \mathbf{A}(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) = \begin{bmatrix} \cos \alpha_2 \cos \alpha_1 - \sin \alpha_3 \cos \alpha_2 \sin \alpha_1 & \cos \alpha_2 \cos \alpha_1 + \sin \alpha_3 \cos \alpha_2 \cos \alpha_1 & \sin \alpha_3 \sin \alpha_2 \\ -\sin \alpha_3 \cos \alpha_1 - \cos \alpha_3 \cos \alpha_2 \sin \alpha_1 & -\sin \alpha_3 \sin \alpha_1 - \cos \alpha_3 \cos \alpha_2 \cos \alpha_1 & \cos \alpha_3 \sin \alpha_2 \\ \sin \alpha_2 \sin \alpha_1 & -\sin \alpha_2 \cos \alpha_1 & \cos \alpha_2 \end{bmatrix}$$

С учетом этого, а также в условиях, когда размер антенной решетки много меньше, чем расстояние до источников навигационных радиосигналов, выражение (1.3) можно представить в виде:

$$c\tau_m^{(l)} = \left\| \mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_{НКА}^{(l)} \right\| + \left[ \mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_{НКА}^{(l)} \right]^T \cdot \mathbf{A}(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) \cdot \tilde{\mathbf{P}}_m / \left\| \mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_{НКА}^{(l)} \right\| + c\Delta\tau. \quad (1.6)$$

Ситуация, когда отклонения измеренных значений  $\hat{\mathbf{P}} = [\hat{x} \hat{y} \hat{z} \hat{v}_x \hat{v}_y \hat{v}_z \Delta\hat{\tau} \hat{\alpha} \hat{\beta} \hat{\gamma}]$  хотя бы одного из параметров НО от их истинных значений  $\mathbf{P} = [x \ y \ z \ v_x \ v_y \ v_z \ \Delta\tau \ \alpha \ \beta \ \gamma]$  превысят допустимый уровень  $\Delta_p^{\max}$  (например, уровень «нормальных» ошибок – отклонений, которые всегда имеют место при обработке сигналов в условиях воздействия аддитивного шума), интерпретируется как нарушение целостности навигационного поля [22]. Такое нарушение может быть вызвано помехами как мультипликативного характера (внутрисистемные нарушения, влияние среды распространения радиосигнала и т.п.) [1, 2, 23-30], так и аддитивными помехами (АД), в том числе структурными, являющимися наиболее опасными для аппаратуры НО [16, 17, 22, 31-43]. При рассмотрении проблемы воздействия структурных АД используются различные модели ИГНС [31, 32, 38, 39], среди которых чаще всего применяется гипотетическая модель одиночного ИГНС, излучающего структурные имитационные помехи, соответствующие радиосигналам сразу всех НКА, видимых в точке нахождения НО [32,36,38]. Величина ошибки в измерении координат в случае этого воздействия может достигать гораздо больших значений, чем при прочих других возможных нарушениях. В этом случае реализация  $x_m(t)$  анализируемого процесса на каждом  $m$ -ом ( $m=1, \dots, M$ ) антенном элементе АР (рис.1.1) содержит не только радиосигналы  $s_m^{(l)}(t)$  от каждого  $l$ -го ( $l=1, \dots, L$ ) НКА, но также и составляющие  $s_m^{\prime(l)}(t)$ , обусловленные радиосигналами ИГНС [68, 69]:

$$x_m(t) = \sum_{l=1}^L \left( s_m^{(l)}(t) + s_m^{\prime(l)}(t) \right) + n_m(t), \quad (1.7)$$

$$s_m^{\prime(l)}(t) = \kappa_m^{\prime(l)} A_0^{(l)} \left( t - \tau_m^{(l)} \right) \cos \left( \left( \omega_0^{(l)} + \Delta\omega_d^{(l)} \right) \left( t - \tau_m^{(l)} \right) + \varphi^{(l)} \left( t - \tau_m^{(l)} \right) + \psi_0^{\prime(l)} \right), \quad (1.8)$$

где  $\psi_0^{(l)}$  и  $\kappa_m^{(l)}$  – начальная фаза и амплитудный коэффициент  $l$ -го радиосигнала ИГНС. Амплитудный коэффициент  $\kappa_m^{(l)}$   $l$ -го сигнала ИГНС обусловлен как исходным уровнем сформированного ИГНС сигнала, так и затуханием этого сигнала при его распространении до  $m$ -го АЭ на НО с учетом особенностей среды распространения [50, 70, 71]. Причем, для АР, расстояние между элементами которых много меньше расстояния до ИГНС, можно положить  $\kappa_m^{(l)} = \kappa^{(l)} = \text{const}(m)$ . При этом:

$$\tau_m^{(l)} = \tau^{(l)} + \Delta\tau' + \delta\tau'_m, \quad (1.9)$$

где  $\tau^{(l)}$  – задержка  $l$ -го радиосигнала ИГНС, соответствующая ошибочному положению  $\mathbf{P}'$ ;  $\delta\tau'_m$  – разность времени прихода сигналов ИГНС на опорный и  $m$ -й АЭ, причем

$$\tau^{(l)} = \|\mathbf{P}_{HKA}^{(l)} - \mathbf{P}'\|/c, \quad (1.10)$$

$$\delta\tau'_m = \frac{[\mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_m]^T \mathbf{A}(\alpha, \beta, \gamma) \tilde{\mathbf{P}}_m}{c \|\mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_m\|}. \quad (1.11)$$

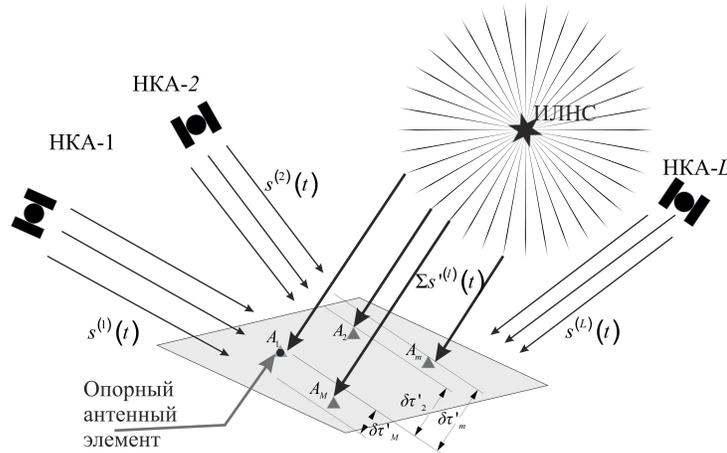


Рис. 1.1. Модель воздействия одиночного ИГНС на аппаратуру НО

Применение АР и соответствующих алгоритмов ПВОС способно ослабить влияние аддитивных помех в ГНСС. Тем не менее, важной проблемой является необходимость оценки «степени доверия» к получаемым, в этих условиях, результатам навигационных измерений, что может быть достигнуто путем использования понятия «достоверность», непосредственно связанного с процедурой контроля целостности навигационного поля [22, 35, 99, 100].

## 1.2. Контроль целостности навигационного поля

Процедура контроля целостности навигационного поля (КЦНП) предусматривает обнаружение наличия нарушений целостности поля ГНСС [22, 99-101]. При этом, как правило, под нарушением целостности понимается ситуация, когда отклонения измеренных координат НО  $\hat{\mathbf{P}}_{НО}$  от их истинных значений  $\mathbf{P}_{НО}$  превышают допустимый уровень  $\Delta_p^{\max}$ :

$$\|\mathbf{P} - \hat{\mathbf{P}}\| > \Delta_p^{\max}. \quad (1.12)$$

В метрологии обычно используется термин «достоверность», определяемый как показатель качества проведенных измерений, характеризующий степень уверенности в том, что значение измеренной величины находится в указанном интервале [102]. При этом количественной характеристикой (мерой) достоверности является следующая вероятность:

$$P_d = P\{\|\mathbf{P} - \hat{\mathbf{P}}\| < \Delta_p^{\max}\}. \quad (1.13)$$

Следовательно, в случае наличия нарушения целостности поля ГНСС вероятность  $P_d$ , в отличие от случая отсутствия такого нарушения, оказывается недопустимо малой. Эффективность конкретного алгоритма КЦНП обычно определяется следующими основными параметрами [22]:

- вероятность ошибочного решения о наличии нарушения при условии отсутствия такового (вероятность  $P_{лт}$  ложной тревоги);
- вероятность ошибочного решения о том, что нарушение отсутствует при условии, что такое нарушение имеется (вероятность  $P_{пн}$  пропуска нарушения).

Различные варианты процедуры КЦНП предусмотрены уже в составе самой ГНСС: самоконтроль на борту НКА [57] и внутрисистемный контроль целостности [16, 22, 57, 107], но они способны зафиксировать лишь ограниченный перечень нарушений, возникающих непосредственно на борту НКА.

Наиболее эффективно функции КЦНП выполняются внешними по отношению к ГНСС средствами – функциональными дополнениями ГНСС, которые представляют собой аппаратные и программные средства обнаружения нарушений целостности навигационного поля [12, 24], среди которых особо внимания заслуживают ме-

тоды, направленные непосредственно на идентификацию нарушений, вызванных работой ИГНС [31, 37]. Во-первых, к таким методам можно отнести упомянутый выше E-RAIM, использующий комплексирование с внешними датчиками, сможет зафиксировать только такие нарушения, которые вызваны резким изменением оценок координат НО (в случае комплексирования с датчиками ИНС), либо существенным изменением показаний высоты (в случае комплексирования с показаниями высотомера). Кроме этого, обнаружение нарушений, вызванных сигналами ИГНС, может производиться с помощью мониторинга абсолютной или относительной мощности принимаемых сигналов [16, 109]. Такая проверка, очевидно, будет нечувствительной к нарушениям, вызванным сигналами ИГНС, незначительно превышающими по уровню легитимные сигналы НКА. Возможен также подход, основанный на анализе формы главного лепестка отклика в устройстве оптимальной обработки, при котором производится идентификация отличия этой формы от ожидаемой идеальной (например, треугольной для сигналов GPS или ГЛОНАСС в диапазоне L1) формы огибающей автокорреляционной функции (АКФ) навигационного радиосигнала [109]. Использование такого подхода сильно ограничено в условиях многолучевого распространения сигналов, когда очевидно будет наблюдаться повышенный уровень ложных тревог. Кроме этого, возможны подходы, основанные на обнаружении резких отклонений параметров сигналов (доплеровских сдвигов частот, либо задержек) [17], либо на комплексировании результатов измерений от нескольких ГНСС [110].

Более сложный подход идентификации наличия мешающего воздействия ИГНС заключается в использовании объединенных в сеть приемников [37]. В этом случае измерения, получаемые разнесенными в пространстве приемниками, проверяются на идентичность. Очевидно, что если хотя бы несколько из приемников покажут близкие значения, то можно сделать вывод, что имеет место нарушение целостности навигационного поля [36], обусловленное имитационными помехами. Аналогичный подход может быть реализован также и путем анализа результатов измерений на перемещающемся НО [36], либо при вращении приемной антенны стационарного НО [111].

Ряд перечисленных методов (мониторинг мощности, обнаружение резких отклонений параметров сигналов) обладают ограниченными областями применимости, поскольку неработоспособны как в условиях отсутствия предварительной синхронизации приемника ГНСС, так и в случае, когда параметры сигналов ИГНС оказываются близки к параметрам легитимных сигналов [16, 42, 68, 112]. Другие методы (объединение в сеть приемников, вращение или перемещение приемной антенны), эффективность которых не зависит от вида ИГНС, и, к сожалению, подходят не для всех типов НО.

Наиболее распространенным методом идентификации нарушений, вызванных работой одиночных ИГНС, является пеленгационный (англ. Angle-of-Arrival) метод, основанный на том, что в случае наличия таких нарушений углы прихода всех навигационных сигналов совпадают и определяются направлением на ИГНС [37]. В случае же, если нарушение отсутствует, углы прихода всех сигналов оказываются различными и определяются направлениями из точки нахождения НО на реальные НКА. На учете данного факта основано много методов, использующих возможности измерений с помощью АР и эвристический подход, когда решение о наличии или отсутствии нарушения принимается, например, путем сравнения с некоторым порогом величины различия фазовых измерений (связанных с углами прихода сигналов) с заранее рассчитанными (эталонными) значениями [44]. Другой эвристический подход с применением АР предполагает попытку непосредственного обнаружения ИГНС каким-либо методом пеленгации (по максимуму пространственной мощности, MUSIC и т.п.) [36].

Перечисленные эвристические подходы, очевидно, будут уступать в эффективности соответствующим оптимальным алгоритмам, синтезированным на основе статистической теории принятия решений [88] при непосредственном анализе реализаций процессов с каждого из элементов АР. Отличие в эффективности может быть особенно существенным в условиях применения АР с разумным ограничением на число используемых элементов, обусловленным малыми габаритами НО, доступной потребляемой мощностью или допустимым весом нагрузки на НО и т.п. [15]. Оптимальный подход предполагает построение функций правдоподобия (ФП) и отноше-

ния правдоподобия (ОП) для реализаций процессов, анализируемых непосредственно на элементах АР. При этом в качестве априорной информации могут использоваться сведения об абсолютных значениях координат НКА, а также учитываться обоснованное предположение о том, что координаты ИГНС, являясь для пользователя неизвестными, отличны от координат большинства НКА в группировке ГНСС. В зависимости от условий реализации дополнительно может использоваться и другая исходная информация, но в любом случае если какие-либо параметры в ОП оказываются неизвестными («мешающими»), то их исключение может быть произведено в соответствии с обобщенным критерием отношения правдоподобия (ООП) [88]. Например, в соответствии с таким критерием синтезирован алгоритм КЦНП, но для одномерного случая, когда на НО отсутствует АР [69], и основанный на учете различия частотно-временных параметров (1.3) и (1.4) для сигналов НКА и ИГНС. В то же время, очевидно, что использование АР позволит, помимо прочего, дополнительно учесть и принципиальное отличие пространственных расположений ИГНС и НКА.

При построении алгоритмов в соответствии с указанным выше оптимальным подходом, основанным на статистической теории принятия решений, необходимо определить функции правдоподобия реализаций анализируемых процессов в случае справедливости каждой из проверяемых гипотез [88]. Применительно к задаче КЦНП рассматриваются следующие статистические гипотезы: нарушение целостности навигационного поля отсутствует (гипотеза  $H_0$ ) или имеет место (гипотеза  $H_1$ ).

Таким образом, под нарушением целостности понимается ситуация, когда реализация  $x_m(t)$  анализируемого процесса на каждом  $m$ -ом ( $m=1, \dots, M$ ) антенном элементе содержит не только сигналы  $s_m^{(l)}(t)$  от каждого  $l$ -го ( $l=1, \dots, L$ ) НКА, но также и оставляющие  $s_m^{(l)}(t)$ , обусловленные сигналами одиночного ИГНС. Реализация  $x_m(t)$  в этом случае определяется выражением (1.7). При этом очевидно, что одним из важнейших идентифицирующих признаков сигналов ИГНС является то, что все эти сигналы имеют одинаковые углы прихода в точке нахождения НО. Аналогично, при отсутствии нарушения реализация  $x_m(t)$  имеет вид (1.2).

Как правило, оптимальные алгоритмы отличаются большой вычислительной сложностью, что может сильно ограничивать их практическую реализацию. В связи с этим, при рассмотрении оптимальных алгоритмов, необходимо также осуществлять и поиск подоптимальных решений, направленных на сокращение вычислительных затрат.

Соответствующие алгоритмы как оптимальные, так и подоптимальные, в которых решение о наличии или отсутствии целостности навигационного поля принимается непосредственно в ходе первичной обработки анализируемых процессов на элементах АР без привлечения результатов каких-либо промежуточных измерений, принято называть «прямыми» («direct») [7,18,19]. Как правило, такие «прямые» алгоритмы оказываются значительно сложнее, чем соответствующие упрощенные алгоритмы, когда решение о наличии или отсутствии нарушения целостности навигационного поля принимается на основе вторичной обработки («постобработки») результатов промежуточных измерений (измеренных разностей фаз сигналов на различных антенных элементах АР, измеренных угловых направлений на источники навигационных сигналов и т.п.) [37, 113]. Однако эффективность алгоритмов постобработки может оказаться невысокой, в особенности если рассматривать эвристические формы таких алгоритмов [37, 113]. Повышения эффективности алгоритмов постобработки при вероятном сохранении невысокой вычислительной сложности можно было бы добиться, применяя статистическую теорию принятия решений в отношении использования промежуточных результатов измерений (далее – оптимальные алгоритмы постобработки).

## **2. СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ КЦНП ПРИ «ПРЯМОЙ» ОБРАБОТКЕ СИГНАЛОВ**

Для построения оптимального алгоритма принятия решения о наличии или отсутствии целостности навигационного поля в соответствии с ООП построим ФП для вектор-столбца  $\mathbf{x}(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ \dots \ x_M(t)]^T$  реализаций  $x_m(t)$  процессов на каждом  $m$ -ом из  $M$  антенных элементах АР в условиях наблюдения созвездия, состоящего из  $L$  НКА, при справедливости каждой из двух гипотез: гипотезы  $H_0$ , когда нарушение

целостности навигационного поля отсутствует и гипотезы  $H_1$ , когда нарушение имеет место быть. Рассматриваемая задача относится к случаю «сложных гипотез», поэтому произведены соответствующие преобразования и оптимизации, приводящие к избавлению от мешающих параметров в ФП (таких как начальная фаза, амплитудный коэффициент, вектор временных задержек сигналов ИГНС  $\boldsymbol{\tau}' = [\tau_1^{(1)} \quad \tau_1^{(2)} \quad \dots \quad \tau_1^{(L)}]$  и вектор доплеровских смещений частот сигналов ИГНС  $\Delta\boldsymbol{\omega}'_d = [\Delta\omega_d^{(1)} \quad \Delta\omega_d^{(2)} \quad \dots \quad \Delta\omega_d^{(L)}]$ ). Полученный в результате оптимальный прямой алгоритм КЦНП (Алгоритм А) имеет следующий вид:

$$\max_{\mathbf{P}', \Delta\boldsymbol{\tau}'} \begin{matrix} H_1 \\ > \\ \Lambda_1, \\ < \\ H_0 \end{matrix} \quad (2.1)$$

где 
$$\Upsilon_1 = \frac{1}{ME_0 N_0} \sum_{l=1}^L \left\{ \left| \mathbf{V}_l^T \mathbf{H}_l \right|^2 + \left| \mathbf{V}_l^T \mathbf{H}_l - \sum_{k=1}^L \frac{\mathbf{V}_k^T \mathbf{H}_l}{ME_0} \mathbf{H}_l^T \mathbf{H}_l^* R_{lk} \right|^2 \right\}, \quad \Upsilon_0 = \frac{1}{ME_0 N_0} \sum_{l=1}^L \left| \mathbf{V}_l^T \mathbf{H}_l \right|^2,$$

$E_0 = \int_{(T_s)} \left( \sum_{l=1}^L C_0^{(l)}(t) \right)^2 dt$  – энергия опорного сигнала;  $N_0/2$  – спектральная плотность

средней мощности аддитивного белого гауссова шума;  $C_0^{(l)}(t)$  – дальномерный код  $l$ -

го НКА ( $l=1 \dots L$ );  $\mathbf{H}_l = [e^{j\delta\varphi_1^{(l)}} \quad e^{j\delta\varphi_2^{(l)}} \quad \dots \quad e^{j\delta\varphi_M^{(l)}}]^T$  – направляющий вектор для сигналов

ИГНС;  $\delta\varphi_m = \frac{\omega_0^{(l)}}{c} (\mathbf{k}_0^{(l)}(\mu_l, \eta_l))^T \tilde{\mathbf{P}}_m$ ;  $\mathbf{k}_0^{(l)}(\mu_l, \eta_l) = [x_{k0}^{(l)} \quad y_{k0}^{(l)} \quad z_{k0}^{(l)}]^T$ ;  $x_{k0}^{(l)} = \sin \mu_l \cos \eta_l$ ;

$y_{k0}^{(l)} = \cos \mu_l \cos \eta_l$ ;  $z_{k0}^{(l)} = \sin \eta_l$ ;  $c$  – скорость света в вакууме,

$\mathbf{H}_l = [e^{j\delta\varphi_1^{(l)}} \quad e^{j\delta\varphi_2^{(l)}} \quad \dots \quad e^{j\delta\varphi_M^{(l)}}]^T$  – направляющий вектор для сигнала  $l$ -го НКА;  $\omega_0^{(l)}$  – не-

сущая частота радиосигнала, излученного  $l$ -м НКА;  $\mu_l, \eta_l$  – угловые направления на

ИГНС;  $\tilde{\mathbf{P}}_m = [\tilde{x}_m \quad \tilde{y}_m \quad \tilde{z}_m]^T$  – координаты элементов АР в локальной системе координат

НО;  $\delta\varphi_m^{(l)} = \frac{\omega_0^{(l)}}{c} [\mathbf{P}_{НО} - \mathbf{P}_{НКА}^{(l)}]^T \cdot \mathbf{A}(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) \cdot \tilde{\mathbf{P}}_m / \|\mathbf{P}_{НО} - \mathbf{P}_{НКА}^{(l)}\|$ ,  $\mathbf{P}_{НО}$  – координаты НО,  $\mathbf{P}_{НКА}^{(l)}$

– координаты  $l$ -го НКА,  $\mathbf{A}(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$  – матрица поворота локальной системы координат

нат НО относительно геоцентрической,  $\mathbf{V}'_l = [V_1^{(l)} \quad V_2^{(l)} \quad \dots \quad V_M^{(l)}]^T$ ,

$$\mathbf{V}_l = [V_1^{(l)} \quad V_2^{(l)} \quad \dots \quad V_M^{(l)}]^T, \quad V_m^{(l)} = \int_{(T_a)} F_{xm}(t) C_0^{*(l)}(t - \tau_1^{(l)}) e^{-j\Delta\omega_d^{(l)} t} e^{-j\Delta\omega_0^{(l)} t} dt \quad \text{и}$$

$$V_m^{(l)} = \int_{(T_a)} F_{xm}(t) C_0^{*(l)}(t - \tau_1^{(l)}) e^{-j\Delta\omega_d^{(l)} t} e^{-j\Delta\omega_0^{(l)} t} dt, \quad \text{причем интегрирование производится на ин-}$$

тервале анализа, величина  $T_a$  которого определяется длительностью полезного сиг-

нала  $C_0^{(l)}(t)$ ;  $F_{xm}(t)$  – комплексная огибающая реализации  $x_m(t)$ ;  $\tau_1^{(l)}$  – время распро-

странения сигнала  $l$ -го НКА до опорного антенного элемента;  $\Delta\omega_d^{(l)}$  доплеровский

сдвиг частоты сигнала  $l$ -го НКА;  $\Delta\omega_0^{(l)} = \omega_0^{(l)} - \omega_0$  – отстройка частоты радиосигнала  $l$ -

го НКА от центральной частоты приема  $\omega_0$ ;  $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1^{(1)} \quad \tau_1^{(2)} \quad \dots \quad \tau_1^{(L)}]$  – вектор времен-

ных задержек сигналов НКА;  $\Delta\omega_d = [\Delta\omega_d^{(1)} \quad \Delta\omega_d^{(2)} \quad \dots \quad \Delta\omega_d^{(L)}]$  – вектор доплеровских

смещений частот сигналов НКА,  $R_{lk} = \int_{(T_a)} C_0^{(l)}(t - \tau_1^{(l)}) C_0^{(k)}(t - \tau_1^{(k)}) e^{-j\Delta\omega_d^{(l)} t} e^{j\Delta\omega_d^{(k)} t} dt$  – взаимных

корреляционных функций (ВКФ) сигналов  $l$ -го и  $k$ -го НКА, и порог принятия реше-

ния  $\lambda_1$  определяется в соответствии с критерием Неймана–Пирсона.

Далее на основе алгоритма  $A$  получены соответствующие алгоритмы ( $B$ ,  $C$ ,  $D$  и  $E$ ), учитывающие наличие априорной неопределенности относительно различных параметров НО и ИГНС, причем избавление от мешающих параметров предполагается путем численной максимизации по ним в левой части неравенства (2.1). Иерархию синтезированных алгоритмов, оптимальных по критерию ООП, с точки зрения видов учитываемой в них априорной неопределенности иллюстрирует диаграмма на рис. 2.1, а на рис. 2.2 – изображена обобщенная структурная схема «прямых» оптимальных по критерию ООП алгоритмов КЦНП при различных видах априорной неопределенности в отношении параметров НО и ИГНС (алгоритмы  $A \dots E$ ).

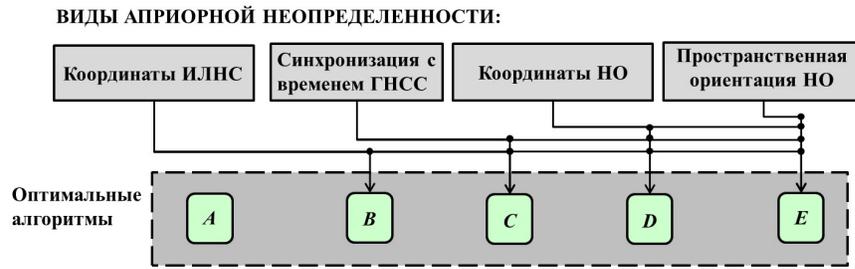


Рис. 2.1. Иерархия синтезированных прямых оптимальных по критерию ООП алгоритмов с точки зрения видов учитываемой в них априорной неопределенности

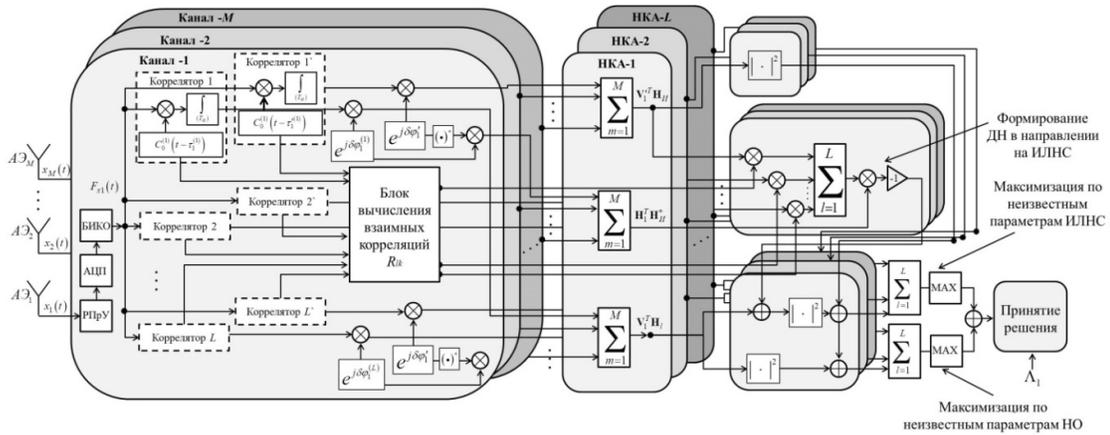


Рис. 2.2. Обобщенная структурная схема «прямых» оптимальных по критерию ООП алгоритмов КЦНП

Далее к вышеописанным алгоритмам были применены различные процедуры упрощения. Прежде всего, было учтено, что уровень значений  $R_{kl}$  при  $k \neq l$  мал по сравнению с остальными составляющими в (2.1). Кроме этого, в представляющих практический интерес случаях ложные координаты  $\mathbf{P}'$  могут значительно отличаться от истинных координат НО  $\mathbf{P}_{НО}$ , т.е. настолько, что при  $k=l$  в (2.1) будут фигурировать значения  $R_{ll}$  боковых лепестков автокорреляционных функций (АКФ) которыми также можно пренебречь, учитывая, что сигналы ГНСС строятся с использованием кодовых последовательностей, обеспечивающих малый уровень боковых лепестков АКФ. На основе такого упрощения для алгоритмов  $A \dots E$ , получена *первая группа* подоптимальных алгоритмов, основанных на учете значительного отличия ложных координат  $\mathbf{P}'$  от истинных координат НО (алгоритмы  $A1 \dots E1$ ).

Другой примененный к алгоритмам  $A \dots E$  способ упрощения рассчитан на условия, когда уровень сигналов ИГНС значительно превосходит уровень сигналов НКА

( $\kappa^{(l)} \gg \kappa^{(l)}$ ), и можно пренебречь составляющими, обусловленными легитимными сигналами НКА в (2.1). В результате получена *вторая группа* подоптимальных алгоритмов (алгоритмы  $A2...E2$ ).

Кроме этого рассмотрен вариант упрощения процедуры максимизации по неизвестным параметрам  $P_{HO}, \Delta\tau$  и  $P', \Delta\tau'$ , путем замены на процедуру максимизации непосредственно по параметрам  $(\tau_1^{(l)}, \Delta\omega_d^{(l)})$  времени и частоты для легитимных сигналов НКА и  $(\tau_1^{(l)}, \Delta\omega_d^{(l)})$  для сигналов ИГНС в (2.1). Указанное упрощение применено ко всем оптимальным алгоритмам  $A...E$ , в результате чего получена *третья группа* подоптимальных алгоритмов, основанных на упрощении процедуры максимизации (алгоритмы  $A3...E3$ ). Аналогичное упрощение применено и к подоптимальным алгоритмам из первой и второй групп, и получены соответственно *четвертая и пятая группы* подоптимальных алгоритмов (алгоритмы  $A4...E4$ ) и (алгоритмы  $A5...E5$ ).

Итоговая классификация рассматриваемых «прямых» (как оптимальных, так и подоптимальных) алгоритмов КЦНП проиллюстрирована на рис.2.3, где также указаны виды априорной неопределенности, учитываемой при синтезе алгоритмов, а также применяемые способы снижения вычислительных затрат при переходе к подоптимальным алгоритмам. Среди получившихся таким образом подоптимальных алгоритмов выявлены наиболее практически значимые для дальнейших исследований – они отмечены соответствующим более ярким оттенком.

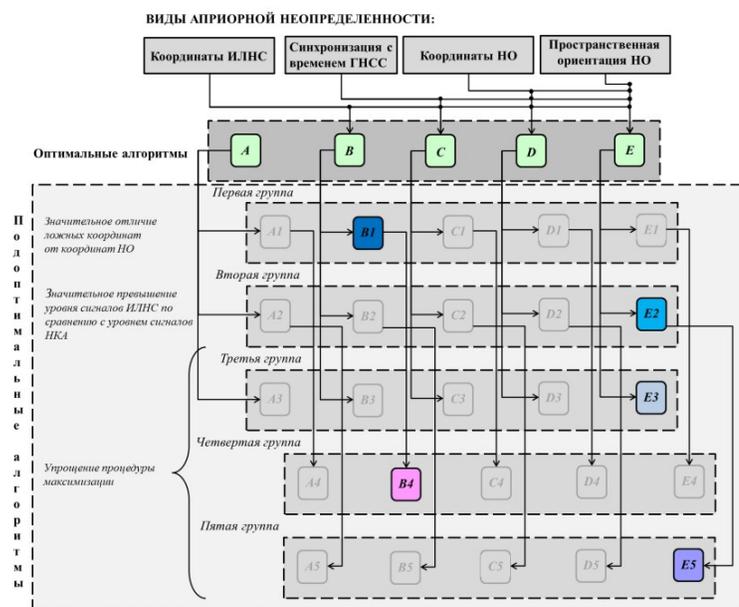


Рис. 2.3. Классификация рассматриваемых «прямых» (как оптимальных, так и подоптимальных) алгоритмов КЦНП

### 3. СИНТЕЗ АЛГОРИТМА КЦНП НА ОСНОВЕ ПОСТОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ПЕЛЕНГАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

При рассмотрении оптимального подхода к синтезу алгоритма принятия решения, рассчитанного на анализ измеренных угловых направлений, воспользуемся методами статистической теории принятия решений, однако, в отличие от рассмотренного ранее случая (пп. 2.1-2.2), построим ФП не для реализаций процессов на элементах АР, а для выборок угловых направлений, измеренных для каждого из навигационных сигналов. При этом по-прежнему рассмотрим две гипотезы: о наличии (гипотеза  $H_1$ ) и отсутствии (гипотеза  $H_0$ ) нарушения целостности навигационного поля.

Направление на источник радиосигнала задается с помощью двух углов – азимут  $\mu$  и угол места  $\eta$ , а их измерение может быть осуществлено в соответствии с каким-либо методом пеленгации [15]. Результаты измерения  $\mu_{изм}^{(l)}$  и  $\eta_{изм}^{(l)}$  для всех видимых навигационных сигналов ( $l = 1...L$ ) используются при синтезе алгоритма КЦНП. При этом, в ситуации, когда нарушение целостности отсутствует, измерен-

ные  $\mu_{изм}^{(l)}$  и  $\eta_{изм}^{(l)}$  направления прихода навигационных сигналов будут определяться направлениями на реальные НКА и отличаться от реальных направлений лишь в силу воздействия аддитивных шумов на входе приемной аппаратуры НО.

Эти же направления можно рассчитать, пользуясь формулами (2.22) и (2.23), через оценки собственных координат и координат НКА. В силу неизбежной неточности в знании координат НО, полученные расчетные значения  $\mu_{расч}^{(l)}$  и  $\eta_{расч}^{(l)}$  будут незначительно отличаться от реальных направлений на НКА, однако математические ожидания измеренных и расчетных пеленгационных параметров в случае отсутствия нарушения целостности будут совпадать. В ситуации, когда имеет место нарушение целостности навигационного поля, обусловленное сигналами ИГНС, математические ожидания результатов  $\mu_{изм}^{(l)}$  и  $\eta_{изм}^{(l)}$  измерения угловых направлений прихода всех  $l$ -ых сигналов будут одинаковыми и равными направлению ( $\mu_{И}$  и  $\eta_{И}$ ) на ИГНС. В зависимости от стратегии работы ИГНС, определяющей значения «навязываемых» ошибочных координат, полученные расчетные значения  $\mu_{расч}^{(l)}$  и  $\eta_{расч}^{(l)}$  могут оказаться значительно отличающимися от реальных направлений на НКА, однако, в любом случае, останутся различными для различных  $l$ . Так или иначе, математические ожидания соответствующих измеренных и расчетных пеленгационных параметров в случае наличия нарушения целостности будут отличаться.

Введем в рассмотрение функции правдоподобия  $W(\mu, \eta/H_1)$  и  $W(\mu, \eta/H_0)$  анализируемых векторов  $\mu = (\mu_{расч}, \mu_{изм})$  и  $\eta = (\eta_{расч}, \eta_{изм})$ , где  $\mu_{расч}$ ,  $\eta_{расч}$  и  $\mu_{изм}$ ,  $\eta_{изм}$  – векторы с проекциями  $\mu_{расч}^{(l,i)}$ ,  $\eta_{расч}^{(l,i)}$  и  $\mu_{изм}^{(l,i)}$ ,  $\eta_{изм}^{(l,i)}$  соответственно. Здесь  $i$  – номер проведенного пеленгационного измерения ( $i = 1 \dots N$ );  $N$  – количество измерений. Тогда, ограничиваясь рассмотрением частного случая однократных измерений, когда  $N = 1$  и переходя к логарифму ООП, оптимальный алгоритм постобработки пеленгационных измерений («алгоритм  $F$ ») может быть записан в следующем виде:

$$\sum_{l=1}^L \frac{(\mu_{расч}^{(l)} - \mu_{изм}^{(l)})^2}{(\sigma_{\mu l}^{изм})^2 + (\sigma_{\mu l}^{расч})^2} + \sum_{l=1}^L \frac{(\eta_{расч}^{(l)} - \eta_{изм}^{(l)})^2}{(\sigma_{\eta l}^{изм})^2 + (\sigma_{\eta l}^{расч})^2} + \sum_{l=1}^L \left\{ \frac{2}{L} \mu_{изм}^{(l)} \sum_{l=1}^L \mu_{изм}^{(l)} - (\mu_{изм}^{(l)})^2 \right\} / (\sigma_{\mu l}^{изм})^2 - \sum_{l=1}^L \frac{1}{L^2} \left( \sum_{l=1}^L \mu_{изм}^{(l)} \right)^2 / (\sigma_{\mu l}^{изм})^2 +$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{l=1}^L \left\{ \frac{2}{L} \eta_{\text{ИЗМ}}^{(l)} \sum_{k=1}^L \eta_{\text{ИЗМ}}^{(k)} - \left( \eta_{\text{ИЗМ}}^{(l)} \right)^2 \right\} / \left( \sigma_{\eta,l}^{\text{ИЗМ}} \right)^2 - \sum_{l=1}^L \frac{1}{L^2} \left( \sum_{k=1}^L \eta_{\text{ИЗМ}}^{(k)} \right)^2 / \left( \sigma_{\eta,k}^{\text{ИЗМ}} \right)^2 & > & \Lambda_0, & (3.2) \\
& & < & \Lambda_0, & \\
& & & H_0 &
\end{aligned}$$

где 
$$k_{\text{расч}}^{(l)} = \frac{\left( \sigma_{\mu,l}^{\text{расч}} \right)^2}{\left( \sigma_{\mu,l}^{\text{ИЗМ}} \right)^2 + \left( \sigma_{\mu,l}^{\text{расч}} \right)^2}; \quad k_{\text{ИЗМ}}^{(l)} = \frac{\left( \sigma_{\mu,l}^{\text{ИЗМ}} \right)^2}{\left( \sigma_{\mu,l}^{\text{ИЗМ}} \right)^2 + \left( \sigma_{\mu,l}^{\text{расч}} \right)^2}; \quad p_{\text{расч}}^{(l)} = \frac{\left( \sigma_{\eta,l}^{\text{расч}} \right)^2}{\left( \sigma_{\eta,l}^{\text{ИЗМ}} \right)^2 + \left( \sigma_{\eta,l}^{\text{расч}} \right)^2};$$

$$p_{\text{ИЗМ}}^{(l)} = \frac{\left( \sigma_{\eta,l}^{\text{ИЗМ}} \right)^2}{\left( \sigma_{\eta,l}^{\text{ИЗМ}} \right)^2 + \left( \sigma_{\eta,l}^{\text{расч}} \right)^2}$$
 и значение  $\Lambda_0$  в соответствии с критерием Неймана–Пирсона

устанавливается так, чтобы вероятность  $P_{\text{ЛР}}$  ложного решения в пользу гипотезы  $H_1$  при условии справедливости  $H_0$  оказалась бы равной заданному значению.

Структурная схема реализации алгоритма  $F$ , включающая также и блоки измерения пеленгационных параметров источников навигационных сигналов по методу МП в соответствии с (3.2), представлена на рис. 3.8.

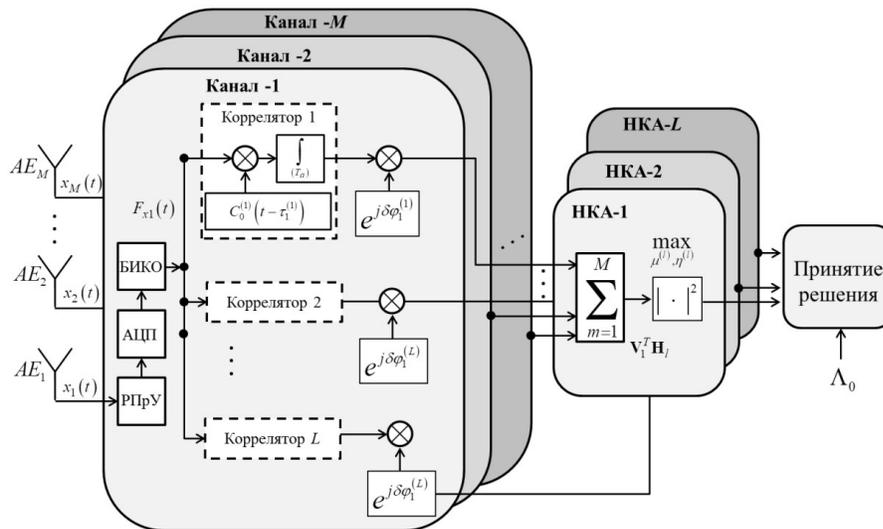


Рис. 3.1. Обобщенная структурная схема оптимального алгоритма КЦНП, основанного на постобработке результатов пеленгационных измерений

## 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ПРИ КОНТРОЛЕ ЦЕЛОСТНОСТИ НАВИГАЦИОННОГО ПОЛЯ

### 4.1. Универсальная имитационная модель исследуемых алгоритмов

Оценка вероятностных характеристик (ВХ) для исследуемых в работе алгоритмов требует проведения компьютерного моделирования. Соответствующая модель, обобщенная структурная схема которой представлена на рис. 4.1, была разработана в среде Matlab.

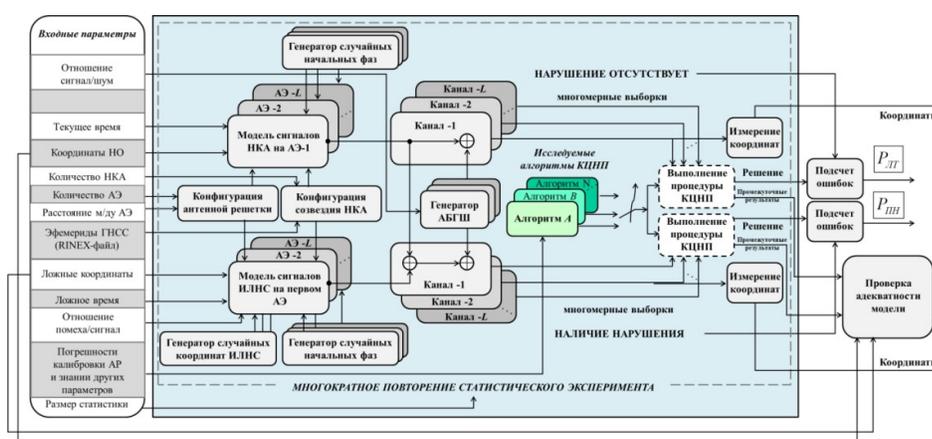


Рис. 4.1. Обобщенная структурная схема модели для оценки эффективности алгоритмов контроля целостности навигационного поля

Модель предусматривает проведение статистических экспериментов для измерения ВХ алгоритмов КЦНП и включает в себя: 1) формирователи многомерных выборок процессов на элементах AP как при наличии, так и при отсутствии нарушения целостности ГНСС; 2) непосредственно сами алгоритмы КЦНП; 3) измерители координат по сформированным сигналам; 4) блоки подсчета ошибок принятия решений для измерения вероятностных характеристик. Полученная модель является универсальной применительно ко всем полученным ранее алгоритмам КЦНП как прямым, так и с постобработкой. Соответствующие алгоритмы КЦНП выполнены в данной модели в виде единообразных взаимозаменяемых функций, на вход которых поступают сформированные многомерные выборки анализируемых процессов и значения тех параметров,

информация о которых полагается известной в рассматриваемых условиях моделирования. Кроме этого, поскольку в данной модели учитываются все особенности многоканальной обработки навигационных сигналов, а соответствующие программные реализации алгоритмов произведены с учетом реализации на программируемой элементной базе, то такая модель является имитационной по отношению к реальному устройству КЦНП, реализуемому программно-аппаратными средствами.

В качестве входных параметров модели задаются следующие данные:

- истинные координаты НО;
- размеры зоны неопределенности в знании параметров НО и ИГНС;
- топология антенной решетки;
- погрешности калибровки АР (фазовые отстройки между приемными каналами и ошибки в знании фазовых центров АЭ);
- параметры спутниковой группировки (файл с эфемеридами в формате RINEX [27], полученный с ресурса <ftp://ftp.glonass-iac.ru>);
- количество НКА, сигналы которых использовались в решении;
- ошибочные координаты НО, используемые в качестве параметров для сигналов ИГНС;
- параметр  $C_0/N_0 = h^2/T$ ;
- отношение  $\gamma$  мощности сигналов ИГНС к мощности легитимного сигнала НКА.

#### **4.2. Процедура максимизации функций правдоподобия по неизвестным параметрам**

Как отмечалось выше (п. 2.1), при использовании критерия ООП необходимо производить процедуру максимизации ФП по неизвестным параметрам для каждой из рассматриваемых гипотез. При этом решение задачи нахождения максимума ФП по ряду параметров (начальные фазы сигналов, амплитудные коэффициенты и т.п.) было найдено аналитически на этапе синтеза алгоритмов КЦНП (п.п. 2.1 и 2.2), в то время как ряд других параметров (истинные и ошибочные координаты НО, координаты ИГНС и др.) требуют решения задачи оптимизации численными методами на

этапе работы алгоритма КЦНП. Рассмотрим особенности такой процедуры на примере прямого оптимального алгоритма (2.1) (алгоритм  $A$ ), предполагающего необходимость проведения процедуры максимизации по ошибочным параметрам  $\Delta\tau'$  и  $\mathbf{P}' = [x' \ y' \ z']^T$ , определяемым стратегией работы ИГНС. Как отмечалось выше (п. 2.1), характеристики такого алгоритма будут определять верхнюю границу эффективности рассматриваемых в данной работе алгоритмов КЦНП (как прямых, так и с постобработкой). При этом, как показано в п. 2.1, соответствующие математические преобразования позволяют заменить процедуру максимизация числителя ОП  $\Lambda(x(t))$  по параметрам  $\Delta\tau'$  и  $\mathbf{P}'$  на эквивалентную процедуру максимизации функции  $\Upsilon_1(\Delta\tau', \mathbf{P}')$  по этим же параметрам. Одновременно с этим процедура максимизации знаменателя в ОП не предполагается ввиду отсутствия составляющих ложных сигналов в ФП для гипотезы  $H_0$ . С учетом этого, процедура принятия решения о наличии и отсутствии целостности навигационного поля сводится к нахождению максимума целевой функции (ЦФ)  $\Upsilon(\Delta\tau', \mathbf{P}') = \Upsilon_1(\Delta\tau', \mathbf{P}') - \Upsilon_0$  в (2.1) и сравнения найденного максимума с порогом. При этом точность нахождения максимума, зависящая от метода максимизации, влияет на эффективность реализованного таким образом алгоритма КЦНП. Пример результата указанной максимизации целевой функции алгоритма (2.1) в условиях, когда на его вход поступают многомерные выборки, сформированные для условий наличия нарушения целостности навигационного поля, при  $\gamma = 3$  дБ,  $C_0/N_0 = 40$  дБ·Гц ( $h^2 = 10$  дБ),  $M=2$ ,  $L=5$  представлен на рис. 4.2. В рассматриваемом примере размер  $R$  зоны поиска по координатам  $\mathbf{P}'$  равен 500 м. На этом же рисунке отмечены истинные  $\mathbf{P}_{НО}$  координаты НО, а также и ошибочные  $\mathbf{P}'$ , заданные при моделировании в качестве входных параметров воздействия ИГНС. Видно, что у получившейся поверхности имеется ярко выраженный максимум, положение которого близко к положению координат  $\mathbf{P}'$ , Вид аналогичной поверхности, полученной в результате максимизации целевой функции алгоритма (2.1), когда на его вход поступают многомерные выборки, сформированные для условий отсутствия нарушения целостности навигационного поля, изображен на рис. 4.3. Как и

ожидалось, у получившейся поверхности нет ярко выраженного максимума, как в случае, когда имеется помеха, создаваемая ИГНС (рис. 4.2).

В рассмотренном примере в процессе моделирования работы алгоритма (2.19) в качестве входных данных истинные  $P_{HO}$  координаты НО в системе координат WGS-84 были выбраны равными  $59.61985^\circ$  с.ш.,  $29.24973^\circ$  в.д. (г. Санкт-Петербург), ошибочные  $P'$  заданы с отличием от истинных на величину  $\Delta P = \|P' - P_{HO}\| = 500$  м. Формирование навигационных сигналов произведено в соответствии со стандартом для сигналов GPS открытого доступа на частоте  $L1$  (CA-код) [1] для случая наблюдаемого 14.10.16 в г. Санкт-Петербург созвездия НКА системы GPS, вид которого представлен на рис. 4.4.

На рис. 4.2 и 4.3 проведена плоскость, соответствующая произвольно выбранной величине порога принятия решения. Путем многократного (не менее  $10^5$  раз) сравнения максимальных результатов  $\Upsilon(\Delta\tau', P')$ , полученных для условий отсутствия нарушения целостности навигационного поля, с различными по величине порогами  $\Lambda_1$  принятия решения получим зависимость  $P_{ПН}$  от  $\Lambda_1$ . Путем сравнения результатов максимизации ЦФ  $\Upsilon(\Delta\tau', P')$ , полученных для условий наличия нарушения целостности навигационного поля, с различными по величине порогами  $\Lambda_1$  принятия решения – зависимость  $P_{ПН}$  от  $\Lambda_1$ . Полученная рис. 4.5 на основе двух указанных характеристик зависимость между вероятностями  $P_{ПН}$  и  $P_{ПТ}$  будет определять эффективность алгоритма  $A$  в рассматриваемых условиях. Указанные доверительные интервалы на рис. 4.5, а также на всех приводимых далее вероятностных характеристиках, соответствуют доверительной вероятности 0.95.

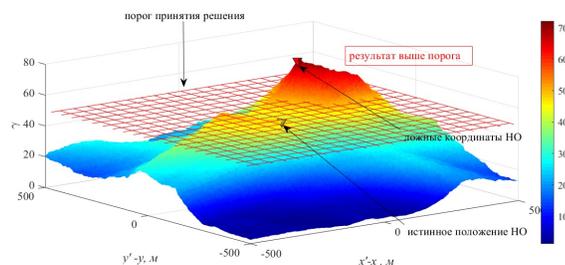


Рис. 4.2. Результат максимизации целевой функции  $\Upsilon(\Delta\tau', P')$  по значениям ложных координат  $x'$  и  $y'$  в случае наличия нарушения целостности навигационного поля при  $L=5$ ,  $M=2$ ,  $\Delta p=5$  м,  $\gamma=3$  дБ,  $C_0/N_0 = 40$  дБ · Гц,  $R=500$  м

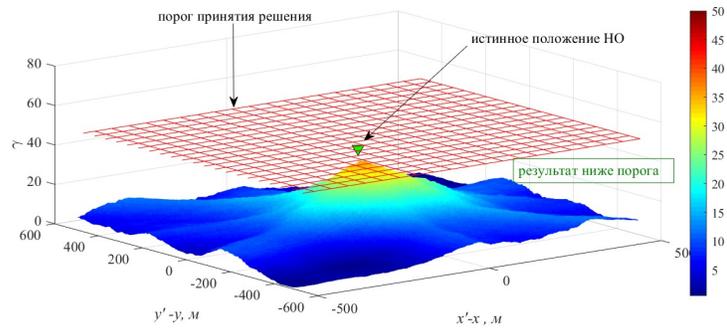


Рис. 4.3. Результат максимизации целевой функции по значениям ложных координат  $x'$  и  $y'$  в случае отсутствия нарушения целостности навигационного поля при  $L = 5$ ,  $M = 2$ ,  $\Delta_p = 5$  м,  $C_0/N_0 = 40$ дБ·Гц,  $R = 500$  м

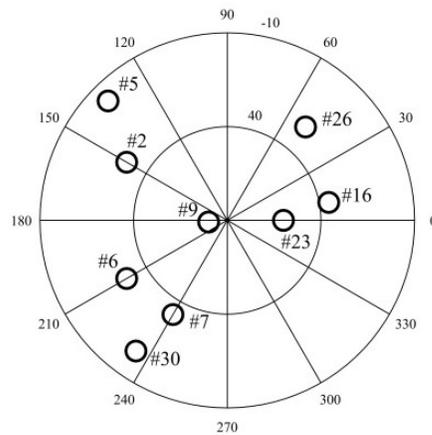


Рис. 4.4. Наблюдаемое в г. Санкт-Петербург созвездие НКА системы GPS от 14.10.16

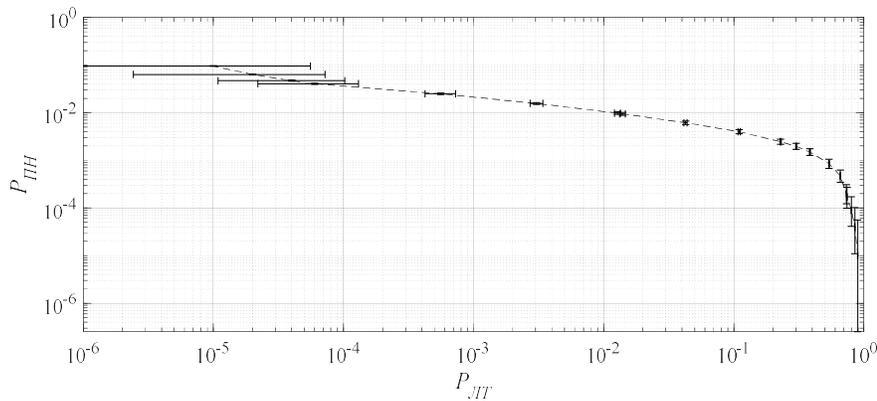


Рис. 4.5. Зависимость между вероятностями  $P_{ПН}$  и  $P_{ЛТ}$  при  $\gamma = 3$  дБ,  $C_0/N_0 = 40$ дБ·Гц,  $R = 500$  м,  $M = 2$ ,  $L = 5$  и  $\Delta_p = 5$  м

На рис. 4.6 приведена характеристика зависимости вероятности  $P_{ПН}$  от  $\Delta_p$  при  $P_{ЛТ} = 10^{-3}$ ,  $L=5$ ,  $C_0/N_0 = 40$ дБ·Гц ( $h^2 = 10$  дБ) и различных значениях параметров  $\gamma$  и  $M$ .

Из зависимостей следует, что в области больших значений  $P_{\text{ПН}} > 10^{-3}$  максимально допустимой величиной шага  $\Delta_p$  является значение 100-150 м, в то же время с увеличением отношения  $\gamma$  в области малых значений  $P_{\text{ПН}} \approx 10^{-4} \dots 10^{-6}$  требования к величине шага становятся более жесткими, так что максимально допустимыми являются значения 30..50 м. Именно такая величина шага перебора была выбрана при проведении дальнейшего статистического моделирования.

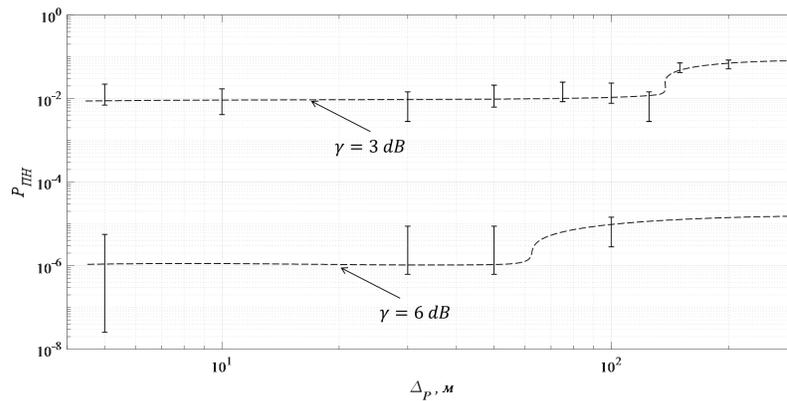


Рис. 4.6. Зависимость  $P_{\text{ПН}}$  от значений шага  $\Delta_p$  при  $P_{\text{ЛТ}} = 10^{-3}$ ,  $C_0/N_0 = 40 \text{ dB} \cdot \text{Гц}$ ,  $L = 5$  и  $M = 2$

Как показал проведенный анализ, при рассмотрении процедуры максимизации в алгоритме  $A$  по остальным параметрам ( $\Delta\tau'$  и  $z'$ ) целесообразно использовать также шаг не больший, чем 0.1...0.2 мкс и 30...50 м соответственно. Сравнение алгоритма прямого перебора с ускоренным методом Нелдера-Мида по критерию затрачиваемой вычислительной сложности, выражаемая в необходимом количестве  $N_\gamma$  вычислений функции  $\Upsilon(\Delta\tau', \mathbf{P})$  при различных величинах размера  $R$  зоны поиска, приведено на рис. 4.7. При этом для алгоритма прямого перебора рассмотрены варианты с различным по величине шагом поиска  $\Delta_p$ .

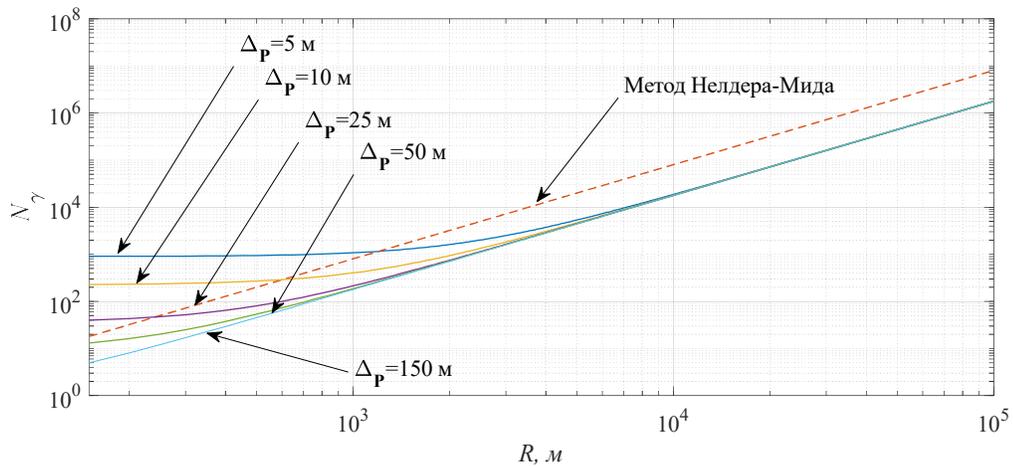


Рис. 4.7. Вычислительная сложность анализируемых алгоритмов поиска

Из зависимостей рис. 4.7 следует, что алгоритм Нелдера-Мида дает существенный выигрыш (1-2 порядка) по сравнению с прямым перебором лишь при рассмотрении малых зон поиска и лишь по сравнению с прямым перебором с малым значением шага (менее 10 м). В то же время, как показали результаты п. 4.2.1, значение шага перебора порядка 10 м является для реализации прямого оптимального алгоритма КЦНП избыточно малым, а хорошая работоспособность сохраняется и при гораздо большей величине шага (порядка 30-50 м). При этом алгоритм Нелдера-Мида оказывается более сложным во всей рассматриваемой области значений размера  $R$  зоны поиска. Таким образом, в случае использования сигналов GPS открытого доступа на частоте  $L1$  (C/A-код) для сокращения вычислительных затрат при реализации прямых алгоритмов КЦНП целесообразно производить максимизацию по неизвестным значениям координат путем последовательного прямого перебора с шагом 30-50 м.

### 4.3. Эффективность прямого оптимального алгоритма

Оценим путем статистического моделирования вероятностные характеристики алгоритма  $A$  в случае, когда используется эквидистантная AP, а работа ведется по созвездию, представленному на рис. 4.4. При этом на каждой итерации моделирования помимо формирования случайных выборок АБГШ, угловые направления на ИГНС, значения ложных координат, а также начальные фазы как легитимных, так и ложных сигналов формируются случайным образом. При этом распределения зна-

чений угловых направлений на ИГНС выбраны равномерными в диапазоне  $0 \dots 360$  град. в азимутальной плоскости и  $0 \dots 90$  град. в плоскости угла места. Значения ложных координат  $\mathbf{r}'$  также распределены равномерно в пределах радиуса  $R$  от положения НО, а начальные фазы формируемых сигналов распределены равномерно в диапазоне  $0 \dots 2\pi$  рад.

Следует ожидать, что как число используемых для принятия решения сигналов, так и количество элементов АР будут влиять на эффективность алгоритма КЦНП, поэтому моделирование проводилось в широком диапазоне изменения указанных параметров. На основе работы модели получены зависимости  $P_{\text{ПН}}$  от  $\gamma$  при типичных значениях вероятности  $P_{\text{ЛП}} = 10^{-3}$  и  $P_{\text{ЛП}} = 10^{-5}$ . Указанные зависимости изображены на рис. 4.8 для случая  $L = 2, M = 1 \dots 5$ , на рис. 4.9 – для  $L = 3$  и  $M = 1 \dots 5$  и на рис. 4.10 – для  $L = 4$  и  $M = 1 \dots 5$ .

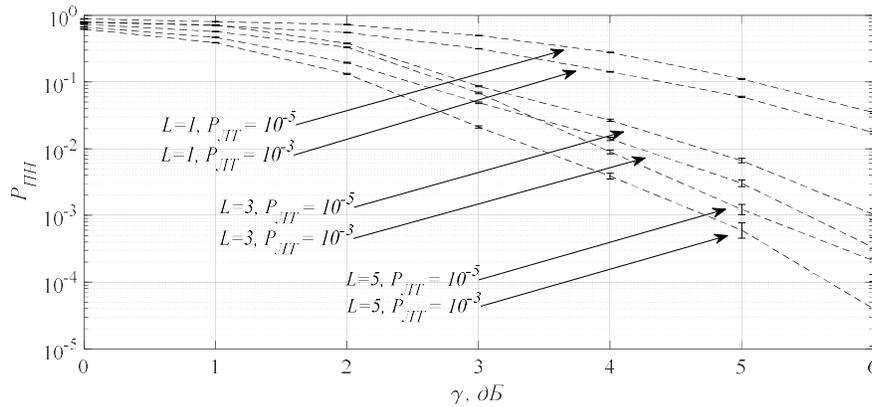


Рис. 4.8. Зависимость вероятности  $P_{\text{ПН}}$  от  $\gamma$  при  $C_0/N_0 = 40 \text{ дБ} \cdot \text{Гц}$ ,  $R = 500$  м и  $M = 2$  при использовании алгоритма А

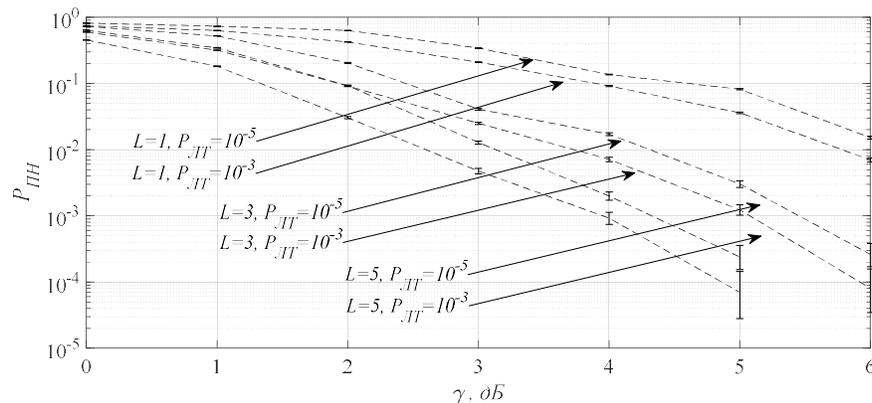


Рис. 4.9. Зависимость вероятности  $P_{\text{ПН}}$  от  $\gamma$  при  $C_0/N_0 = 40\text{дБ} \cdot \text{Гц}$ ,  $R = 500$  м и  $M = 3$  при использовании алгоритма  $A$

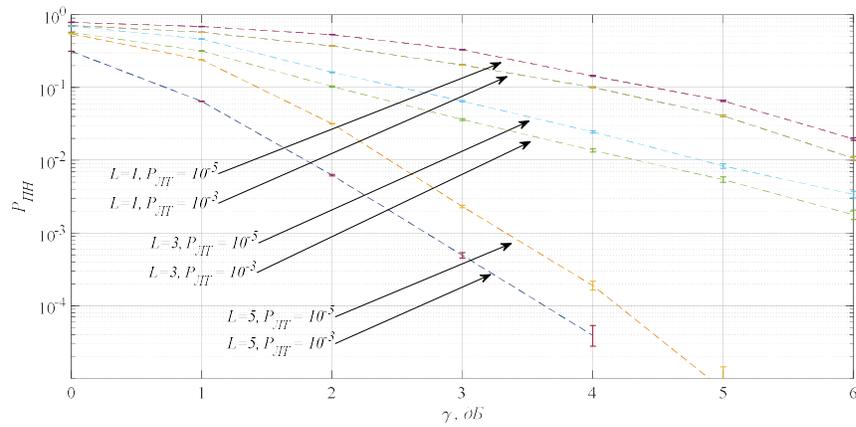
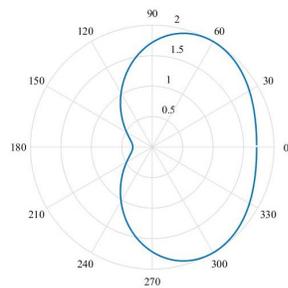
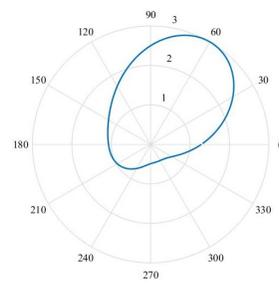


Рис. 4.10. Зависимость вероятности  $P_{\text{ПН}}$  от  $\gamma$  при  $C_0/N_0 = 40\text{дБ} \cdot \text{Гц}$ ,  $R = 500$  м и  $M = 4$  при использовании алгоритма  $A$

Таким образом, увеличение числа элементов АР приводит к улучшению вероятностных характеристик прямого оптимального алгоритма  $A$ . Соответствующее снижение вероятности  $P_{\text{ПН}}$  объясняется, прежде всего, повышением избирательных (в пространстве) свойств синтезируемой системы, что выражается в увеличении КУ и сужении главного лепестка ДН, что подтверждается приведенными на рис. 4.11 диаграммами.



а)



б)

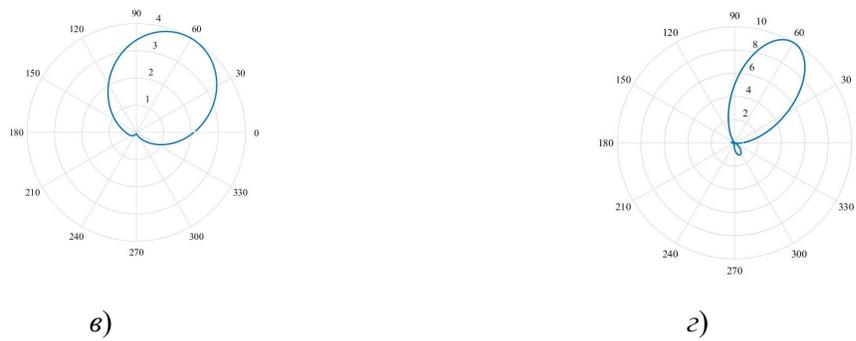


Рис. 4.11. Примеры ДН, формируемых в процессе работы алгоритма КЦНП, для случаев использования АР при  $M = 2$  (а), 3 (б), 4 (в) и 10 (г)

#### 4.4. Моделирование «прямых» алгоритмов КЦНП, оптимальных при различных видах априорной неопределенности относительно параметров НО и ИГНС

Указанный выше «прямой» алгоритм  $A$  оптимизирован для гипотетического случая, когда все информационные параметры принимаемых сигналов являются известными. В то же время координаты  $\mathbf{P}_{НО} = [x \ y \ z]^T$  НО и координаты  $\mathbf{P}_{ИГНС} = [x_{ИГНС} \ y_{ИГНС} \ z_{ИГНС}]^T$  ИГНС могут оказаться неизвестными в реальных условиях. Прежде всего очевидно, что ошибки в знании направления на ИГНС могут приводить к снижению эффективности алгоритма  $A$ , так на рис. 4.12 приведена зависимость  $P_{ИГНС}$  от  $\gamma$  при типичном значении вероятности  $P_{ЛГ} = 10^{-3}$  в случае, когда  $L = 3$ ,  $M = 4$  и имеются ошибки в знании углов азимута и склонения ИГНС, СКО которых равны  $\sigma_{ИГНС}$ .

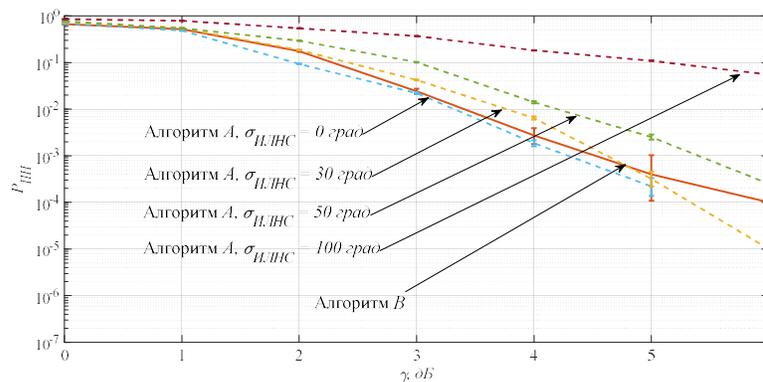


Рис. 4.12. Влияние ошибок в знании направления на ИГНС на эффективность алгоритма  $A$  при

$$P_{ЛГ} = 10^{-3}$$

Из полученных зависимостей следует, что в случае наличия ошибок порядка 40 град. и более эффективность системы КЦНП в рассматриваемых условиях снижается более чем на 1 дБ. Переход к алгоритму *B*, учитывающему наличие априорной неопределенности в знании координат ИГНС, позволяет снизить потери относительно случая, когда координаты ИГНС известны с большой погрешностью. При этом для устранения мешающих параметров производится процедура максимизации по неизвестным значениям угловых направлений (азимут  $\mu_{II}$  и угол места  $\eta_{II}$ ) на ИГНС. Реализация процедуры максимизации по углам  $\mu_{II}$  и  $\eta_{II}$ , аналогично тому, как в п. 4.2.1 и 4.2.2 производилась максимизация по неизвестным ошибочным координатам  $\mathbf{r}'$ , может осуществляться как методом прямого перебора, так и ускоренными методами максимизации. В случае прямого перебора для рассматриваемых в работе малогабаритных АР шаг перебора по угловым направлениям не должен превышать 10 град. Примеры результатов процедуры максимизации целевой функции (2.28) по углам  $\mu_{II}$  и  $\eta_{II}$  для случая отсутствия и наличия нарушения целостности навигационного поля приведены на рис. 4.13а и 4.13б, соответственно.

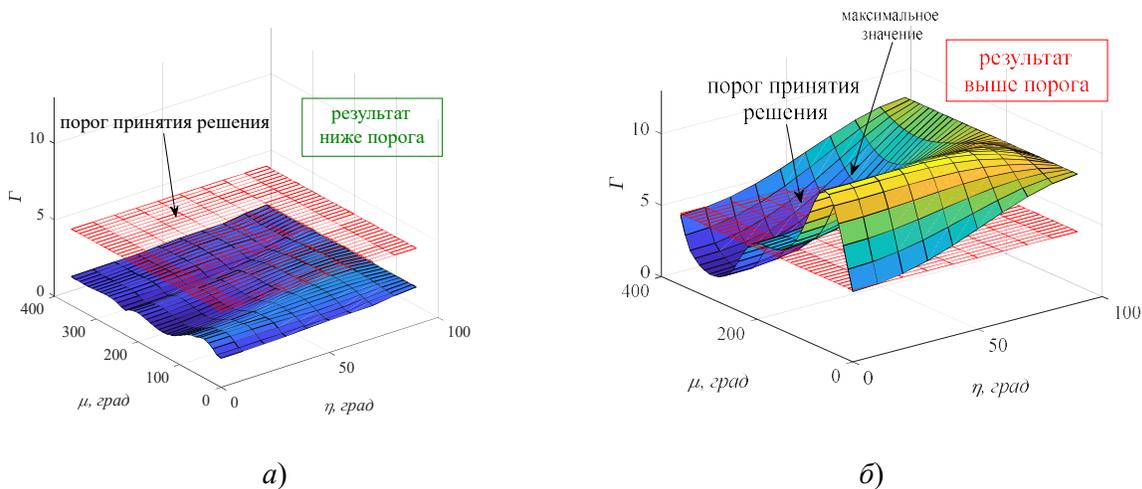


Рис. 4.13. Результат максимизации целевой функции алгоритма *B* по значениям угловых направлений  $\mu_{II}$  и  $\eta_{II}$  на ИГНС в случае отсутствия а) и наличия б) нарушения целостности навигационного поля при  $L = 4$ ,  $M = 3$ ,  $\gamma = 6$  дБ,  $C_0/N_0 = 40$  дБ · Гц

В приведенных примерах использовались следующие параметры моделирования:  $\gamma = 6$  дБ,  $C_0/N_0 = 40$  дБ·Гц ( $h^2 = 10$  дБ),  $M=3$ ,  $L=4$ . Как показывают вероятностные характеристики, полученные для алгоритма  $B$  в указанных условиях и приведенные на рис. 4.14, потери алгоритма  $B$  относительно случая, когда используется алгоритм  $A$  и координаты ИГНС известны абсолютно точно, не превышают 0.5 дБ.

Оценим также влияние точности знания параметров НО, таких как его координаты и углы пространственной ориентации, на эффективность прямого алгоритма  $A$ . Из зависимостей, представленных на рис. 4.25, следует, что ошибки в знании параметров НО не приводят к существенному ухудшению вероятностных характеристик – изменения вероятности  $P_{ПН}$  находятся в пределах доверительных интервалов. На этом же рисунке приведены кривые эффективности алгоритма  $B$  также в условиях наличия ошибок в знании координат НО и углов его пространственной ориентации. На основе полученных результатов, можно сделать вывод, что прямые алгоритмы  $A$  и  $B$  нечувствительны к ошибкам в знании параметров НО. Соответствующие алгоритмы  $D$  и  $E$ , в которых производится процедура максимизации по параметрам НО, показывают вероятностные характеристики также незначительно отличающиеся от характеристик алгоритмов  $A$  и  $B$ .

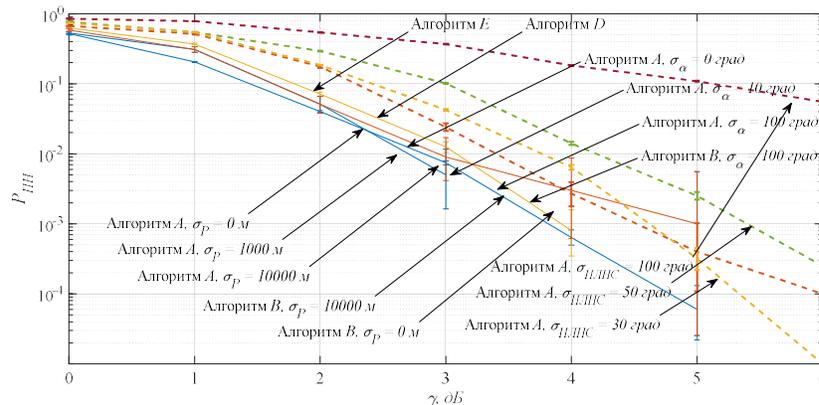


Рис. 4.14. Влияние ошибок в знании параметров НО на эффективность алгоритмов  $A$  и  $B$  при  $P_{ПН} = 10^{-3}$

Наиболее общий подход предполагает, что все параметры ИГНС и НО неизвестны, в таком случае реализуются алгоритмы  $C$ ,  $D$  или  $E$ , в которых, как показано в п. 2.2.4, выполняется максимизация по неизвестным параметрам НО. В этом случае при реализации алгоритма  $E$  предполагается пересчет угловых направлений на НКА через матрицу поворота в соответствии с формулой (1.5). Такой пересчет, выполняемый для всех проверяемых значений углов, значительно усложняет алгоритм  $E$ . При этом если такую процедуру не реализовывать, и использовать алгоритмы  $A$ ,  $B$ ,  $C$  или  $D$ , то потери в эффективности будут, как показывают результаты статистического моделирования, приведенные на рис. 4.14, не более 1 дБ.

#### 4.5. Моделирование прямых подоптимальных алгоритмов

Используя описанный выше механизм статистического моделирования, произведем оценку потерь в эффективности при использовании описанных в п.2.3 упрощений прямых оптимальных алгоритмов  $A$ ,  $B$ , ... $E$ . Рассмотрим прежде всего прямых алгоритмы из подгруппы  $A$  (алгоритмы  $A$ ,  $A1$ ,  $A2$ , ...  $A5$ ). Результаты сравнения – зависимости вероятностей  $P_{\text{ПН}}$  от величины  $\gamma$  представлены на рис. 4.15.

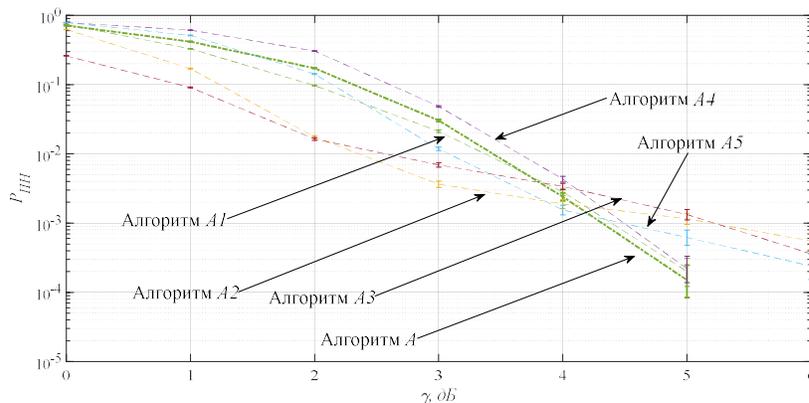


Рис. 4.15. Зависимость вероятности  $P_{\text{ПН}}$  от  $\gamma$  при  $C_0/N_0 = 40\text{дБ}\cdot\text{Гц}$ ,  $M = 3$  и  $L = 4$  при использовании алгоритмов из группы  $A$  при  $P_{\text{ЛТ}} = 10^{-3}$

Из полученных характеристик следует, что при  $\gamma$  больше 3 дБ подоптимальные алгоритмы  $A2$ ,  $A3$  и  $A5$  могут проигрывать в эффективности алгоритму  $A$  более чем на 1 дБ, в то же время алгоритмы  $A1$  и  $A4$  проигрывают по сравнению с алгоритмом

$A$  не более чем на 0.3 дБ во всей области проанализированных значений  $\gamma$  (от 0 до 6 дБ). Кроме этого указанный ряд подоптимальных алгоритмов  $A2$ ,  $A3$  и  $A5$ , эффективность которых значительно ниже остальных, оказываются также весьма чувствительны к ошибкам в знании параметров НО. Так, например, на рис. 4.16 приведены ВХ алгоритма  $A2$  в случае наличия ошибок различной величины в знании координат НО. Как следует из приведенных результатов даже незначительные ошибки в знании координат НО (порядка 10 м) приводят к значительным потерям в эффективности системы КЦНП.

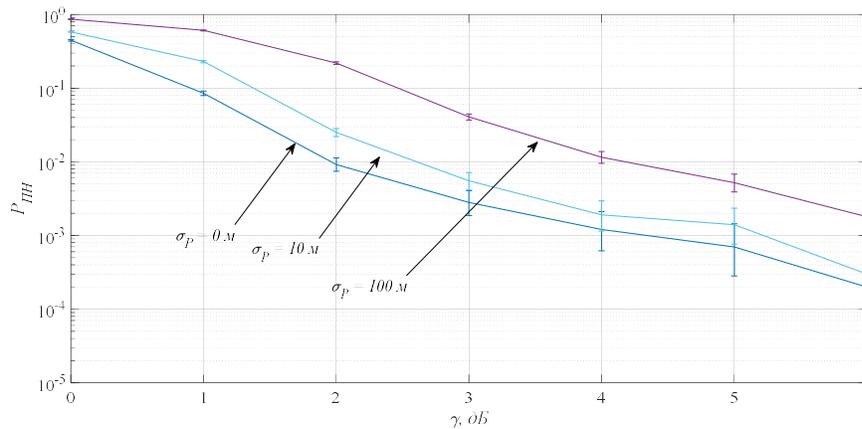


Рис. 4.16. Влияние ошибок в знании параметров НО на эффективность прямого подоптимального алгоритма  $A2$  при  $P_{ПТ} = 10^{-3}$

Аналогичные результаты наблюдаются также и для алгоритмов  $A3$  и  $A5$  (см. далее), а для алгоритмов  $A1$  и  $A4$ , напротив, влияние ошибок в знании параметров НО отсутствует. Это объясняется тем, что в алгоритмах  $A1$  и  $A4$  в результате применяемых упрощений составляющие, обусловленные легитимными сигналами НКА, принятыми на НО, исключены из рассмотрения. С учетом перечисленного наибольший интерес для дальнейшего анализа представляют только те подоптимальные алгоритмы, которые получены в результате применения указанных упрощений. Характеристики таких алгоритмов ( $B1$  и  $B4$ ) приведены на рис. 4.17, на этом же рисунке приведены характеристики алгоритмов  $A$ ,  $D$  и  $E$ .

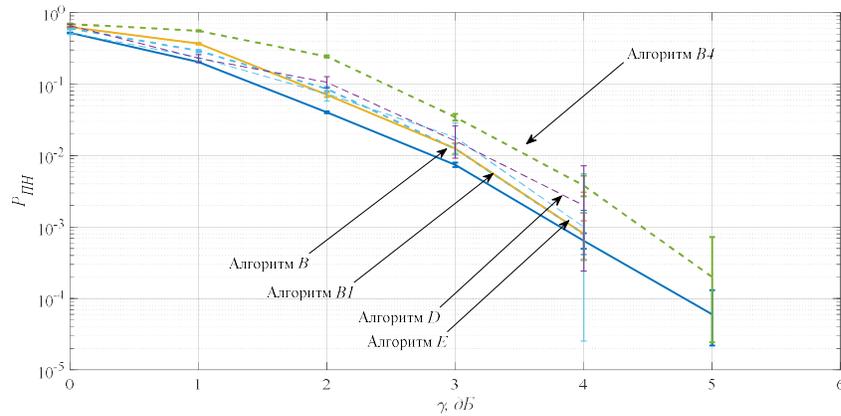


Рис. 4.17. Зависимость вероятности  $P_{III}$  от  $\gamma$  при  $C_0/N_0 = 40\text{дБ}\cdot\text{Гц}$ ,  $M = 3$  и  $L = 4$  при использовании алгоритмов  $B1$  и  $B4$  при  $P_{IT} = 10^{-3}$

#### 4.6. Моделирование оптимального алгоритма с постобработкой и его вероятностные характеристики

Сравним эффективность рассмотренных выше прямых алгоритмов (как оптимальных так и подоптимальных) с эффективностью алгоритмов, основанных на постобработке результатов пеленгационных измерений (п.3.1 и п.3.2). Для получения вероятностных характеристик статистическое моделирование производилось с использованием универсальной модели, описанной в п.4.1 и для тех же условий, что и в п.4.5 и 4.6, а именно:  $C_0^{(l)}/N_0 = C_0/N_0 = 40\text{дБ}\cdot\text{Гц}$  ( $h^2 = 10\text{ дБ}$ ),  $M=3$ ,  $L=4$ , когда в качестве рабочего созвездия снова использовалась группировка НКА системы GPS, наблюдаемая 14.10.16 из точки с координатами  $59.61985^\circ$  с.ш.,  $29.24973^\circ$  в.д. (г. Санкт-Петербург), вид которого представлен на рис. 4.4. При этом в процессе моделирования все параметры НО и ИГНС полагались неизвестными, а ошибочные координаты  $\mathbf{P}'$  задавались случайным образом в зоне радиусом  $\Delta P = \|\mathbf{P}' - \mathbf{P}_{НО}\| = 500\text{ м}$ . Результат сравнения вероятностных характеристик для прямых алгоритмов и оптимального алгоритма  $F$  постобработки представлен на рис. 4.18.

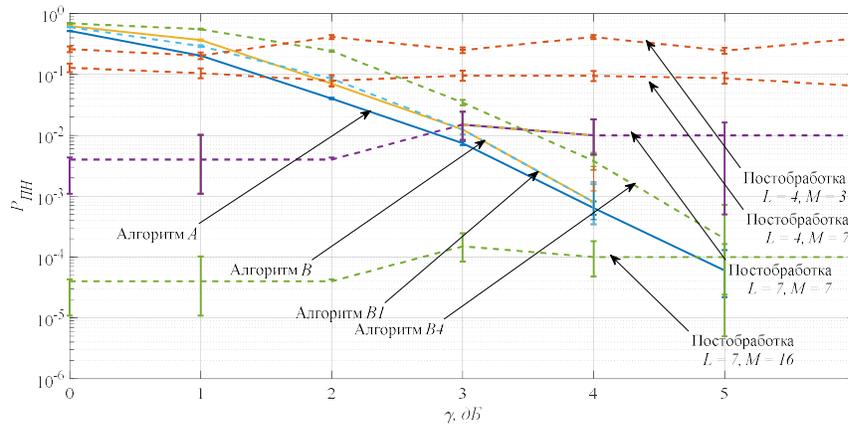


Рис. 4.18. Сравнение характеристик алгоритмов КЦНП при  $P_{ЛТ} = 10^{-3}$ ,  $C_0/N_0 = 40\text{дБ} \cdot \text{Гц}$ ,  $M = 3$  и  $L = 4$

Анализируя полученные характеристики, можно сделать вывод, что алгоритмы прямого анализа значительно выигрывают по сравнению с алгоритмами постобработки. Так, например, при типичном значении вероятности  $P_{ЛТ} = 10^{-3}$  в рабочем диапазоне отношений  $C_0/N_0$  и при использовании АР с тремя АЭ прямым методом достигается значение вероятности пропуска порядка  $P_{ПН} = 10^{-5}$  при  $\gamma$  порядка 5-6 дБ. В этих же условиях для метода постобработки с использованием той же АР в режиме пеленгования вероятность  $P_{ПН}$  возрастает до значения  $10^{-1}$ , и достижение такого же, как и в прямом методе, значения  $P_{ПН} = 10^{-5}$  возможно лишь при количестве АЭ не менее шестнадцати во всем рабочем диапазоне отношений помеха/сигнал  $\gamma$  (от 0 до 6 дБ).

Между тем, сравнение эффективности (рис.4.19) оптимального алгоритма  $F$  постобработки с подоптимальными ( $F1$ ,  $F2$ ,  $F3$  и  $F4$ ), рассмотренными в п. 3.2, показывает что, к сожалению рассмотренные в работе подоптимальные алгоритмы постобработки оказываются неработоспособными и показывают высокий уровень вероятности  $P_{ПН}$  (порядка  $10^{-1}$ ) во всем рассмотренном диапазоне отношений  $C_0/N_0$ , помеха/сигнал и при любом числе элементов в диапазоне (от 3 до 16). Это связано с тем, то рассмотренные подоптимальные алгоритмы рассчитаны на работу только по одному сигналу НКА и в этом случае возможное попадание ИГНС в угловой сектор рассматриваемого НКА приводит к значительному увеличению вероятности  $P_{ПН}$ .

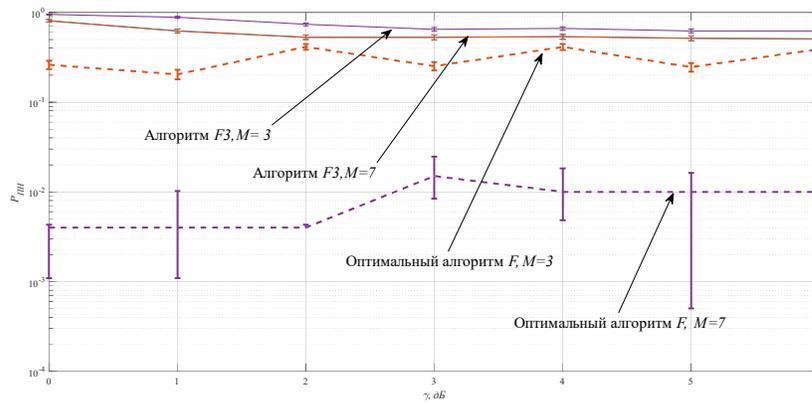


Рис. 4.19. Сравнение характеристик оптимального и подоптимального алгоритмов КСНП с постобработкой при  $C_0/N_0 = 40 \text{ дБ} \cdot \text{Гц}$ ,  $M = 3$  и  $L = 4$

Проведенный сравнительный анализ вероятностных характеристик алгоритмов принятия решения (вероятности  $P_{лж}$  «ложной тревоги» при отсутствии нарушения) при использовании эквидистантных двумерных АР с малым (2...16) числом элементов и анализе реальных группировок НКА показал, что алгоритмы прямого анализа обладают существенным преимуществом по сравнению с алгоритмами постобработки. Так в рабочем диапазоне отношений помеха сигнал достижение типичных значений вероятностей  $P_{лж} = 10^{-3}$  и  $P_{пн} = 10^{-5}$  для прямого оптимального алгоритма возможно при использовании 3-х антенных элементов. В свою очередь при использовании оптимального алгоритма постобработки удастся достичь аналогичных вероятностных характеристик только при увеличении числа антенных элементов до 16 шт, в то время как подоптимальные алгоритмы постобработки вообще не позволяют обеспечить требуемых значений вероятностей в рассмотренном диапазоне числа антенных элементов (3...16). Тем не менее окончательный выбор в пользу того или иного алгоритма должен производиться с учетом уже решаемых на НО задач, вычислительных возможностей применяемой элементной базы и требований к характеристикам системы КСНП.

#### 4.7. Вычислительная сложность алгоритмов КЦНП

Вычислительная сложность рассматриваемых алгоритмов безотносительно к особенностям применяемой программируемой элементной базы может быть представлена как количество операций сложения и умножения, необходимых для принятия решения о наличии или отсутствии нарушения целостности навигационного поля. В этом случае, учитывая, что в блоке цифровой обработки работа ведется с комплексными огибающими анализируемых сигналов, количество таких операций определим через следующие параметры: количество  $L$  сигналов НКА, используемых для принятия решения; количество  $M$  антенных элементов; частота  $f_s$  дискретизации сигнала; его длительность  $T$ ; частота  $f_{дк}^{(l)}(t)$  следования импульсов дальномерного кода; размер  $R$  зоны неопределенности в знании координат НО; шаг  $\Delta P$  перебора по координатам НО; шаги  $\Delta \mu$  и  $\Delta \eta$  перебора по угловым координатам (азимут и склонение, соответственно) ИГНС. С учетом перечисленного, а также, полагаясь на структурные-схемы алгоритмов КЦНП, представленные в п.2.2 и 2.3, получены аналитические выражения для расчета количества операций сложения и умножения, необходимых для реализации каждого рассматриваемого алгоритма.

Сравнение вычислительной сложности для всех анализируемых алгоритмов произведено для примера, когда  $M = 3$ ,  $L = 4$ . Результат сравнения вычислительных затрат приведен на рис. 4.20. Кроме этого была произведена совместная оценка вычислительной сложности и эффективности каждого из рассматриваемых алгоритмов при наличии различных видов априорной неопределенности. Установлено, что в случае, когда все параметры НО и ИГНС известны с высокой точностью минимум вычислительных затрат достигается при использовании алгоритма А4, без существенных потерь в эффективности. Вычислительные затраты того же порядка, также без заметных потерь в эффективности показывают также алгоритмы А3 и А5. Аналогичные зависимости получены также для условий, когда известны только параметры НО. В этом случае, как и следовало ожидать, все алгоритмы группы А показывают значительные потери в эффективности (вероятность  $P_{ин}$  возрастает на несколько порядков), так что для таких условий

одновременный минимум как по вероятности  $P_{ПН}$  так и по количеству вычислительных затрат наблюдается при использовании алгоритмов  $B5$ ,  $D5$  или  $B4$ .

И, наконец, в условиях, когда все параметры как НО, так и ИГНС, являются неизвестными (рис. 4.21) одновременный минимум, как по вероятности  $P_{ПН}$ , так и по количеству вычислительных затрат, наблюдается при использовании алгоритма  $B4$ . Таким образом можно сделать вывод, что в большинстве практических случаев когда про параметры НО и ИГНС ничего неизвестно, целесообразно использовать алгоритм  $B4$ .

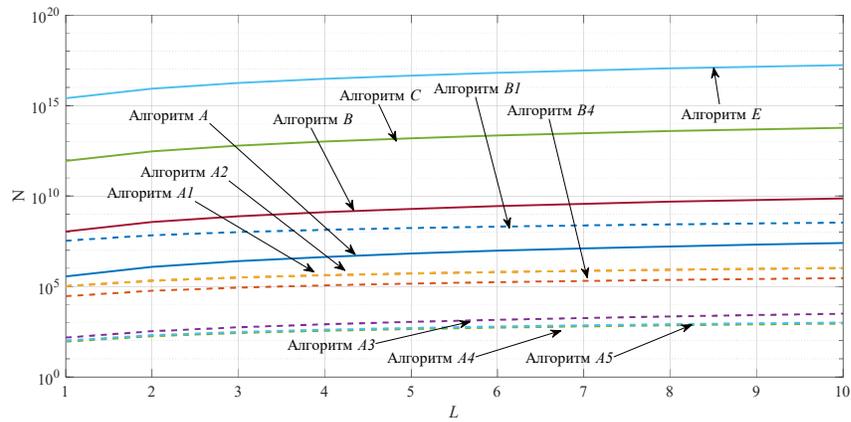


Рис. 4.20. Сравнение вычислительной сложности прямых алгоритмов КЦНП

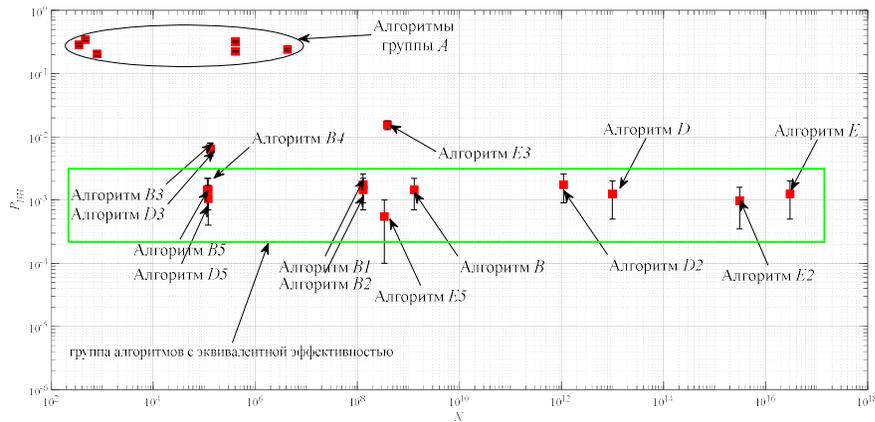


Рис. 4.21. Совместная оценка вычислительной сложности и эффективности для прямых алгоритмов КЦНП в условиях, когда априорная информация о параметрах НО и ИГНС отсутствует

## 5. ПОЛУНАТУРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА КОНТРОЛЯ ЦЕЛОСТНОСТИ НАВИГАЦИОННОГО ПОЛЯ ГНСС

### 5.1. Аналитическая модель формируемых сигналов

В процессе работы имитатор группы навигационных сигналов производит формирование навигационного поля (НП) ГНСС, что предполагает формирование совокупности  $M$  навигационных сигналов ( $M$  не менее 4-х), которые по своей структуре эквивалентны сигналам НКА (т.н. сигналы от *псевдо*НКА), принятым в точке  $\mathbf{P}'$ . В случае рассмотрения фазоманипулированных сигналов (GPS L1, GPS L5, ГЛОНАСС L1 и т.п.) каждый  $l$ -ый сигнал ( $l=1 \dots M$ ) представляют собой следующее колебание [1, 124]:

$$s^{(l)}(t) = \kappa_{\mathbf{P}'}^{(l)} A_0^{(l)}(t) \cos \left[ \omega_0^{(l)} t - (\mathbf{k}^{(l)})^T (\mathbf{P}_{НКА}^{(l)} - \mathbf{P}') + \varphi^{(l)} \left( t - (\mathbf{k}_0^{(l)})^T (\mathbf{P}_{НКА}^{(l)} - \mathbf{P}') / c \right) + \psi_0^{(l)} \right]. \quad (5.1)$$

Для общего случая, когда имеется временная зависимость хотя бы одного из параметров  $\mathbf{k}^{(l)}(t)$ ,  $\mathbf{P}_{НКА}^{(l)}(t)$  или  $\mathbf{P}'(t)$ , навигационный сигнал представляет собой гармоническое колебание с частотной модуляцией, наличие которой обусловлено эффектом Допплера, когда мгновенная частота  $\omega^{(l)}(t)$  колебания (5.1) определяется выражением:

$$\omega^{(l)}(t) = \frac{\partial [\omega_0^{(l)} t - \psi_l^{(l)}(t) + \psi_0^{(l)}]}{\partial t} = \omega_0^{(l)} - \frac{\partial [\psi_l^{(l)}(t)]}{\partial t} = \omega_0^{(l)} + \Delta \omega_d^{(l)}(t), \quad (5.2)$$

где  $\Delta \omega_d^{(l)}(t) = - \frac{\partial \left[ (\mathbf{k}^{(l)}(t))^T (\mathbf{P}_{НКА}^{(l)}(t) - \mathbf{P}'(t)) \right]}{\partial t} = \omega_0^{(l)} \frac{v_R^{(l)}(t)}{c}$  – сдвиг несущей частоты, имитирующий эффект Допплера;  $v_R^{(l)}(t) = \partial \left[ (\mathbf{k}_0^{(l)})^T (\mathbf{P}_{НКА}^{(l)}(t) - \mathbf{P}'(t)) \right] / \partial t$  – радиальная составляющая скорости относительного перемещения *псевдо*НКА и имитируемой точки  $\mathbf{P}'(t)$ .

Таким образом, фазовый сдвиг  $\psi_l^{(l)}(t) = (\mathbf{k}^{(l)}(t))^T (\mathbf{P}_{НКА}^{(l)}(t) - \mathbf{P}'(t))$  формируемых колебаний, соответствующий имитируемой дальности до каждого  $l$ -го *псевдо*НКА, возникает вследствие задания необходимого закона вида (5.2) частотной модуляции  $\omega^{(l)}(t)$  на интервале времени от  $t_0$  до  $t$ . При этом закон фазовой модуляции, определяемый последовательностью (или последовательностями) дальномерного кода, в

момент времени  $t$  также задержан на величину  $\tau^{(l)}(t)$ . В этом случае в каждый момент времени  $t$  задержка  $\tau^{(l)}$  переднего фронта дальномерного кода  $l$ -го сигнала имитатора должна удовлетворять соотношению:

$$\sum_{n=0}^{t-t_0/T_{ДК}} \left( T_{ДК} - T_{ДК}^{(l)}(t_n) \right) = \tau^{(l)}(t) - \tau^{(l)}(t_0), \quad (5.3)$$

где  $T_{ДК}^{(l)}(t)$  – величины периодов следования элементов дальномерного кода для  $l$ -го сигнала имитатора,  $T_{ДК}$  – величины периодов следования элементов дальномерного кода излученного  $l$ -м сигналом НКА,  $t_0$  – начальный момент времени работы имитатора,  $\tau^{(l)}(t_0)$  – задержка переднего фронта дальномерного кода  $l$ -го сигнала имитатора в начальный момент времени  $t_0$ .

При этом если рассмотреть малый интервал  $T_{И}$  времени от  $t$  до  $t+T_{И}$ , когда скорость изменения дальности до псевдоНКА можно считать неизменной, то, используя соотношение (5.3), частоту следования импульсов дальномерного кода на интервале времени от  $t$  до  $t+T_{И}$  можно приближенно определить следующим образом:

$$f_{ДК}^{(l)}(t) \approx f_{ДК} \left( 1 + \frac{\tau^{(l)}(t+T_{И}) - \tau^{(l)}(t)}{(T_{И} - \tau^{(l)}(t+T_{И}) - \tau^{(l)}(t))} \right), \quad (5.4)$$

что соответствует формуле Допплера.

Таким образом, пользуясь соотношениями (5.3) и (5.4) можно имитировать навигационное поле, формируемое группировкой движущихся НКА, в любой заданной точке в любой момент времени от любого заданного созвездия, формируя сигналы следующего вида:

$$s^{(l)}(t) = \kappa_p^{(l)} \cos \left[ \omega^{(l)}(t)t + \varphi^{(l)}(t - \tau^{(l)}(t_0)) + \psi_0^{(l)} \right], \quad (5.5)$$

где частота  $\omega^{(l)}(t)$  устанавливается в соответствие с формулой (5.5), а частота следования импульсов дальномерного кода  $\varphi^{(l)}(t)$  – в соответствии с формулой (5.9). При этом заметим, что сигналы вида (5.5) могут быть представлены также в эквивалентной форме, через соответствующие им аналитические сигналы, аналогично тому, как это делалось в п.2.1. В этом случае получим:

$$s^{(l)}(t) = \operatorname{Re} \left[ F^{(l)}(t) \exp \left\{ \omega_0^{(l)} t \right\} \right], \quad (5.6)$$

где  $F^{(l)}(t) = I^{(l)}(t) + jQ^{(l)}(t)$  – комплексная огибающая  $l$ -го сигнала, причем квадратные составляющие  $I^{(l)}(t)$  и  $Q^{(l)}(t)$  определяются выражениями:

$$I^{(l)}(t) = \kappa_{\mathbf{p}'}^{(l)} \cos \left\{ \varphi_{T'}^{(l)}(t - \tau^{(l)}(t_0)) + \psi_0^{(l)} \right\} \cos(\Delta\omega_d^{(l)}(t)t) - \kappa_{\mathbf{p}'}^{(l)} \sin \left\{ \varphi_{T'}^{(l)}(t - \tau^{(l)}(t_0)) + \psi_0^{(l)} \right\} \sin(\Delta\omega_d^{(l)}(t)t), \quad (5.7)$$

$$Q^{(l)}(t) = \kappa_{\mathbf{p}'}^{(l)} \cos \left\{ \varphi_{T'}^{(l)}(t - \tau^{(l)}(t_0)) + \psi_0^{(l)} \right\} \sin(\Delta\omega_d^{(l)}(t)t) + \kappa_{\mathbf{p}'}^{(l)} \sin \left\{ \varphi_{T'}^{(l)}(t - \tau^{(l)}(t_0)) + \psi_0^{(l)} \right\} \cos(\Delta\omega_d^{(l)}(t)t). \quad (5.8)$$

Причем закон фазовой модуляции  $\varphi_{T'}^{(l)}(t)$  определяется в зависимости от типа сигнала одной  $\{d_k^{(l)}\}$  или двумя  $\{d_{lk}^{(l)}\}$  и  $\{d_{Qk}^{(l)}\}$  последовательностями дальномерного кода. Здесь  $k$  – номер отсчета последовательности. В случае с одной последовательностью используется двоичная фазовая модуляция (ФМ-2), закон которой можно представить следующим образом:

$$\varphi_{T'}^{(l)}(t - \tau^{(l)}(t)) = \sum_{k=0}^{N-1} \frac{\pi}{2} \left( 1 - (-1)^{d_{lk}^{(l)}} \right) \Psi_{T_{lk}^{(l)}(t)}(t - kT_{lk}^{(l)}(t) - \tau^{(l)}),$$

где  $\Psi_T(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < T \\ 0, & t < 0 \text{ или } t > T \end{cases}$ . При этом в случае с двумя последовательностями используется 4-ичная (ФМ-4) модуляция и соответственно  $\varphi_{T'}^{(l)}(t)$  принимает 4 различные значения, в зависимости от комбинаций  $\{d_{lk}^{(l)}\}$  и  $\{d_{Qk}^{(l)}\}$ .

Суммарная реализация  $s(t)$  всех  $l$  ( $l=1 \dots L$ ) имитируемых сигналов может быть записана следующим образом:

$$s(t) = \operatorname{Re} \left[ F_{\Sigma}'(t) \exp \left\{ \omega_0^{(l)} t \right\} \right], \quad (5.9)$$

где  $F_{\Sigma}'(t) = I_{\Sigma}'(t) + jQ_{\Sigma}'(t) = \sum_{l=1}^L I^{(l)}(t) + j \sum_{l=1}^L \kappa_{\mathbf{p}'}^{(l)} Q^{(l)}(t)$  – комплексная огибающая суммарного сигнала.

## 5.2. Особенности программно-аппаратной реализации имитатора навигационных сигналов

С учетом приведенной в п.5.1 аналитической модели имитатора навигационных сигналов, его универсальная блок-схема представлена на рис. 5.1 и предполагает выполнение следующей последовательности действий: формирование потока модулирующей информации (БФМИ) в соответствии с соответствующими стандартами, блок расчета параметров сигналов (БРП) и формирование комплексных огибающих (БФКО) сигналов в соответствии с выражениями. Сформированные таким образом комплексные огибающие суммируются, как следует из формулы (5.9), для дальнейшего цифроаналогового преобразования (ЦАП) и излучения на несущей частоте.

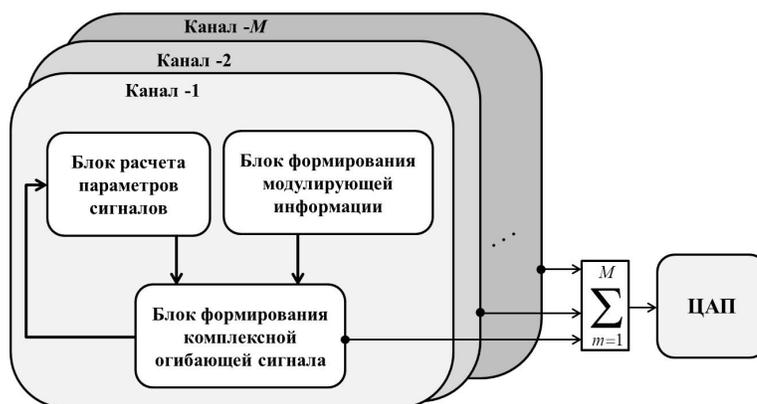


Рис. 5.1. Блок-схема устройства имитации навигационных сигналов

Более подробная схема одного из каналов формирования навигационного сигнала приведена на рис. 5.2. Данная схема является универсальной безотносительно к типу формируемых сигналов и представляет собой следующую последовательность действий:

- в синтезаторе тактовой частоты производится генерация импульсов на тактовой частоте  $f_{ДК}^{(l)}(t)$ , определяемой в соответствии с формулой (5.9);
- на полученной частоте производится считывание дальномерных кодов  $\{d_{Ik}^{(l)}\}$  и  $\{d_{Qk}^{(l)}\}$  из области памяти, определяемой типом сигнала и номером дальномерного кода;

- дальномерный код  $\{d_{lk}^{(l)}\}$  складывается по модулю два с битами модулирующей информации  $\{D_k^{(l)}\}$  и вторичным дальномерным кодом  $\{c_{lk}^{(l)}\}$  (если это предусмотрено стандартом);
- дальномерный код  $\{d_{Ok}^{(l)}\}$ , в случае если это предусмотрено стандартом, складывается по модулю два с элементами синхронизирующей последовательности  $\{c_{lk}^{(l)}\}$  (например, в стандарте GPS L5 в качестве такой последовательности используется 20-битный код Неймана-Хафмана);
- полученные последовательности поступают на квадратурный модулятор с доплеровским сдвигом (КМДС).

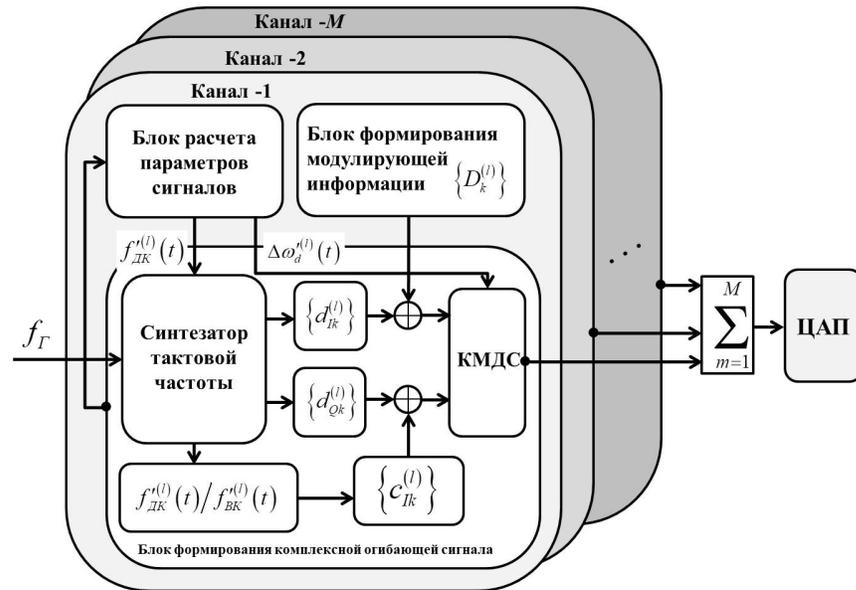


Рис. 5.2. Общая структурная схема универсального канала формирования сигнала

### 5.3. Исследование характеристик имитатора

Как было показано выше имитация навигационного поля производится за счет установки частотно-временных параметров сигналов для каждого из *псевдо*НКА. При этом формирование сигналов в цифровом виде в соответствии с алгоритмами поведёнными в п.5.1 и 5.2.1 предполагает, что установка соответствующих параметров будет производиться с некоторой дискретностью по времени. Очевидно, вели-

чина периода  $T_H$  обновления параметров сигналов в соответствии с формулами (5.2) и (5.3) будет влиять на точность формирования навигационного поля, поскольку на интервале времени от  $t$  до  $t+T_H$  доплеровское смещение частоты, а, следовательно, и имитируемые скорость и дальность будут отличаться от реальных. В этом случае получаются следующие соотношения для СКО установки дальности и скорости:

$$\sigma'_{\Delta v} = \frac{uT_H}{\sqrt{12}}, \quad (5.10)$$

$$\sigma'_{\Delta r} = \frac{uT_H^2}{\sqrt{120}} = \sigma'_{\Delta v} \cdot \frac{T_H}{\sqrt{10}}. \quad (5.11)$$

Т. о., исходя из требований к точностям установок дальности и скорости, а также исходя из требований к максимальному значению ускорения, можно определить максимально допустимое значение периода обновления частотно-временных параметров сигналов.

При обновлении параметров сигналов с периодом  $T_H$  суммарная ошибка в установке дальности  $T^{(l)}$  складывается, как минимум из следующих составляющих: 1) ошибка, обусловленная неточностью цифрового передискретизатора, связанная с конечной величиной разрядности  $b_c$ ; 2) ошибка, обусловленная конечной частотой  $f_r$  опорного генератора и 3) ошибка вызванная, непосредственно относительной нестабильностью  $\delta_{f_r}$  опорного генератора. Выражение для расчета суммарной ошибки с учетом имеет следующий вид:

$$\sigma'_{\Delta r} = \frac{c}{\sqrt{12}} \sqrt{\left( \left( \frac{T_H}{f_{ДК}^{(l)}} \right)^2 \left( \frac{1}{L_D T_{ДК}^{(l)}} - \frac{1}{\left[ \frac{L_D T_{ДК}^{(l)}}{L_D T_r} \right] \cdot [T_r L_D]} \right)^2 + \left( \frac{\delta_{f_r}}{f_r} \right)^2 \left( \left( \frac{T_H}{f_{ДК}^{(l)}} \right)^2 + 1 \right) + \left( \frac{1}{f_r} \right)^2} \cdot (5.12)$$

Графики зависимости (5.12) погрешности в установке дальности  $\sigma'_{\Delta r}$  от разрядности  $b_c$  нормировочного коэффициента  $L_D$  при  $T_H = 1$  с и различных величинах

частоты  $f_G$  опорного генератора, относительная нестабильность  $\delta_{f_G}$  которого равна  $10^{-7}$ , представлены на рис. 5.3 и 5.4 для сигналов системы ГЛОНАСС L1 (с тактовой частотой  $f_{ДК}^{(l)} = 0.511$  МГц).

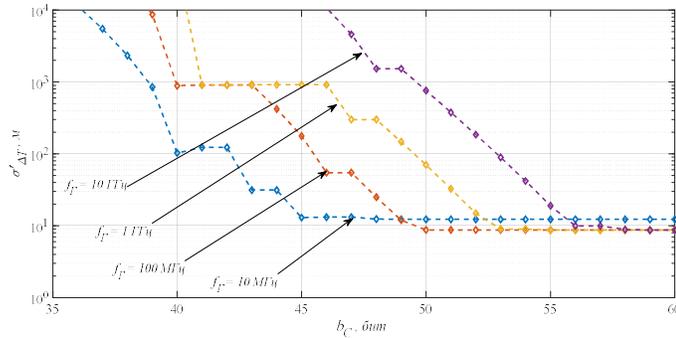


Рис. 5.3. Зависимости  $\sigma'_{\Delta T}$  от  $b_C$  для сигналов системы ГЛОНАСС L1 при  $\delta_{f_G} = 10^{-7}$  и  $T_{II} = 1$  с

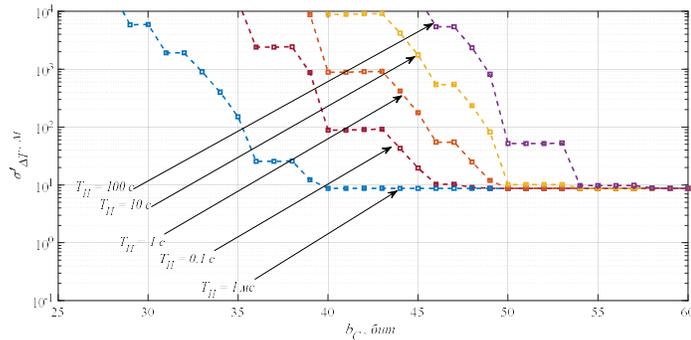


Рис. 5.4. Зависимости  $\sigma'_{\Delta T}$  от  $b_C$  для сигналов системы ГЛОНАСС L1 при  $\delta_{f_G} = 10^{-7}$  и  $f_G = 100$  МГц

Из представленных на рис. 5.3...5.4 зависимостей следует, что достижимая при имитации точность установки дальности растет с увеличением разрядности цифрового передискретизатора, однако, ограничивается тактовой частотой и относительной нестабильностью опорного генератора. Так, для представляющих практический интерес сигналов открытого доступа при использовании опорного генератора с частотой  $f_G = 100$  МГц достижимая точность составляет порядка 1 м, при этом разрядность нормировочного коэффициента передискретизатора должна быть не менее 50 бит, а относительная нестабильность опорного генератора не более  $10^{-9}$ . Для достижения сантиметровой точности частота генератора должна быть увеличена до 1 ГГц,

разрядность передискретизатора до 55 бит, а относительная нестабильность опорного генератора не превышать  $10^{-10}$ .

#### **5.4. Влияние точности имитатора на достоверность полунатурного моделирования**

Как было показано выше, в реальных условиях созданный программно-аппаратным способом имитатор будет формировать параметры сигналов с некоторой погрешностью. В рассматриваемой задаче имитатор навигационных сигналов предполагается использовать в качестве физической модели источника имитационной помехи, так что наличие дополнительных ошибок может нарушить адекватность проводимого полунатурного моделирования. В связи с этим, при использовании ИНС важно обеспечивать такую точность имитации параметров сигналов, при которой обеспечивается необходимая точность измерения вероятностных характеристик.

Для формирования требований к точности имитации навигационных сигналов воспользуемся моделью, описанной в п.4.1 в условиях, когда имитация временных задержек для мешающих сигналов ИГНС производится с некоторой погрешностью, СКО которой в пересчете на соответствующие дальности равно  $\sigma'_{\Delta T}$ . На рис.5.5а приведено семейство зависимостей между  $P_{\text{ИИ}}$  и  $P_{\text{ЛТ}}$  при различных значениях  $\sigma'_{\Delta T}$ , в случае использования алгоритма  $A$  в условиях  $h^2 = 10$  дБ,  $M = 2$ ,  $L = 1$ . На рис. 5.5б приведен аналогичный анализ влияния погрешности  $\sigma'_{\Delta f_0}$  установки доплеровского сдвига сигналов ИГНС на ВХ алгоритма  $A$ . Аналогичные зависимости получены также и при использовании алгоритмов  $A1$ ,  $A2$ ,  $A3$ ,  $A4$  и  $A5$ , и установлено, что при  $P_{\text{ИИ}}$  и  $P_{\text{ЛТ}}$  находящихся в диапазоне  $10^{-3} \dots 10^{-5}$  для наиболее полного соответствия физической модели постановщика помех имитатор навигационных сигналов, используемый в полунатурном моделировании или натурном эксперименте, должен осуществлять установку дальностей до НКА с погрешностью не хуже 10 м, а установку доплеровских сдвигов частоты несущих колебаний с точностью не хуже 10 Гц (что соответствует точности установки скорости порядка 2 м/с).

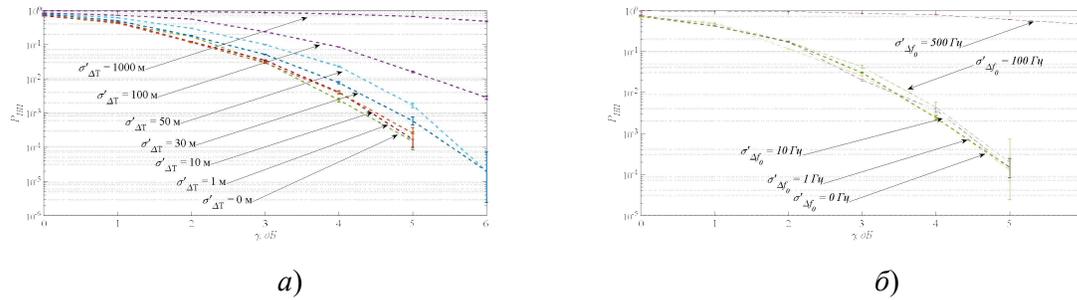


Рис. 5.5. Влияния погрешностей в установке дальностей (а) и доплеровских сдвигов несущей частоты (б) в процессе работы имитатора навигационных сигналов на эффективность алгоритма А при проведении и полунатурного моделирования, при  $h^2 = 10$  дБ,  $M = 2$ ,  $L = 1$

Используя полученные в результате моделирования требования к точности работы имитатора можно сформулировать итоговые требования к значениям параметров имитатора для того, чтобы при  $P_{III}$  и  $P_{JIT}$  находящихся в диапазоне  $10^{-3} \dots 10^{-5}$  погрешность измерения ВВХ алгоритмов КЦНП не превышала порядка доверительного интервала.

Так, как следует из формул (5.10) и (5.11), при условии, что ускорение НКА на орбитах составляет  $0.5 \text{ м/с}^2$ , период обновления частотно-временных параметров сигналов не должен превышать 10 с, что позволит обеспечить СКО установки дальностей до НКА не превышающими 10 м. В свою очередь в соответствии с результатами, приведенными на рис. 5.3 и 5.4, СКО имитации дальностей не будет превышать 10 м в случае если частота опорного генератора не менее 10 МГц, разрядность  $b_c$  цифрового передискретизатора не менее 45 бит. Тем не менее набор значений параметров имитатора может меняться в ту или иную сторону. Так, например, если имеется возможность улучшить один из параметров (например, нестабильность опорного генератора), то требования к периоду обновления параметров имитатора могут быть снижены, и наоборот. Пример, рабочих характеристик имитатора, соответствующего по своей точности для работы в качестве физической модели ИГНС объединены в таблице 5.1.

**Таблица 5.1.** Требования к характеристикам имитатора, используемого в качестве физической модели ИГНС

Параметр	Обозначение	Диапазон значений	Размерность
СКО имитируемых дальностей до НКА	$\sigma'_{\Delta T}$	0...10	м
СКО имитируемых доплеровских сдвигов частоты несущих колебаний	$\sigma'_{\Delta f_0}$	0...10	Гц
Период обновления частотно-временных параметров	$T_H$	0...10	с
Разрядность цифрового передискретизатора	$b_c$	48... и более	бит
Частота опорного гетеродина	$f_G$	100... и более	МГц
Относительная нестабильность опорного гетеродина	$\delta_{f_G}$	0...10 <sup>-7</sup>	-

Проведенные проверки эффективности указанного имитатора подтвердили справедливость приведенных выше теоретических расчетов. На рис. 5.6в приведен результат обработки легитимных навигационных сигналов стандартным навигационным приемником Ublox-M8T, а на рис. 5.6г – результат обработки аналогичных сигналов имитатора. В обоих случаях можно наблюдать сходимость навигационного решения и отсутствие оповещения со стороны интерфейса приемника о том, что нарушение имеется. Работая по сигналам имитатора, навигационный приемник подтвердил высокую точность установки координат (СКО не выше 10 м, как и требовалось для корректного проведения эксперимента). При этом сами вычисленные значения координат сигналам НКА и сигналам ИГНС значительно отличаются.

### 5.5. Результаты полунатурного моделирования

При проведении полунатурного моделирования  $L$  сигналов ИГНС излучаются имитатором навигационных сигналов GPS диапазона L1 (1575.42 МГц). Экспериментальный макет аппаратуры КЦНП включает в себя устройство многоканальной цифровой записи сигналов, приемную 6-элементную АР, а также стандартный навигационный приемник (Ublox-M8T), для контроля наличия радионавигационных сиг-

налов. Устройство многоканальной цифровой записи сигналов производит прием процессов с элементов АР через многоканальный радиочастотный (РЧ) приемный тракт и осуществляет оцифровку соответствующих процессов  $x_m(t)$  с помощью блока аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Полученные таким образом отсчетные значения комплексных огибающих  $F_{xm}(t)$  процессов  $x_m(t)$ , оцифрованных с частотой дискретизации 2.046 МГц, сохраняются в форме .dat-файла.

При проведении полунатурного моделирования сигналы ИГНС формировались имитатором навигационных сигналов с уровнем мощности, существенно превышающим уровень радионавигационных сигналов НКА (отношение помеха/сигнал  $\gamma \approx 6$  дБ). Прием и запись сигналов проводились в реальной обстановке при наличии деревьев, городских построек, движущихся объектов и т.п. Наблюдаемая в процессе проводимого эксперимента группировка НКА изображена на рис. 5.6а. Одновременно с проведением записи сигналов с элементов АР производился контроль показаний стандартного навигационного приемника, подключенного к одному из элементов АР. Пример результата обработки легитимных навигационных сигналов НКА группировки ГНСС в интерфейсе стандартного навигационного приемника Ublox-M8T в условиях отсутствия нарушения целостности НП приведен на рис. 5.6б. Каждый изображенный на рис. 5.6б столбик соответствует обнаруженному радионавигационному сигналу, номер которого (номер НКА) расположен внизу, а высота столбика пропорциональна величине отношения  $C_0/N_0$  мощности  $C_0$  несущей рассматриваемого радионавигационного сигнала к удвоенной спектральной плотности мощности АБГШ. Пример индикации результата обработки радионавигационных сигналов тем же навигационным приемником при воздействии ИГНС изображен на рис. 5.6в. Очевидно отсутствие каких-либо идентифицирующих признаков того, что во втором случае измерения координат произведены по сигналам ИГНС со значительными ошибками. При этом в случае наличия сигналов ИГНС измеренные значения координат НО значительно (около 1600 м) отличаются от координат, измеренных в случае отсутствия воздействия ИГНС.

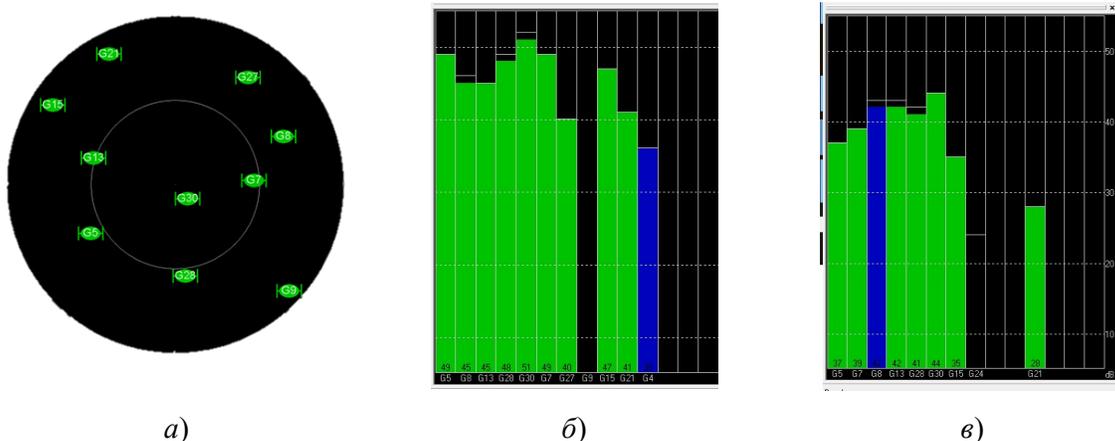


Рис. 5.6. Вид наблюдаемого созвездия НКА (а), графическое представление обнаруженных радионавигационных сигналов при отсутствии сигналов ИГНС (б) и при их наличии (в) на индикаторе приемника Ublox-M8T

При проведении полунатурного моделирования использовалась Matlab модель алгоритма (2.1), причем в качестве анализируемых процессов на вход модели поступали записи реальных сигналов с элементов АР. Полученные характеристики ( $P_{ЛТ}$  и  $P_{ПН}$ ) алгоритма (2.1) сравнивались с аналогичными характеристиками, получаемыми в процессе «обычного» моделирования при идентичных условиях, когда  $C_0/N_0 = 40...50 \text{ дБ} \cdot \text{Гц}$ ,  $\gamma = 6 \text{ дБ}$ . При измерении вероятности  $P_{ПН}$  зафиксировано сильное влияние конструкции АР на степень близости характеристик, получаемых двумя рассматриваемыми видами моделирования. Так обнаружено малое отличие значений  $P_{ПН}$ , получаемых в процессе «обычного» и полунатурного моделирования при малом числе элементов АР ( $M = 3$  на рис. 5.7), в то время как при большем их числе ( $M = 4$  на рис. 5.8) это отличие увеличивалось, так что при  $M = 5$  (рис. 5.9) отличие между характеристиками  $P_{ПН}$ , получаемыми двумя различными способами моделирования оказалось более нескольких порядков.

Можно предположить, что причиной выявленных отличий между вероятностными характеристиками, получаемыми обоими указанными видами моделирования, является возможная неидентичность каналов радиоприемного тракта, используемого при проведении записи сигналов от соответствующих элементов АР. Представляет интерес проверить данное предположение.

## 5.6. Влияние неидентичности каналов радиоприемного тракта на эффективность системы КЦНП

Как показали результаты дополнительных исследований в соответствии с [32], в проведенном полунатурном моделировании был использован многоканальный приемник с существенным отличием передаточных характеристик между каналами, так что разности фаз  $\Delta\varphi_m$  между каналами достигали  $2\pi$  рад и более (Таблица 5.2).

Таблица 5.2. Измерение неизвестных  $\Delta\varphi_m$  фазовых отстроек между каналами АР

	Канал 1	Канал 2	Канал 3	Канал 4	Канал 5	Канал 6
$\Delta\varphi_m$ , рад	0	1.699130	-1.650571	0.985480	-1.128182	-0.255712

Компенсируя фазовые отстройки (в соответствии с таблицей 5.2) при проведении полунатурного моделирования можно добиться улучшения характеристик алгоритма КЦНП и их приближения к соответствующим характеристикам, получаемым путем «обычного» моделирования (рис. 5.7, 5.8 и 5.9). Особенно существенное улучшение вероятностных характеристик после применения компенсации наблюдается при  $M > 3$ , так что при  $M = 5$  улучшение достигает 3-х и более порядков. Таким образом, можно убедиться в справедливости предположения о том, что основной причиной отличия результатов полунатурного моделирования от «обычного» является неидентичность каналов приемника.

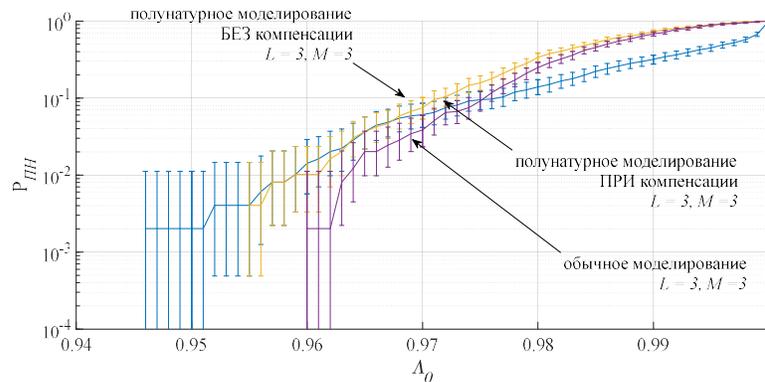


Рис. 5.7. Вероятность пропуска нарушения при  $M = 3, L = 3, C_0/N_0 = 45...50\text{дБ}\cdot\text{Гц}$  и  $\gamma = 6\text{ дБ}$

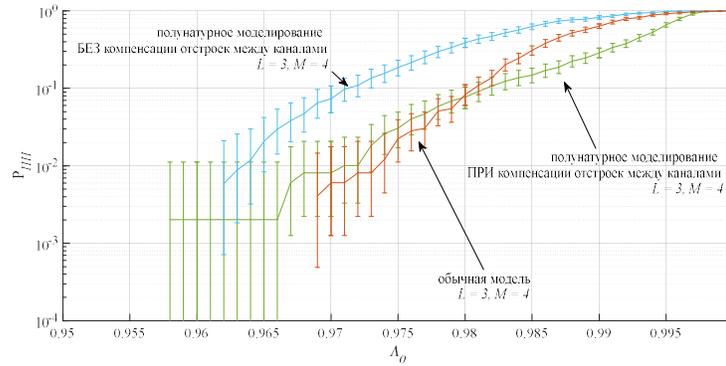


Рис. 5.8. Вероятность пропуска нарушения при  $M = 4, L = 3, C_0/N_0 = 45...50\text{дБ}\cdot\text{Гц}$  и  $\gamma = 6\text{ дБ}$

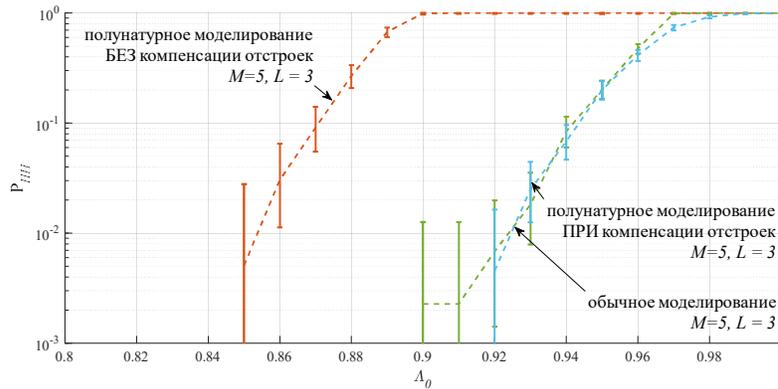


Рис. 5.9. Вероятность пропуска нарушения при  $M = 5, L = 3, C_0/N_0 = 45...50\text{дБ}\cdot\text{Гц}$  и  $\gamma = 6\text{ дБ}$

## Результаты и их обсуждение

Проведенный сравнительный анализ вероятностных характеристик алгоритмов принятия решения при использовании эквидистантных двумерных АР с малым (3...16) числом элементов и анализе реальных группировок НКА показал, что алгоритмы прямого анализа обладают существенным преимуществом по сравнению с алгоритмами постобработки. Так в рабочем диапазоне отношений помеха сигнал достижение типичных значений вероятностей  $P_{\text{лт}} = 10^{-3}$  и  $P_{\text{пн}} = 10^{-5}$  для прямого оптимального алгоритма возможно при использовании 3-х антенных элементов. В свою очередь при использовании оптимального алгоритма постобработки удастся достичь аналогичных вероятностных характеристик только при увеличении числа антенных элементов до 16 шт, в то время как подоптимальные алгоритмы постобра-

ботки вообще не позволяют обеспечить требуемых значений вероятностей в рассмотренном диапазоне числа антенных элементов (3...16).

Одновременное сравнение вычислительной сложности и вероятностных характеристик для «прямых» алгоритмов показало целесообразность практического применения алгоритма *B4*, поскольку именно он обеспечивает одновременный минимум, как по вероятности  $P_{\text{ин}}$ , так и по количеству вычислительных затрат.

Результаты теоретических и практических исследований показали, что устройство имитации навигационных сигналов может быть использовано для полунатурного или натурального моделирования процесса воздействия ИГНС на навигационную аппаратуру потребителя. При этом для обеспечения высокой достоверности результатов, получаемых в процессе такого моделирования, важное значение имеет то, с какой точностью будет производиться формирование навигационных сигналов. Так, например, проведенное имитационное моделирование показало, что низкая точность формирования параметров сигналов может привести к неверному измерению эффективности системы КЦНП в процессе полунатурного эксперимента. Для точного измерения значений  $P_{\text{ин}}$  и  $P_{\text{лт}}$  находящихся в диапазоне  $10^{-3}...10^{-5}$ , когда погрешность измерения ВХ алгоритмов КЦНП не превышает порядка доверительного интервала, установка дальностей до НКА должна производиться с погрешностью не хуже 10 м, а установка доплеровских сдвигов частоты несущих колебаний с точностью не хуже 10 Гц (что соответствует точности установки скорости порядка 2 м/с).

В свою очередь точность указанных выше параметров сигналов напрямую зависит от технических параметров используемого имитатора. В связи с этим в работе выведены аналитические формулы, связывающие данные параметры между собой, а также построены соответствующие графические зависимости. Показано, что для обеспечения требуемой точности полунатурного моделирования может быть использован имитатор сигналов с набором параметров, приведенным в таблице 5.1.

Использование такого имитатора при проведении полунатурного моделирования позволило определить условия применимости результатов «обычного» моделирования, а также условия, когда результаты обычного моделирования сильно отличаются от того, что можно ожидать в реальных условиях работы аппаратуры КЦНП.

Так «обычное» моделирование для идеализированных условий (прямолинейное распространение сигналов НКА, отсутствие эффекта многолучевого распространения, идентичность каналов радиоприемного тракта и т.п.) в случае использования простейших АР (2 - 3 элемента) позволяет достаточно точно оценить эффективность рассмотренного алгоритма КЦНП в реальных условиях приема даже при наличии существенной неидентичности каналов радиоприемного тракта. С другой стороны, при использовании АР с более сложной архитектурой (4 и более элементов) результаты «обычного» моделирования адекватно отражают эффективность алгоритма КЦНП, реализованного лишь на основе радиоприемного тракта с компенсацией фазовых отстроек между каналами.

Рассмотренный метод полунатурного моделирования, очевидно, позволяет производить оценку эффективности алгоритма КЦНП при различных геометрических характеристиках группировки ГНСС и при различных условиях приема сигналов НКА и ИГНС.

---

### Заключение

- Синтезированный в процессе работы прямой оптимальный (в соответствии с обобщенным критерием отношения правдоподобия) алгоритм КЦНП показал на порядок меньшее значение вероятности  $P_{\text{пн}}$  пропуска нарушения по сравнению с ранее известными эвристическими пеленгационными алгоритмами КЦНП. В то же время вычислительная сложность такого оптимального алгоритма оказывается достаточно высокой в связи с необходимостью проведения процедур численной максимизации по большому (не менее 6-ти) количеству неизвестных параметров функций правдоподобия.
- Среди различных мер, направленных на сокращение вычислительных затрат применительно к синтезированному прямому оптимальному алгоритму, наименьшую вычислительную сложность при незначительном повышении (не более, чем в несколько раз) вероятности  $P_{\text{пн}}$  пропуска нарушения обеспечива-

ет переход к подоптимальной форме, полученной при условии значительного отличия истинных координат НО и ошибочных координат, обусловленных сигналами ИГНС (алгоритм *B4*).

- Любые из рассмотренных в работе алгоритмов КЦНП с постобработкой пеленгационных параметров сигналов НКА (как оптимальные, так и эвристические) значительно проигрывают прямым алгоритмам КЦНП. Так, наблюдаемый в процессе имитационного моделирования проигрыш достигает нескольких порядков и более в вероятности  $P_{\text{ПН}}$ .
- Проведенное полунатурное моделирование с использованием реальных записей сигналов НКА и ИГНС с элементов АР подтвердило высокую эффективность синтезированного подоптимального алгоритма *B4*, выявленную на этапе полностью компьютерного моделирования. Так, при значении отношения уровня сигналов ИГНС к уровню сигналов НКА около  $\gamma \approx 3\text{дБ}$  вероятность  $P_{\text{ПН}} \approx 10^{-5} \dots 10^{-3}$  при  $P_{\text{ЛТ}} \approx 10^{-5}$  может быть обеспечена при использовании минимального числа элементов АР (два-три), когда число используемых для принятия решения радиосигналов не менее 4-х, что в свою очередь является минимальным требуемым числом видимых НКА для любой современной ГНСС.
- Показано, что для полунатурного исследования характеристик системы КЦНП в диапазоне  $P_{\text{ПН}} \approx 10^{-5} \dots 10^{-3}$  и  $P_{\text{ЛТ}} \approx 10^{-5}$  используемый имитатор группы навигационных сигналов должен обеспечивать точность имитации координатных точек порядка 1 м.
- В результате полунатурного моделирования показано, что при реализации алгоритма КЦНП с применением радиоприемной аппаратуры с малым числом элементов АР (два-три) требование точного знания передаточных характеристик приемных каналов не является существенным, в то время как при большем их числе важно обеспечивать процедуру калибровки АР.

## Список работ, опубликованных по теме исследования

### Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК

1. Рачицкая А.П., Полунатурное моделирование алгоритма контроля целостности навигационного поля ГНСС // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. (принято к опубликованию)
2. Мелихова А. П.<sup>[D1]</sup>\*, Цикин И. А. Алгоритмы принятия решения при пеленгационном методе контроля целостности навигационного поля. //Радиотехника. – Москва, 2018. – №. 1. – С. 63-75.
3. Мелихова А.П.\* , Цикин И.А. Оптимизация алгоритма принятия решения для пеленгационного метода контроля целостности навигационного поля с учетом реальных конфигураций созвездий ГНСС // Радиотехника. – Москва, 2016. – № 12. – С. 134–143
4. Мелихова А.П.\* , Цикин И.А. Эффективность пеленгационного метода контроля целостности навигационного поля при многократных наблюдениях // Радиотехника. – Москва, 2015 – №9. – С. 69-77
5. Мелихова А.П.\* , Цикин И.А. Пеленгационный метод контроля целостности поля глобальных навигационных спутниковых систем// Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. Выпуск 1(212)/2015. С. 29 -38.
6. Давыденко А.С., Мелихова А.П.\* Повышение достоверности определения координат по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем путем пространственно-временной обработки сигналов// Успехи современной радиоэлектроники, Выпуск 7, 2015, С 63-67

### Статьи в сборниках материалов международных конференций, входящих в перечень Scopus

1. Rachitskaya A. P., Oshuev A. M. Estimation of the GNSS signal time-of-arrival in the presence of a Gaussian interference located in space //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Т. 1326. – №. 1. – С. 012047
2. Rachitskaya A. P., Tsikin I. A. GNSS Integrity Monitoring in Case of a Priori Uncertainty About User's Coordinates //2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EEXPolytech). – IEEE, 2018. – С. 83-87
3. Melikhova A. P. \*\*, Tsikin I. A. Optimum Array Processing with Unknown Attitude Parameters for GNSS Anti-Spoofing Integrity Monitoring //2018 41st International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP). – IEEE, 2018. – С. 1-4
4. A. P. Melikhova \*\* and I. A. Tsikin, Decision-Making Algorithms Based on Generalized Likelihood Ratio Test for Angle-of-Arrival GNSS Integrity Monitoring. // 2018 25th anniversary Saint Petersburg international conference on integrated navigation systems proceedings. – IEEE, 2018. – С. 204-207
5. I. A. Tsikin, A. P. Melikhova \*\*. Direct Signal Processing for GNSS Integrity Monitoring // Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems – Springer, 2017 – С. 635-643
6. I. Tsikin, A. Melikhova \*\*. Angle-of-Arrival GPS Integrity Monitoring Insensitive to Satellite Constellation Geometry. // Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. – Springer, 2016. – Т. 9870 – С. 584-592

7. A. Melikhova \* \*, I. Tsikin Antenna Array With a Small Number of Elements for Angle-of-Arriving GNSS Integrity Monitoring // Telecommunications and Signal Processing (TSP), 2016 39th International Conference on on Telecommunications and Signal Processing (TSP). – IEEE, 2016. – С. 190-193
8. Tsikin I.A., Melikhova A.P. \* \* 'Optimization of Angle-of-Arrival GPS Integrity Monitoring'// Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems Volume 9247 of the series Lecture Notes in Computer Science, 2015, pp 722-728

### Публикации в других изданиях

1. Попов Е. Н., Рачицкая А. П., Давыденко А. С. Исследование влияния характеристик аналогового тракта приемника ГНСС на эффективность работы адаптивного алгоритма пространственной фильтрации помех // Цифровая обработка сигналов и её применение–DSPA-2019. – 2019. – С. 437-442
2. Попов Е.Н., Рачицкая А.П., Исследование влияния характеристик аналогового тракта на работу адаптивного компенсатора помех ГНСС // Неделя науки СПбПУ материалы научной конференции с международным участием. Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций. – СПб, 2018. – С. 31-34
3. Ошуев А.М., Рачицкая А.П., Исследование адаптивных алгоритмов пространственной фильтрации помех для глобальных навигационных спутниковых систем // Неделя науки СПбПУ материалы научной конференции с международным участием. Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций. – СПб, 2018. – С. 25-28
4. Мелихова А.П. \* \*, Цикин И.А. Оптимальная обработка сигналов антенной решетки при реализации процедуры контроля целостности навигационного поля. // 20-я международная конференция "Цифровая обработка сигналов и ее применение". Доклады. 2018. – СПб, 2018. – С. 492-496
5. Мелихова А.П. \* \*, Ошуев А.М., Исследование эффективности использования сигналов GPS L5 для позиционирования объектов // Неделя науки СПбПУ материалы научной конференции с международным участием. Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций. – СПб, 2017. – С. 42-45
6. Климов А.А., Мелихова А.П. \* \* Оптимизация алгоритма контроля целостности навигационного поля с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра "Политехнический" // Неделя науки СПбПУ Материалы научной конференции с международным участием. Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций. – СПб, 2016. – С. 40-42
7. Мелихова А.П. \* \*, Толубаев М.Н. Позиционирование пользователей на основе использования имитаторов навигационных сигналов // Неделя науки СПбПУ Материалы научной конференции с международным участием. Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций. – СПб, 2016. – С. 71-73
8. Мелихова А.П. \* \*, Цикин И.А. Пространственно-временная обработка сигналов в задаче контроля целостности поля глобальных спутниковых навигационных систем // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. – Москва, 2016. – Т. 6. – № 3. – С. 506-509
9. Мелихова А.П. \* \*, Цикин И.А. Обнаружение внутрисистемных нарушений целостности навигационного поля пеленгационным методом контроля // Неделя науки СПбПУ материалы научного форума с международным участием. Лучшие доклады. Ответственные редакторы: В.Э. Гасумянц, Д.Д. Каров. – СПб, 2016. – С. 146-149

10. Мелихова А.П. \*, Цикин И.А. Вероятностные характеристики пеленгационного метода контроля целостности поля глобальных навигационных спутниковых систем // Научный форум с международным участием "Неделя науки СПбПУ" Материалы научно-практической конференции. Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций СПбПУ. Ответственные редакторы - В.Э.Гасумянц, Д.Д.Каров. – СПб, 2015. – С. 39-42
11. Мелихова А.П. \*, Цикин И.А., Вероятностные характеристики пеленгационного метода контроля целостности поля глобальных навигационных спутниковых систем //XLIII Неделя науки СПбПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. Ч. IX. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014
12. Мелихова А.П. \*, Цикин И.А., Двухкоординатный пеленгатор для решения задачи контроля целостности навигационного поля систем ГЛОНАСС/GPS // Неделя науки СПбПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. Лучшие доклады. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2014, с. 109 – 113

\* «Мелихова» – предыдущая фамилия автора (Рачицкой А.П.)

\*\* «Melikhova» (англ.) — предыдущая фамилия автора (Рачицкой А.П.)

## Список литературы

1. Teunissen, P. Springer handbook of global navigation satellite systems. / P. Teunissen, O. Montenbruck. – Springer, 2017
2. Kaplan, E. Understanding GPS: principles and applications. / E. Kaplan, C.Hegarty. – Artech house, 2005
3. Tsui, J. B. Y. Fundamentals of global positioning system receivers: a software approach./ J. B. Y. Tsui – John Wiley & Sons, 2005. – Т. 173.
4. Niu, X. Quality evaluation of the pulse per second (PPS) signals from commercial GNSS receivers. / X. Niu, K. Yan, T. Zhang, Q. Zhang, H. Zhang, J. Liu. // GPS solutions. – 2015. – №19(1). – С. 141-150.
5. Карутин, С. Н. Синтез алгоритмов синхронизации на основе ретрансляции навигационных сигналов с наземной станции. / С. Н. Карутин, Д. В. Лернер, В. Н. Харисов. //Радиотехника. – 2016. – №. 9. – С. 88-96.
6. Giorgi, G. GNSS carrier phase-based attitude determination. / G. Giorgi, P. Teunissen. //Recent advances in aircraft technology. – InTech, 2012. – С. 193-220.
7. Cheng, J. A direct attitude determination approach based on GPS double-difference carrier phase measurements. / J. Cheng, J. Wang, L. Zhao. //Journal of Applied Mathematics. – 2014. – Т. 2014.
8. Daneshmand, S. Precise GNSS attitude determination based on antenna array processing./ S. Daneshmand, N. Sokhandan, G. Lachapelle. // In Proceedings of the 27th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2014), Tampa, FL, USA. – 2014. – Т. 812.
9. Венедиктов, В. Т. Прием и обработка сигналов спутниковых навигационных систем в задаче пространственного позиционирования. / В. Т. Венедиктов, И. А. Цикин, Е. А. Щербинина. //Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2013. – №. 2 (169). – С. 29-38.

10. Давыденко, А. С. Применение метода эталонной разности фаз для определения пространственной ориентации объекта./ А. С. Давыденко, С. Б. Макаров //Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2013. – №. 2 (169) – С.39-46.
11. ГОСТ Р 52865-2009 РФ. Глобальная навигационная спутниковая система. Параметры радионавигационного поля. Технические требования и методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2010.
12. Кульнев, В. Анализ направлений и состояния разработок функциональных дополнений к спутниковым радионавигационным системам. / В. Кульнев, С. Михайлов. //Беспроводные технологии. – 2006. – №. 4. – С. 61-69.
13. Савельев, И.В. Курс общей курс физики. Том II. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.:Наука, 1978.
14. Haslett, C. Essentials of radio wave propagation. / C. Haslett. –Cambridge University Press, 2008.
15. Van Trees, H. L. Optimum array processing: Part IV of detection, estimation, and modulation theory./ H. L. Van Trees – John Wiley & Sons, 2004.
16. Ioannides, R. T. Known vulnerabilities of global navigation satellite systems, status, and potential mitigation techniques./ R. T. Ioannides, T. Pany, G. Gibbons. // Proceedings of the IEEE. – 2016. – №104(6). – С. 1174-1194.
17. Jovanovic, A. Multi-test detection and protection algorithm against spoofing attacks on GNSS receivers./ A. Jovanovic, C. Botteron, P. A. Fariné. //Position, Location and Navigation Symposium-PLANS 2014, 2014 IEEE/ION. – IEEE, 2014. – С. 1258-1271.
18. Closas, C. Direct position estimation approach outperforms conventional two-steps positioning. / C. Closas, J.A. Fernandez-Prades, Fernandez-Rubioy. // 17th European Signal Processing Conference. – Aug, 2009. – С. 1958-1962.
19. Closas, P. Direct Position Estimation of GNSS Receivers: Analyzing main results, architectures, enhancements, and challenges. / P. Closas, A. Gusi-Amigo. //IEEE Signal Processing Magazine. – 2017. – Т. 34. – №. 5. – С. 72-84.
20. Closas, P. Maximum likelihood estimation of position in GNSS./ P. Closas, C. Fernández-Prades, J. A. Fernández-Rubio. //IEEE Signal Processing Letters. – 2007. – Т. 14. – №. 5. – С. 359-362.
21. Elkaim, G. H. Principles of guidance, navigation, and control of UAVs./ G. H. Elkaim, F. A. P. Lie, D. Gebre-Egziabher. //Handbook of Unmanned Aerial Vehicles. – Springer, Dordrecht, 2015. – С. 347-380.
22. Ochieng, W. Y. GPS integrity and potential impact on aviation safety. / W. Y. Ochieng, Knut Sauer. //The journal of navigation. – United Kingdom, 2003. – Т. 56. – №. 1. – С. 51-65.
23. Walter, T. Characterization of GNSS Clock and Ephemeris Errors to Support ARAIM./ T. Walter, J. Blanch. // In Proceedings of the ION 2015 Pacific PNT Meeting, Honolulu, Hawaii. – 2015. – С. 920-931.
24. Milner, C. Bayesian Inference of GNSS Failures./ C. Milner, C. Macabiau, P. Thevenon. // The Journal of Navigation. – 2016. – №69(2). – С. 277-294.
25. Heng, L. Statistical characterization of GLONASS broadcast ephemeris errors./ L. Heng, G. X. Gao, T. Walter, P. Enge. // In Proceedings of the 24th international technical meeting of the satellite division of the institute of navigation (ION GNSS 2011), Portland, OR. – 2011. – С. 3109-3117.
26. Closas, P. On the Mitigation of Ionospheric Scintillation in Advanced GNSS Receivers. / J. Vila-Valls, P. Closas, C. Fernandez-Prades, J.T. Curran. // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – IEEE,2018. – Т. 54(4). – С. 1692-1708
27. Ami Walter, T. Improved Ephemeris Monitoring for GNSS. / T. Walter, K. Gunning, J. Blanch. //Proceedings of the 2016 International Technical Meeting of The Institute of Navigation, Monterey, California. – 2016. – С. 600-608. (RINEX)
28. Ahn, J. Orbit Ephemeris Failure Detection in a GNSS Regional Application./ Ahn, J., Y. J. Lee, D. H. Won, H. S. Jun, C. Yeom, S. Sung, J. O. Lee. // International Journal of Aeronautical and Space Sciences. – 2015. – №16(1). – С. 89-101.

29. Иванов, В. Ф. Критерии эффективности оценки параметров ионосферы по сигналам спутниковых радионавигационных систем. / В. Ф. Иванов, Е. А. Ткачев, Б. В. Троицкий. //Труды Института прикладной астрономии РАН. – 2009. – №. 20. – С. 433-436
30. Walter, T. Improved Ephemeris Monitoring for GNSS. / T. Walter, K. Gunning, J. Blanch. // Proceedings of the 2016 International Technical Meeting of The Institute of Navigation, Monterey, California. – 2016. – С.600-608.
31. Amin, M. G. Vulnerabilities, threats, and authentication in satellite-based navigation systems./ M. G. Amin, P. Closas, A. Broumandan, J. L. Volakis. // Proceedings of the IEEE. – 2016. – №104(6). – С.1169-1173.
32. Van der Merwe J. R. Classification of Spoofing Attack Types. / J. Rossouw van der Merwe, Xabier Zubizarreta. // 2018 European Navigation Conference (ENC). – IEEE, 2018. – С. 91-99.
33. Bek, M. K. Classification and Mathematical Expression of Different Interference Signals on a GPS Receiver. / M. K. Bek, E. M. Shaheen, and S. A. Elgamel. // Navigation-Journal of the Institute of Navigation. – 2015. – vol. 62, no. 1. – С. 23-37.
34. Перов, А. И. Анализ внутрисистемных помех в спутниковых радионавигационных системах с кодовым разделением сигналов при использовании различных навигационных сигналов. / А. И. Перов // Радиотехника. – 2009. – №. 7. – С. 121-128.
35. Харисов, В. Н. Особенности испытаний аппаратуры обнаружения помех и мониторинга радионавигационного поля ГНСС в условиях сложной сигнально-помеховой обстановки. / В. Н. Харисов, А. А. Оганесян. //Метрология в радиоэлектронике. – 2014. – С. 50-58.
36. Bao, L. Spoofing mitigation in Global Positioning System based on C/A code self-coherence with array signal processing./ L. Bao, R. Wu, W. Wang, D. Lu. // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2017. – №62(1). – С. 66-73.
37. Broumandan, A. Overview of spatial processing approaches for GNSS structural interference detection and mitigation./ A. Broumandan, A. Jafarnia-Jahromi, S. Daneshmand, G. Lachapelle. // Proceedings of the IEEE. – IEEE, 2016. – №104(6). – С. 1246-1257
38. Stubberud, S. C. Threat assessment for GPS navigation./ S. C. Stubberud, K. A. Kramer. // In Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA) Proceedings, 2014 IEEE International Symposium on innovations in intelligent systems and applications. – IEEE, 2014. – С. 287-292.
39. Tippenhauer, N. O. On the requirements for successful GPS spoofing attacks./ N. O. Tippenhauer, C. Pöpper, K. B. Rasmussen, S. Capkun. // In Proceedings of the 18th ACM conference on Computer and communications security. – ACM, 2011. – С. 75-86
40. Steigenberger, P. Quality of reprocessed GPS satellite orbits./ P. Steigenberger, M. Rothacher, M. Fritsche, A. Rülke, R. Dietrich. // Journal of Geodesy. – 2009. – №83(3-4). – С. 241-248.
41. Papadimitratos, P. Protection and fundamental vulnerability of GNSS./ P. Papadimitratos, A. Jovanovic. //Satellite and Space Communications, 2008. IWSSC 2008. IEEE International Workshop on satellite and space communications, Conference proceedings. – IEEE, 2008. – С. 167-171.
42. Papadimitratos, P. GNSS-based positioning: Attacks and countermeasures. /P. Papadimitratos, A. Jovanovic. //Military Communications Conference, 2008. MILCOM 2008. IEEE. – IEEE, 2008. – С. 1-7.
43. Cuntz, M. Jamming and Spoofing in GPS/GNSS Based Applications and Services. / M. Cuntz, A. Konovaltsev, A. Dreher, M. Meurer. // Threats and Countermeasures. In Future Security. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2012. – С. 196-199).
44. Ni, S. Detection and elimination method for deception jamming based on an antenna array. / S. Ni, J. Cui, N. Cheng, Y. Liao. // International Journal of Distributed Sensor Networks. – 2018. – №14(5).
45. Ипатов, В. П. Алгоритмическое исключение многолучевой погрешности из радионавигационных измерений. / В. П. Ипатов, А. А. Соколов, М. П. Сошин. //Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2010. – №. 6. – С. 42-50.
46. Mikhailov, N. V. Extralong coherent accumulation for multipath mitigation in GNSS receiver. / N. V. Mikhailov, S. S. Pospelov, M. V. Vasil'ev, D. E. Yudakin, P. V. Glushkov. // Gyroscopy and Navigation. – 2012. – № 3(2). – С. 114-119.

47. Болошин, С. Б. Влияние многолучевости на потенциальную точность оценки запаздывания ФМ и MSK сигналов. / С. Б. Болошин, В. П. Ипатов, Б. В. Шебшаевич. //Новости навигации. – 2011. – №. 2. – С. 21-28.
48. Варакин, Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.
49. Казаринов, Ю. М. Радиотехнические системы./ Ю. П. Гришин, В. П. Ипатов, Ю. М. Казаринов, Ю. Д. Коломенский. // М.: Высшая школа, 1990
50. Faria, L. D. A. GPS Jamming Signals Propagation in Free-Space, Urban and Suburban Environments./ L. D. A. Faria, C. A. Silvestre, M. A. F. Correia, N. A. Roso. // Journal of Aerospace Technology and Management. – 2018. – Т. 10.
51. Кошкаров, А. С. Двухэтапный алгоритм детектирования и режекции многочастотных помех в навигационной аппаратуре потребителей ГЛОНАСС. / А. С. Кошкаров, В. А. Добриков. //Information & Control Systems/Informazionno-Upravlyaushie Sistemy. – 2017. – Т. 87. – №. 2.
52. Ефименко, В. С. Характеристики приема сигналов ГНСС в условиях негауссовских помех. / В. С. Ефименко, В. Н. Харисов, Д. Н. Ворончихин. //Радиотехника. – 2015. – №. 12. – С. 95-100.
53. Харисов, В. Н. Потенциальные характеристики помехоустойчивости перспективных сигналов ГНСС. / В. Н. Харисов, А. А. Оганесян. //Радиотехника. – 2010. – №. 7. – С. 121-126.
54. Krishna, C. G. L. A review on cybersecurity vulnerabilities for unmanned aerial vehicles. / C. G. L. Krishna, R. R. Murphy. //Safety, Security and Rescue Robotics (SSRR), 2017 IEEE International Symposium on. – IEEE, 2017. – С. 194-199.
55. Перов, А. И. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. / А. И. Перов, В. Н. Харисов. – М.: Радиотехника, 2005.
56. Болошин, С. Б. Варианты дополнения пользовательского интерфейса СРНС ГЛОНАСС дальномерными сигналами с кодовым разделением./ С. Б. Болошин, Д. В. Гайворонский, В. П. Ипатов, И. М. Самойлов, Б. В. Шебшаевич. // Новости навигации. – 2009. – №3. – С. 9-16.
57. Яценков, В. С. Основы спутниковой навигации. / В. С. Яценков. – М.: Горячая линия-Телеком, 2005.–272с.
58. Ipatov, V. P. Spread spectrum and CDMA: principles and applications./ V. P. Ipatov – John Wiley & Sons, 2005.
59. Хабуляк, А. С. Сравнение кодовых последовательностей, применяемых в сверхширокополосных системах связи./ А. С. Хабуляк //Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2013. – Т. 13. – №. 4. – С. 140-143.
60. Borre, K. A software-defined GPS and Galileo receiver: a single-frequency approach. / K. Borre, D. M. Akos, N. Bertelsen, P. Rinder, S. H. Jensen: Springer Science & Business Media, 2007.
61. Бондаренко, В. Н. Перспективные способы модуляции в широкополосных радионавигационных системах. / В. Н. Бондаренко, А. Г. Клевлин, Р. Г. Галеев. // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2011. – №4. – С.17-24
62. Lohan, E. S. Feedforward delay estimators in adverse multipath propagation for Galileo and modernized GPS signals./ E. S. Lohan, A. Lakhzouri, M. Renfors. //EURASIP Journal on Applied Signal Processing. – 2006. – Т. 2006. – С. 157-157.
63. Вейцель, А. В. Новый класс меандровых шумоподобных радиосигналов для радионавигационных систем. / А. В. Вейцель. //Вестник Московского авиационного института. – 2009. – Т. 16. – №. 7. – С. 43-48.
64. Болошин, С. Б. Возможные направления совершенствования форматов сигналов ГНСС ГЛОНАСС./ С. Б. Болошин, А. Г. Геворкян, В. П. Ипатов, С. П. Ковита, Б. В. Шебшаевич. // Новости навигации. – 2009. – №1. С. 18-23.
65. Jain, R. C. Comparison of coded-BOC and uncoded BOC modulation for radionavigation./ R. C. Jain, R. Kaushik. //Signal Processing and Communication (ICSC), 2013 International Conference on. – IEEE, 2013. – С. 138-142.

66. Anantharamu, P. B. Sub-carrier shaping for BOC modulated GNSS signals./ P. B. Anantharamu, D. Borio, G. Lachapelle. //EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. – 2011. – Т. 2011. – №. 1. – С. 133.
67. Вознюк В. В., Помехоустойчивость систем радиосвязи с бинарными фазоманипулированными шумоподобными сигналами при воздействии ретранслированных компенсационных помех типа инверсии огибающей сигнала./ Куценко Е. В. //Журнал радиоэлектроники. – 2018. – №. 2. – С. 1-1.
68. Liu, Y. Impact Assessment of GNSS Spoofing Attacks on INS/GNSS Integrated Navigation System. / Y. Liu, S. Li, Q. Fu, Z. Liu. // Sensors. – 2018. – №18(5). – С. 1433.
69. Wang, F. GNSS Spoofing Detection and Mitigation Based on Maximum Likelihood Estimation. / F. Wang, H. Li, M. Lu. //Sensors. – 2017. – Т. 17. – №. 7. – С. 1532.
70. Sarkar, T. K. A survey of various propagation models for mobile communication. / T. K. Sarkar, Z. Ji, K. Kim, A. Medouri, M. Salazar-Palma. // IEEE Antennas and propagation Magazine. – 2003. – №45(3). – С. 51-82.
71. Singh, Y. Comparison of okumura, hata and cost-231 models on the basis of path loss and signal strength. / Y. Singh. //International journal of computer applications. – 2012. – Т. 59. – №. 11.
72. Харченко А. В. Алгоритм выбора порога при обработке шумоподобных сигналов с компенсацией скользящих по частоте гармонических помех на основе дискретного вейвлет-преобразования./ Харченко А. В., Яшков С. А. //Труды Военно-космической академии имени АФ Можайского. – 2019. – №. 666. – С. 102-109.
73. Ефименко, В. С. Исследование характеристик поляризационного антенного компенсатора помех для приемников СРНС./ В. С. Ефименко, В. Н. Харисов, С. Г. Быстраков, Е. С. Конаныхин. // Радиотехника. – 2007. – №7. – С. 102-108.
74. Лосев, А. И. Устройство для защиты аппаратуры потребителей ГНСС от узкополосных помех./ А. И. Лосев, А. В. Немов, Д. Ю. Тюфтяков, Д. А. Шубин. // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. – 2011. – №6. – С. 85-92.
75. Daneshmand, S. GNSS space-time interference mitigation and attitude determination in the presence of interference signals. / S. Daneshmand, A. J. Jahromi, A. Broumandan, G. Lachapelle. // Sensors. – 2015. – №15(6). – С. 12180-12204.
76. Ефименко, В. С. Характеристики оптимальной пространственно-временной оценки параметров сигналов. / В. С. Ефименко, В. Н. Харисов. //Радиотехника. – 2006. – №. 7. – С. 71-74.
77. Dabak, Ö. C. Interference suppression in a GPS receiver with 4 element array design and implementation of beamforming algorithms. / Dabak, Ö. C. //Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), 2016 IEEE/ION. – IEEE, 2016. – С. 645-652.
78. Perov, A. I. Synthesis of an algorithm of space-time processing received satellite navigation signal and spoofing jamming. / A. I. Perov, S. P. Ippolitov. //Журнал Сибирского федерального университета. Серия «Математика и физика». – 2017. – Т. 10. – №. 4. – С. 429-442.
79. Ефименко, В. С. Адаптивные формирователи лучей для повышения помехоустойчивости приемников СРНС. / В. С. Ефименко, В. Н. Харисов. //Радиотехника. – 2008. – №. 7. – С. 45-50.
80. Яскин, Ю. С. Характеристики подавления помех в первом образце помехоустойчивой аппаратуры потребителей СРНС ГЛОНАСС/GPS с адаптивной антенной решеткой. / Ю. С. Яскин, В. Н. Харисов, В. С. Ефименко, С. Н. Бойко, С. Г. Быстраков, А. В. Пастухов, С. А. Савельев. // Радиотехника. – №. 7. – С. 127-136.
81. Харисов, В. Н. Оценка характеристик подавления помех приемникам ГНСС с антенными решетками в реальных условиях. / В. Н. Харисов, В. С. Ефименко, А. А. Оганесян, А. В. Пастухов, В. С. Павлов, П. М. Головин, П. В. Медведев. // Радиотехника. – №. 7. – С. 132-136.
82. Быстраков, С. Г. Особенности испытаний антенных компенсаторов помех помехоустойчивой навигационной аппаратуры потребителей ГЛОНАСС/GPS. / С. Г. Быстраков, В. Н. Харисов. // Новости навигации. – 2010. №3. – С. 14-19.

83. Ефименко, В. С. Оптимальные алгоритмы пространственно-временной обработки сигналов и их характеристики. / В. С. Ефименко, В. Н. Харисов, В. С. Павлов. //Радиотехника. – 2016. – №. 9. – С. 113-120.
84. Харисов, В. Н. Пространственно-временной алгоритм обработки сигнала в условиях многолучевого распространения для приемников с антенной решеткой. / В. Н. Харисов, А. В. Пельтин. //Радиотехника. – 2017. – №. 11. – С. 32-38.
85. Слюсар, В. И. Smart-антенны пошли в серию./ В. И. Слюсар. //Электроника: НТБ. – 2004. – №. 2. – С. 62-65.
86. Коновалов, Д. Ю. О построении адаптивного алгоритма компенсации активных помех в радиолокационных станциях с фазированной антенной решеткой. / Д. Ю. Коновалов, Д. В. Михеев, В. А. Шаталова //Труды Военно-космической академии им. АФ Можайского. – 2015. – №. 648. – С. 72-77.
87. Ефименко, В. С. Реализация алгоритмов пространственно-временной обработки./ В. С. Ефименко, А. В. Пастухов, Д. Н. Ворончихин. //Радионавигационные технологии. – 2015. – С. 27-32.
88. Перов, А. И. Статистическая теория радиотехнических систем./ А. И. Перов. – Радиотехника, 2003.
89. Awan, A. A. Performance comparisons of fixed and adaptive beamforming techniques for 4G smart antennas./ A. A. Awan, S. Khattak, A. N. Malik. // International Conference on communication, computing and digital systems (C-CODE). – IEEE, 2017. – С. 17-20.
90. Тихонов, В. И. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем./ В. И. Тихонов, В. Н. Харисов. – Радио и связь, 2004.
91. Ефименко, В. С. Характеристики автокомпенсатора с оптимальным формированием весовых коэффициентов. / В. С. Ефименко, В. Н. Харисов, А. А. Котов. //Радиотехника. – 2009. – №. 8. – С. 18-23
92. Meng, D. Anti-jamming with adaptive arrays utilizing power inversion algorithm./ D. Meng, Z. Feng, M. Lu. //Tsinghua science and technology. – 2008. – Т. 13. – №. 6. – С. 796-799.
93. Павлов, В. С. Влияние неидентичности каналов адаптивных антенных решеток на характеристики приема сигналов ГНСС. / В. С. Павлов. //Радиотехника. – 2016. – №. 9. – С. 128-134.
94. Малогабаритные адаптивные антенные решетки серии «Комета» [Электронный ресурс] // URL: <http://www.vniir-progress.ru/production/malogabaritnye-adaptivnye-antennye-reshetki-chetyrexelementnye-serii-kometa> (дата обращения: 18.02.2021)
95. Wu, A. D. Autonomous flight in GPS-denied environments using monocular vision and inertial sensors./ A. D. Wu, E. N. Johnson, M. Kaess, F. Dellaert, G. Chowdhary. //Journal of Aerospace Information Systems. – 2013. – Т. 10. – №. 4. – С. 172-186.
96. Grewal, M. S. Global positioning systems, inertial navigation, and integration./ M. S. Grewal, L. R. Weill, A. P. Andrews. – John Wiley & Sons, 2007.
97. Sokolović, V. INS/GPS navigation system based on MEMS technologies./ V. Sokolović, G. Dikic, G. Markovic, R. Stancic, N. Lukic.// Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering. – 2015. – №61(7-8). – С. 448-458.
98. Rabbou, M. A. Integration of GPS precise point positioning and MEMS-based INS using unscented particle filter./ M. A. Rabbou, A. El-Rabbany //Sensors. – 2015. – Т. 15. – №. 4. – С. 7228-7245.
99. Соболев, С. П. Контроль целостности в бортовом комплексе спутниковой системы посадки. // С. П. Соболев. //Радиоэлектроника. – 2007. – С. 62-70.
100. Никитин, А. В. Об измерении пеленгов генераторов помех при мониторинге навигационного поля ГЛОНАСС. / А. В. Никитин, А. В. Немов. //Радионавигационные технологии. – 2015. – С. 130-137.
101. Langley R. B. The integrity of GPS./ Langley R. B. //GPS World. – 1999. – Т. 10. – №. 3. – С. 60-63.
102. Шишкин, И. Ф. Теоретическая метрология. Часть 2 Обеспечение единства измерений. Учебник для вузов. 4-е изд. / И. Ф. Шишкин. – Издательский дом "Питер", 2011.

103. Zhang, Z. GNSS spoofing network monitoring based on differential pseudorange./ Z. Zhang, X. Zhan. //Sensors. – 2016. – Т. 16. – №. 10. – С. 1771.
104. Ochin, E. Detection of Spoofing using Differential GNSS./ E. Ochin. //Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie. – 2017.
105. Khanafseh, S. GPS spoofing detection using RAIM with INS coupling./ S. Khanafseh, N. Roshan, S. Langel, F. C. Chan, M. Joerger, B. Pervan. // In Proceedings of the Position, Location and Navigation Symposium—PLANS. – 2014. – Т. 2014.
106. Hewitson S. Extended receiver autonomous integrity monitoring (E-RAIM) for GNSS/INS integration./ Hewitson S., Wang J.// Journal of Surveying Engineering. – 2010. – Т. 136. – №. 1. – С. 13-22.
107. Montenbruck, O. GNSS satellite geometry and attitude models./ O. Montenbruck, R. Schmid, F. Mercier, P. Steigenberger, C. Noll, R. Fatkulin, A. S. Ganeshan. / Advances in Space Research. – 2015. – №56(6). – С. 1015-1029
108. Бродский, Е. Л. О реализации концепции построения дифференциальных подсистем ГНСС на ЕГС европейской части РФ. / Е. Л. Бродский, В. Д. Ракитин, А. А. Сикарев. // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. – 2006. – №. 5 (5).
109. Wesson, K. D. GNSS signal authentication via power and distortion monitoring./ K. D. Wesson, J. N. Gross, T. E. Humphreys, B. L. Evans. // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2018. – №54(2). – С. 739-754.
110. ŞAHİN, S. Optimal fusion of multiple GNSS signals against spoofing sources./ S. ŞAHİN, A. BABA, T. SÖNMEZ. //Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences. – 2017. – Т. 25. – №. 4. – С. 3289-3299.
111. Wang, F. GNSS spoofing countermeasure with a single rotating antenna./ F. Wang, H. Li, M. Lu. //IEEE Access. – 2017. – Т. 5. – С. 8039-8047.
112. Psiaki, M. L. GNSS spoofing and detection. / M. L. Psiaki, T. E. Humphreys //Proceedings of the IEEE. – 2016. – Т. 104. – №. 6. – С. 1258-1270.
113. Montgomery P. Y. Receiver-autonomous spoofing detection: Experimental results of a multi-antenna receiver defense against a portable civil GPS spoofer./ P. Y. Montgomery, T. E. Humphreys, B. M. Ledvina. //Proceedings of the 2009 International Technical Meeting of The Institute of Navigation. – 2009. – С. 124-130.
114. Grunert, U. Using of spirent GPS/Galileo HW simulator for timing receiver calibration./ U. Grunert, S. Thoelet, H. Denks, J. Furthner. // 2008 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium. – IEEE,2008. – С. 77-81.
115. Artaud, G. A new GNSS multi constellation simulator: NAVYS./ G. Artaud, A. de Latour, J. Dantepal, L. Ries, N. Maury, J. C. Denis, T. Bany. // Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing (NAVITEC). – IEEE, 2010. – С. 1-8.
116. Labsat-3 [Электронный ресурс] // URL: <https://www.labsat.co.uk/index.php/en/products/labsat-3> (дата обращения: 18.02.2021)
117. GNSS Simulator for the R&S®SMBV100A Vector Signal Generator [Электронный ресурс] // URL: [https://www.rohde-schwarz.com/ru/product/gnss-productstartpage\\_63493-11461.html](https://www.rohde-schwarz.com/ru/product/gnss-productstartpage_63493-11461.html) (дата обращения: 18.02.2021)
118. Abart, C. Simulating GNSS constellations-GPS, Galileo and SBAS. / C. Abart. //ELMAR, 2008. 50th International Symposium. – IEEE, 2008. – Т. 2. – С. 569-572.
119. Dolgansky, A. Software simulation of multiple global navigation satellite system measurements./ A. Dolgansky, A. Szeto, S. Bisnath. //Science and Technology for Humanity (TIC-STH), 2009 IEEE Toronto International Conference. – IEEE, 2009. – С. 322-327.
120. Fischer, J. Calibrated Precision GNSS Simulator for Timing Applications./ J. Fischer, L. A. Perdue. //Proceedings of the 45th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting, Washington. – 2013. – С. 107-111.
121. Хелстром К. Статистическая теория обнаружения сигналов. / К. Хелстром. – Издательство иностранной литературы. – 1963.

122. Tran, V. T. A programmable multi-GNSS baseband receiver./ V. T. Tran, N. C. Shivaramaiah, O Diessel, A. G. Dempster.// IEEE International Symposium on Circuits and Systems. – IEEE, 2015. – С. 1178-1181.
123. Luersen M. A. Globalized Nelder–Mead method for engineering optimization./ M. A. Luersen, R. Le Riche.//Computers & structures. – 2004. – Т. 82. – №. 23-26. – С. 2251-2260.
124. Liu M. Design of a high fidelity GLONASS signal simulator./ M. Liu, J. Li, J. Wang, S. Wu.// IEEE 10th international conference on signal processing proceedings. – IEEE, 2010. – С. 2373-2376.
125. Esswein, Michael C., Psiaki, Mark L., "GNSS Anti-Spoofing for a Multi-Element Antenna Array," Proceedings of the 32nd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2019), Miami, Florida, September 2019, pp. 3197-3214.
126. Rothmaier, F., Chen, Y.-H., Lo, S., & Walter, T. (2021). GNSS spoofing detection through spatial processing. NAVIGATION, 1–16

Аспирант \_\_\_\_\_ ФИО