

ISSN 3034-2201

# Вестник СПбГУТ

Том 2. № 2. 2024



Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций  
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» (СПбГУТ)

---

Научный журнал

# **Вестник СПбГУТ**

Том 2. № 2

**Herald of SPbSUT**

Vol. 2. Iss. 2

Санкт-Петербург

2024

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

### Editorial Board

#### Главный редактор *Editor-in-Chief*

**Владыко А.Г. (Санкт-Петербург)**  
*Vladyko A.G. (St. Petersburg)*

**Макаренко С.И. (Санкт-Петербург)**  
*Makarenko S.I. (St. Petersburg)*

**Гехт А.Б. (Санкт-Петербург)**  
*Gekht A.B. (St. Petersburg)*

**Дунайцев Р.А. (Санкт-Петербург)**  
*Dunaytsev R.A. (St. Petersburg)*

**Зикратов И.А. (Санкт-Петербург)**  
*Zikratov I.A. (St. Petersburg)*

**Калимуллина О.В. (Санкт-Петербург)**  
*Kalimullina O.V. (St. Petersburg)*

**Литвинов В.Л. (Санкт-Петербург)**  
*Litvinov V.L. (St. Petersburg)*

**Окунева Д.В. (Санкт-Петербург)**  
*Okuneva D.V. (St. Petersburg)*

**Симонина О.А. (Санкт-Петербург)**  
*Simonina O.A. (St. Petersburg)*

**Сотников А.Д. (Санкт-Петербург)**  
*Sotnikov A.D. (St. Petersburg)*

**Шутман Д.В. (Санкт-Петербург)**  
*Shutman D.V. (St. Petersburg)*

**Юрова В.А. (Санкт-Петербург)**  
*Yurova V.A. (St. Petersburg)*

## СОДЕРЖАНИЕ

- Идентификация нештатных ситуаций железнодорожного транспорта России на основе кластерного анализа данных*  
**Макеева В. В., Вивчарь Р. М., Березкин А. А.**
- Повышение эффективности трансфера технологий посредством учета уровней готовности технологий и зрелости интероперабельности взаимодействующих организаций*  
**Нестеров А. А.**
- Методика оценки альтиметров по критерию обобщенной эффективности*  
**Говако А. С., Погорелов А. А.**
- Разработка и апробация анализатора сигналов стандарта LTE средствами программно-конфигурируемого радио*  
**Цап В. В., Фокин Г. А.**
- Принципы построения связанного оборудования систем телемеханики с линейной топологией на базе составных кабельных линий связи*  
**Точиллов В. Н., Бойков М. С., Лукичев М. П., Ташчи Р. Л.**
- 1** *Identification of Railroad Transport Emergency Situations in Russia Based on Data Clustering Analysis*  
**Makeeva V., Vivchar R., Berezkin A. A.**
- 2** *Increasing the Efficiency of Technology Transfer by Taking into Account Technology Readiness Levels and Interoperability Maturity of Interacting Organizations*  
**Nesterov A.**
- 3** *Methodology for Measuring Altimeters according to the Criterion Generalized Effectiveness*  
**Govako A., Pogorelov A.**
- 4** *Development and Testing of LTE Signal Analyzer Using Software-Defined Radio*  
**Tsap V., Fokin G.**
- 5** *The Principles of Constructing a Communication Equipment with Line Topology on the Base of Composite Communication Lines*  
**Tochilov V., Boikov M., Tashchy R., Lukichev M.**

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций: Эл № ФС77-85553 от 28 июня 2023 г.

## КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Учредитель и издатель:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» (СПбГУТ)

**Адрес учредителя:** 191186, Санкт-Петербург, набережная реки Мойки, д. 61, литера А

**Адрес редакции:** 193232, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, 22/1, к. 334/2  
**Тел.:** +7 (812) 326-31-63, м. т. 2022, +79643759970

**E-mail:** [vestnik@sut.ru](mailto:vestnik@sut.ru)  
**Web:** <http://vestnik-sut.ru>

УДК 656.2:519.7

## Идентификация нештатных ситуаций железнодорожного транспорта России на основе кластерного анализа данных

Макеева В. В. ✉, Вивчарь Р. М., Березкин А. А.

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича  
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

**Постановка задачи:** идентификация нештатных ситуаций на железной дороге для обеспечения безопасности и оптимизации процессов включает в себя наблюдение за состоянием инфраструктуры, движением поездов, погодными условиями и другими факторами, способными привести к чрезвычайным ситуациям. **Целью работы** является разработка специализированного программного обеспечения с использованием кластерного анализа данных для выявления причин аварий на железнодорожном транспорте России, что критически важно из-за его значительного влияния на общественную безопасность и экономику страны, а также из-за потенциальных угроз, связанных с возможными чрезвычайными ситуациями, особенно при перевозке опасных грузов. **Используемые методы:** кластерный анализ для систематизации разнообразных видов аномалий, возникающих на железнодорожном транспорте, с учетом таких параметров, как источники возникновения проблем, географическое расположение и временные характеристики. Они позволят выявить ключевые группы ситуаций и лучше понять их природу, а также оценить эффективность предотвращения чрезвычайных ситуаций. **Результат:** с использованием метода кластерного анализа данных осуществляется выявление основных закономерностей, лежащих в основе непривычных обстоятельств в функционировании железнодорожного транспорта. Это позволяет прийти к существенным выводам, включая идентификацию различных категорий нештатных ситуаций, оптимизацию мер безопасности и повышение результативности железнодорожной системы. Элементами **новизны** представленного решения является применение кластерного анализа для выявления тенденций, закономерностей и потенциальных сценариев в данных, связанных с авариями на железной дороге. **Теоретическая/Практическая значимость** состоит в выработке рекомендаций по улучшению инфраструктуры, повышению мер безопасности и в конечном итоге повышению общей эффективности транспортной системы в долгосрочной перспективе.

**Ключевые слова:** нештатные ситуации, чрезвычайные ситуации, кластерный анализ, железнодорожный транспорт, оптимизация процессов, тенденции, мониторинг, безопасность, Data Mining (анализ данных), разработка программного обеспечения и рекомендаций

**Источник финансирования:** статья подготовлена в рамках прикладных научных исследований СПбГУТ, регистрационный номер 1023031600087-9 в ЕГИСУ НИОКТР.

### Актуальность исследования

В настоящее время железнодорожный транспорт является важной составляющей инфраструктуры России и играет ключевую роль в ее транспортной системе, перемещая как пассажиров, так и товары на огромные расстояния. Несмотря на различные факторы, такие как погодные условия, технические сбои, человеческие ошибки и другие непредвиденные обстоятельства, которые могут привести к возникновению нештатных ситуаций, железнодорожная отрасль стремится обеспечить безопасное и

### Библиографическая ссылка на статью:

Макеева В. В., Вивчарь Р. М., Березкин А. А. Идентификация нештатных ситуаций железнодорожного транспорта России на основе кластерного анализа данных // Вестник СПбГУТ. 2024. Т. 2. № 2. С. 1. EDN: KSEHFQ

### Reference for citation:

Makeeva V., Vivchar R., Berezkin A. Identification of Railroad Transport Emergency Situations in Russia Based on Data Clustering Analysis // Herald of SPbSUT. 2024. Vol. 2. Iss. 2. P. 1. EDN: KSEHFQ

бесперебойное движение поездов. Эти ситуации могут вызывать задержки, аварии, повреждения грузов и угрозу безопасности пассажиров и персонала. Идентификация и анализ нештатных ситуаций имеет решающее значение для обеспечения безопасности и эффективности железнодорожного транспорта. Одним из методов, который может быть использован для анализа данных и выявления скрытых закономерностей, является кластерный анализ.

Кластерный анализ — статистический метод сегментации данных, позволяющий классифицировать объекты по группам (кластерам) на основе их сходства. Эта процедура помогает систематизировать информацию в соответствии с ее характерными признаками и выявлять закономерности в данных.

В контексте анализа нештатных ситуаций на железнодорожном транспорте кластеризация позволяет группировать различные виды инцидентов на основе их общих характеристик, что помогает глубже понять причины и факторы, которые приводят к возникновению таких ситуаций.

Посредством анализа больших объемов данных, включая информацию о расписаниях поездов, технических характеристиках локомотивов, метеорологических условиях и других факторах, можно выявить структуру и взаимосвязи между различными формами нештатных ситуаций. Применение методов кластерного анализа также позволяет создать систему мониторинга, которая осуществляет постоянный анализ данных и предупреждает о потенциально опасных ситуациях заранее. Это позволяет снизить риск аварий и оптимизировать планирование ресурсов железнодорожного транспорта.

Таким образом, идентификация нештатных ситуаций на основе кластерного анализа представляет собой мощный инструмент для повышения безопасности, эффективности и надежности железнодорожного транспорта России. В работе мы рассмотрим примеры применения кластерного анализа для выявления нештатных ситуаций, их анализа и разработки мер по их предотвращению.

### **Оценка современной экологической ситуации на железнодорожном транспорте России и необходимость автоматизации анализа нештатных ситуаций**

Экологическая ситуация в мире находится в критическом положении из-за дестабилизации баланса взаимодействия с природой при отсутствии хорошо разработанных национальных стратегий экологической безопасности. В связи с этим с каждым годом все больше материальных и финансовых ресурсов вкладывается в ликвидацию природных и техногенных катастроф. Одной из наиболее тревожных проблем является перевозка опасных/токсичных материалов по железной дороге.

Железнодорожный транспорт играет важную роль в экологической системе России, обеспечивая половину всех перевозок в стране, включая опасные грузы [1]. С увеличением объемов грузоперевозок возрастает необходимость анализа информации о возможных чрезвычайных ситуациях.

Поскольку данные о нештатных ситуациях на железнодорожном транспорте зачастую неоднозначны и не структурированы, для их изучения и обработки целесообразно использовать методы интеллектуального анализа данных с учетом специфики исследуемого объекта. Таким образом, важность использования информационных технологий для исследования нештатных ситуаций на железной дороге состоит в возможности оперативного и эффективного управления подобными ситуациями, анализе возможных последствий и принятии обоснованных управленческих решений.

### **Способы и средства обнаружения нештатных ситуаций на железнодорожных магистралях**

На современных железнодорожных системах используются различные методы и технологии для обнаружения экстренных ситуаций, таких как аварии, сбои в работе оборудования и другие опасные сценарии. Благодаря прогрессу в области разработки технических решений уровень безопасности на железнодорожном транспорте значительно повышается.

Среди методов обработки больших объемов информации на железнодорожных системах можно выделить Data Mining (анализ данных) — процесс извлечения ценной информации из больших объемов данных для поиска скрытых закономерностей, трендов, аномалий и других полезных сведений [2]. В зависимости от постановки задачи все алгоритмы анализа данных разделяются на контролируемое обучение (обучение с учителем), предполагающее поэтапное построение моделей данных и обучение модели до достижения желаемых результатов, и неконтролируемое обучение (обучение без учителя), использующееся в случае отсутствия предварительных знаний о данных.

Основные задачи Data Mining — классификация, регрессия, поиск ассоциативных правил и кластеризация [3]. Рассмотрим их применение на примере анализа аварийных ситуаций на железной дороге.

Задача *классификации* [4] заключается в определении класса экстренной ситуации на основе ее характеристик; ее недостатками являются необходимость обширного обучающего набора данных и проблемы переобучения.

*Регрессия* позволяет определить значение параметра для известных характеристик экстренных ситуаций на железной дороге, который представляется набором вещественных чисел.

*Ассоциативный анализ*, или *поиск ассоциативных правил*, может помочь выявить комбинации факторов, таких как погодные условия, техническое состояние оборудования и наличие особенностей маршрута, которые могут увеличивать вероятность возникновения нештатных ситуаций.

*Кластеризация* [4] используется для группировки объектов на основе их сходства. В отличие от классификации при кластеризации не предполагается наличие заранее заданных меток для групп, и модель сама определяет структуру данных. Целью кластеризации является разделение набора данных на группы (кластеры), где объекты внутри одного кластера более похожи друг на друга, чем на объекты из других групп. Например, кластерный анализ может помочь выделить категории аварийных ситуаций, связанных с техническими дефектами, человеческим фактором или внешними воздействиями, что в дальнейшем может быть полезно для разработки специализированных мер по предотвращению подобных ситуаций.

Каждый из этих методов имеет свои преимущества и может применяться в различных сферах, включая идентификацию нештатных ситуаций на железнодорожном транспорте, где классификация может помочь в определении типа аварии, регрессия — в прогнозе ее параметров, поиск ассоциативных правил — в выявлении нестандартных ситуаций и аномалий (обнаруживая скрытые отношения в данных), а кластеризация — в группировке ситуаций с похожими особенностями для выявления закономерностей.

### Оценка результатов выявления нештатных ситуаций на железной дороге

Нештатные ситуации на железной дороге могут иметь серьезные последствия, такие как аварии, простои в движении поездов, ущерб для окружающей среды и, что самое важное, угроза для жизни и здоровья людей. Эффективное выявление и оценка нештатных ситуаций играют ключевую роль в обеспечении безопасности и надежности железнодорожного транспорта.

Процесс выявления чрезвычайных ситуаций включает в себя несколько этапов:

- 1) *мониторинг*: постоянное наблюдение за состоянием инфраструктуры, поездов, погодными условиями и другими факторами, которые могут привести к возникновению чрезвычайных ситуаций;
- 2) *обнаружение*: использование современных технологий, таких как сенсоры, видеонаблюдение, системы дистанционного мониторинга для выявления возможных проблемных ситуаций;
- 3) *оценка*: анализ полученных данных и оценка их потенциального воздействия на безопасность движения поездов и пассажиров.

Применение кластерного анализа для оценки результатов выявления нештатных ситуаций на железной дороге представлено ниже пошагово.

**Шаг 1.** Группировка аварийных ситуаций осуществляется для объединения различных видов аварий в зависимости от их уникальных характеристик (факторы возникновения, место событий, временные рамки и другие параметры); способствует выявлению ключевых групп аварийных ситуаций и более глубокому пониманию их природы.

**Шаг 2.** Оценка эффективности профилактики аварийных ситуаций предоставляет возможность оценить степень успешности предотвращения нештатных ситуаций в различных группах. Например, постоянное возникновение аварий в конкретном кластере с высоким уровнем риска может свидетельствовать о необходимости совершенствования механизмов предупреждения в данной категории событий.

**Шаг 3.** Идентификация тенденций и прогнозирование помогают выявить тенденции и паттерны в данных о нештатных ситуациях, что позволяет более точно прогнозировать возможные сценарии и разрабатывать меры предотвращения заранее.

Реализация специализированного программного обеспечения с использованием кластерного анализа данных для выявления причин аварий на железнодорожном транспорте России на языке программирования Python представлена на рисунке 1.

```
import pandas as pd
import numpy as np
import folium

from sklearn.cluster import KMeans
from sklearn.preprocessing import StandardScaler
from folium.plugins import MarkerCluster

# Загрузка данных о нештатных ситуациях
incident_data = {
    'incident_id': [1, 2, 3, 4, 5],
    'location': ['Москва', 'Санкт-Петербург', 'Екатеринбург', 'Новосибирск', 'Красноярск'],
    'description': ['Сход поезда с рельсов', 'Пожар на станции', 'Обрыв контактной сети', 'ДТП на пе-
реезде', 'Техническая неисправность поезда'],
    'date': ['2024-03-15', '2024-03-16', '2024-03-16', '2024-03-17', '2024-03-17']
}
df_incidents = pd.DataFrame(incident_data)

# Загрузка географических данных
geo_data = {
    'station_name': ['Москва', 'Санкт-Петербург', 'Новосибирск', 'Екатеринбург', 'Красноярск'],
    'latitude': [55.7558, 59.9343, 55.0084, 56.8389, 56.0106],
    'longitude': [37.6176, 30.3351, 82.9357, 60.6057, 92.8524],
    'railway_type': ['Высокоскоростная', 'Пассажирская', 'Грузовая', 'Смешанная', 'Пассажирская'],
    'track_condition': ['Хорошее', 'Удовлетворительное', 'Плохое', 'Хорошее', 'Удовлетворительное']
}
df_geo = pd.DataFrame(geo_data)

# Обработка данных (Объединение данных или добавление новых признаков)
df_combined = pd.merge(df_incidents, df_geo, left_on='location', right_on='station_name', how='left')
df_combined = df_combined.drop('station_name', axis=1)

# Вывод обработанных данных
print(df_combined)

# Выбираем признаки для кластеризации (широта и долгота)
features = df_combined[['latitude', 'longitude']]

# Нормализуем данные
scaler = StandardScaler()
features_scaled = scaler.fit_transform(features)

# Применяем алгоритм KMeans для кластеризации
kmeans = KMeans(n_clusters=3)

# Задаем количество кластеров
clusters = kmeans.fit_predict(features_scaled)

# Добавим информацию о кластерах в исходные данные
df_combined['cluster'] = clusters

# Вывод результата кластеризации
print(df_combined[['location', 'latitude', 'longitude', 'cluster']])

# Создаем карту с центрированием и начальным масштабом
map_clusters = folium.Map(location=[55.7558, 37.6176], zoom_start=5)

# Добавляем точки нештатных ситуаций на карту в каждый кластер
for cluster_num in df_combined['cluster'].unique():
    cluster_data = df_combined[df_combined['cluster'] == cluster_num]
    cluster_map = MarkerCluster().add_to(map_clusters)
    for idx, row in cluster_data.iterrows():
        folium.Marker([row['latitude'], row['longitude']], popup=f"Location: {row['location']}",
            icon=folium.Icon(color='red')).add_to(cluster_map)

# Сохраняем интерактивную карту в файл
map_clusters.save('cluster_map.html')

# Группируем данные по кластерам
cluster_groups = df_combined.groupby('cluster')

# Проходим по каждому кластеру для анализа характеристик
for cluster_num, cluster_data in cluster_groups:
    print(f"Cluster {cluster_num}:")
    print(cluster_data[['location', 'description', 'railway_type', 'track_condition']].describe())
    print("-----")
```

Рис. 1. Программа на языке Python для идентификации нештатных ситуаций на железнодорожном транспорте России, реализующая алгоритм кластерного анализа

## Повышение эффективности идентификации нештатных ситуаций на железнодорожном транспорте

Эффективная идентификация и управление нештатными ситуациями играют ключевую роль в обеспечении безопасности и надежности железнодорожного транспорта. В данном исследовании анализ эффективности идентификации нештатных ситуаций на железнодорожном транспорте представлен на основе числовых данных [5]. Анализируются такие показатели, как общее число и типы нештатных ситуаций, среднее время реакции на них, а также процент успешно разрешенных случаев.

Цель анализа — определение уровня готовности и эффективности системы идентификации нештатных ситуаций, а также выявление областей, требующих дополнительного внимания и улучшений. Анализ основан на данных, собранных за определенный период, и предоставляет ценную информацию для разработки стратегий по улучшению системы безопасности и более эффективному реагированию на потенциальные угрозы.

Общее количество и типы нештатных ситуаций, которые возникали на российском железнодорожном транспорте за 2023 год, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Число и типы нештатных ситуаций

Тип нештатной ситуации	Число случаев за год
Сход с рельсов	15
Пожар на станции	7
Отключение электропитания	10
Происшествия с пассажирами	5

*Примечания:*

- 1) сход с рельсов (15 случаев за год): важно обратить внимание на возможные причины сходов и принять меры по их предотвращению, так как это одна из наиболее серьезных и опасных ситуаций;
- 2) пожар на станции (7 случаев за год): необходимо провести анализ причин возникновения пожаров и улучшить системы пожарной безопасности на станциях;
- 3) отключение электропитания (10 случаев за год): может быть связано с техническими проблемами или внешними воздействиями; необходимо улучшить системы электроснабжения для предотвращения подобных ситуаций;
- 4) происшествия с пассажирами (5 случаев за год): требует дополнительного анализа для выявления причин и принятия мер по обеспечению безопасности пассажиров.

Эффективность идентификации нештатных ситуаций также зависит от скорости реакции на них. Данные о среднем времени реакции представлены в таблице 2.

Таблица 2. Среднее время реакции

Тип нештатной ситуации	Среднее время реакции (в минутах)
Сход с рельсов	20
Пожар на станции	15
Отключение электропитания	10
Происшествия с пассажирами	25

*Примечания:*

- 1) сход с рельсов (20 минут): необходимо сократить время реакции для быстрого восстановления движения поездов и минимизации последствий;
- 2) пожар на станции (15 минут): важно улучшить системы обнаружения и тушения пожаров для быстрой локализации и ликвидации возгораний;
- 3) отключение электропитания (10 минут): требуется оптимизация систем мониторинга и реагирования для быстрого восстановления электроснабжения;
- 4) происшествия с пассажирами (25 минут): необходимо улучшить процедуры эвакуации и медицинской помощи для быстрой реакции на происшествия с пассажирами.

Критическим показателем эффективности идентификации нештатных ситуаций является процент успешно решенных проблем. Данные за 2023 год представлены в таблице 3.

Идентификация нештатных ситуаций на железнодорожном транспорте также осуществляется с использованием современных технологий, таких как системы мониторинга и датчики. Данные о степени использования таких технологий представлены в таблице 4 и представляют собой ценную информацию для разработки стратегий улучшения системы предотвращения и реагирования на возможные угрозы на железнодорожном транспорте.



Таблица 3. Количество успешно решенных случаев

Тип нештатной ситуации	Количество успешно решенных проблем (в %)
Сход с рельсов	80
Пожар на станции	90
Отключение электропитания	85
Происшествия с пассажирами	75

**Примечания:**

- 1) сход с рельсов (80 % успешно решенных случаев): показатель успеха в решении данного типа нештатных ситуаций достаточно высок, однако требуется постоянное обновление и совершенствование процедур для его улучшения;
- 2) пожар на станции (90 % успешно решенных случаев): очень высокий процент успешно решенных случаев говорит об эффективности систем пожаротушения и организации оперативных мероприятий;
- 3) отключение электропитания (85 % успешно решенных случаев): высокий процент успешно решенных случаев свидетельствует о хорошей готовности и реагировании на подобные ситуации;
- 4) происшествия с пассажирами (75 % успешно решенных случаев): необходимо улучшить процедуры и обучение персонала для повышения эффективности реагирования на происшествия с пассажирами.

Таблица 4. Степень использования технологий

Технология	Степень использования (в %)
Системы видеонаблюдения	95
Датчики состояния путей	65
Автоматизированные системы управления	60

На основе проведенного анализа были выделены ключевые направления для повышения эффективности идентификации нештатных ситуаций. В частности, важно развивать системы машинного обучения и искусственного интеллекта для более точного и быстрого обнаружения аномалий на железнодорожных маршрутах. Также следует уделять внимание интеграции различных источников данных, включая информацию о погодных условиях, состоянии инфраструктуры и поведении пассажиров.

### Реализация методов кластеризации для анализа нештатных ситуаций на железнодорожном транспорте с использованием языка программирования Python

В данном разделе рассмотрим основанную на алгоритме *k-means* (*k*-средних) программу с использованием языка программирования Python и различных библиотек (см. рисунок 1), разработанную для анализа и предотвращения аварийных ситуаций на железнодорожных системах.

Программа начинает свою работу с загрузки данных о нештатных ситуациях и географических параметров. Затем данные объединяются на основе совпадения местоположения для последующего анализа. Далее выбираются показатели широты и долготы для кластеризации, данные нормализуются, и применяется алгоритм *k-means* для разделения точек по координатам на карте. Результаты кластеризации визуализируются на интерактивной карте для наглядного представления.

Принципы работы программы лежат в объединении и обработке данных, нормализации для корректной кластеризации, применении *k-means* для разделения точек на кластеры на основе географического расположения, а также визуализации результатов на карте. Результаты работы программы позволяют группировать точки ситуаций на карте, определять центры кластеров для выявления областей повышенного риска и помогают в принятии решений по улучшению безопасности транспорта.

Интерпретация выводов программы представляет собой карту с кластерами, указывающими на области, предрасположенные к нештатным ситуациям, и обеспечивает анализ характеристик кластеров для выявления особенностей каждой группы событий, что ценно для специалистов по безопасности. Образец карты с кластерами представлен на рисунке 2.

Алгоритм *k-means*, в свою очередь, обладает временной сложностью:

$$O = nkid,$$

где  $n, k, i, d$  — количество элементов в 1-м, 2-м, 3-м и 4-м наборах данных, соответственно. Это подразумевает высокую эффективность на малых и средних наборах данных, хотя в больших могут возникнуть проблемы с производительностью из-за итеративного обновления центров кластеров.

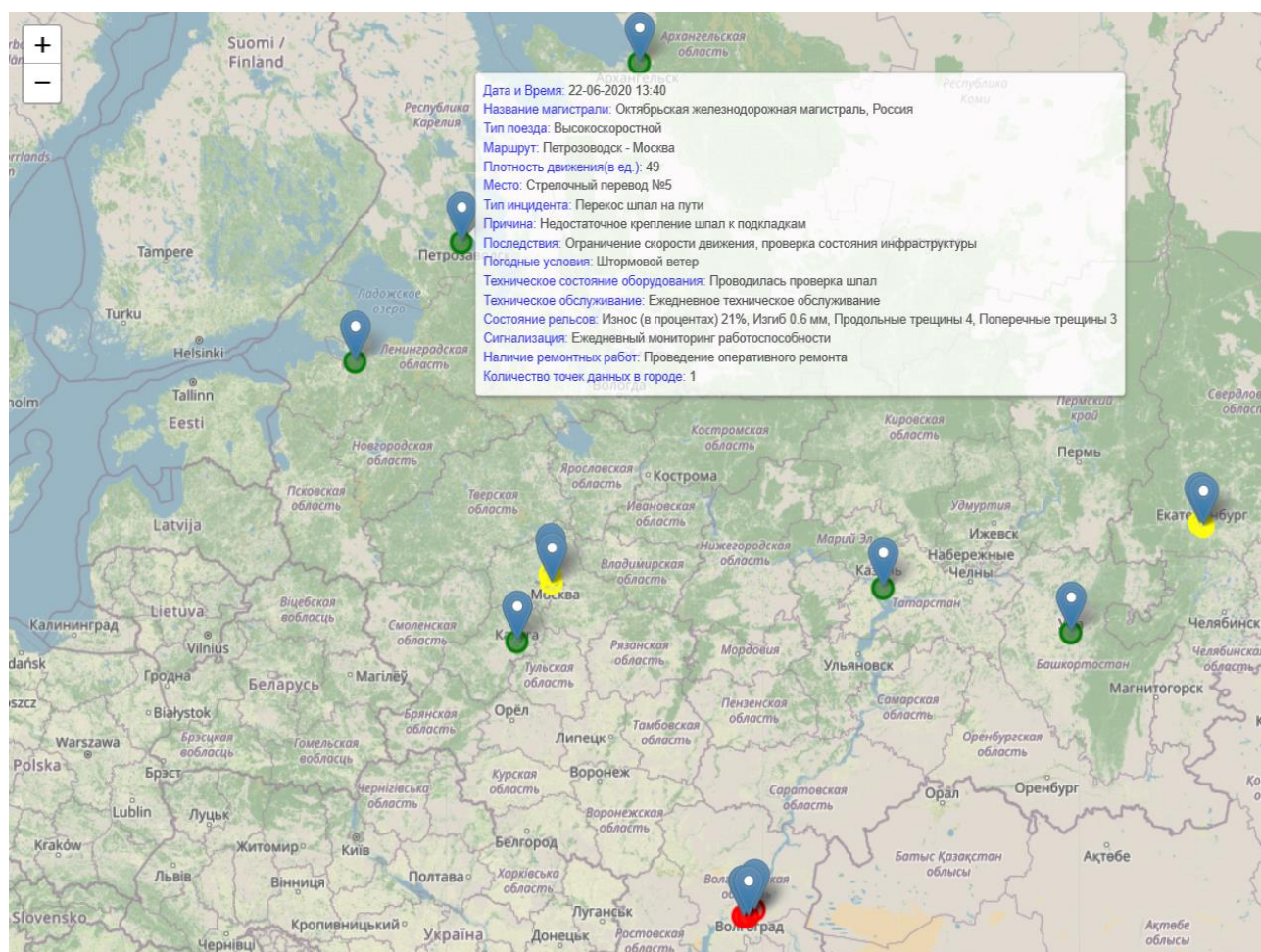


Рис. 2. Образец карты с кластерами

Выбор Python для реализации программы обусловлен его популярностью и богатой системой библиотек, таких как Pandas, NumPy, Scikit-learn и Folium, что делает его мощным инструментом для анализа данных, кластеризации и визуализации на карте. Таким образом, использование методов кластеризации в анализе нештатных ситуаций на железнодорожных системах с помощью Python и указанных библиотек позволяет эффективно выявлять и анализировать области с повышенным риском аварий.

### Выводы

Исследование нештатных ситуаций на железнодорожном транспорте России при помощи кластерного анализа данных представляет собой эффективный подход к выявлению закономерностей и паттернов, которые раскрывают особенности возникновения подобных ситуаций:

- кластерный анализ позволяет выделить различные типы нештатных ситуаций на железной дороге, что в свою очередь способствует оперативному реагированию на них и принятию необходимых мер;
- посредством анализа данных о нештатных ситуациях и их классификации на кластеры можно улучшить процессы обеспечения безопасности на железнодорожном транспорте, повысив прогностическую способность и оперативность реагирования;
- результаты исследования могут применяться для разработки рекомендаций по совершенствованию инфраструктуры и процессов на железнодорожном транспорте, что поможет в будущем повышению эффективности всей транспортной системы.

Разработанные рекомендации [6] по совершенствованию инфраструктуры и процессов железнодорожного транспорта таковы:

- модернизация и расширение существующих железнодорожных путей для увеличения пропускной способности и сокращения времени в пути;
- строительство новых высокоскоростных железнодорожных линий для сокращения времени следования между крупными городами;
- внедрение системы мониторинга состояния путей и оборудования для оперативного выявления и устранения дефектов;
- улучшение системы безопасности на станциях и в поездах, включая видеонаблюдение, датчики движения и аварийные кнопки;
- внедрение системы автоматического управления поездами (АТС, *аббр. от англ. Automatic Train Control*) для предотвращения столкновений и обеспечения безопасной работы поездов;
- внедрение системы умного управления движением поездов для оптимизации расписаний, увеличения частоты поездок и сокращения времени ожидания;
- переход на использование электрической тяги и внедрение современных энергосберегающих технологий для снижения выбросов вредных веществ;
- стимулирование развития грузовых перевозок по железной дороге путем создания специальных тарифных программ и снижения административных барьеров;
- модернизация инфраструктуры для грузовых перевозок, включая строительство современных терминалов и складских комплексов;
- разработка мобильных приложений для пассажиров с информацией о расписаниях, задержках и услугах на станциях;
- разработка и внедрение комплексных программ развития железнодорожной инфраструктуры, основанных на взаимодействии государственных органов, частных компаний, академических институтов и общественных организаций.

Внедрение кластерного анализа данных в систему мониторинга и управления безопасностью железнодорожного транспорта в России является неотъемлемым шагом для повышения уровня безопасности, эффективности и надежности транспортной системы.

### Литература

1. Грузооборот и пассажирооборот на железнодорожном транспорте // ТК Капро. URL: <https://cargotk.com/news/gruzooborot-i-passazhirooborot-na-zheleznodorozhnom-transporte/> (дата обращения 13.04.2024)
2. Leskovec J., Rajaraman A., Ullman J. Mining of Massive Datasets. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. 467 p.
3. Барсегян А. А., Куприянов М. С., Степаненко В. В., Холод И. И. Методы и модели анализа данных: OLAP и Data Mining: учебное пособие. СПб.: БХВ-Петербург, 2004. 336 с. EDN: QMNOPT
4. Шубинский И. Б., Замышляев А. М., Проневич О. Б., Игнатов А. Н., Платонов Е. Н. Применение методов машинного обучения для прогнозирования опасных отказов объектов железнодорожного пути // Надежность. 2020. Т. 20. № 2. С. 43–53. DOI: 10.21683/1729-2646-2020-20-2-43-53. EDN: PEEIGO
5. Методы и средства анализа данных // Bourabai Research: Технологии XXI века. URL: <http://www.bourabai.ru/tpoi/analysis.htm> (дата обращения 13.04.2024)
6. Отчет МСЖД 2023: статистика происшествий на железных дорогах // Zdmira. 23.03.2024. URL: <https://zdmira.com/articles/otchet-mszhd-2023-statistika-proisshествij-na-zhele-znykh-dorogakh> (дата обращения 13.04.2024)
7. Правила безопасности и порядок ликвидации аварийных ситуаций с опасными грузами при перевозке их по железным дорогам, утв. МПС РФ 25.11.1996 г. № ЦМ-407, МЧС РФ от 31.10.1996 г. № 9/733/3-2. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=263129> (дата обращения 13.04.2024)

**Статья поступила 23 апреля 2024 г.  
Одобрена после рецензирования 29 апреля 2024 г.  
Принята к публикации 2 мая 2024 г.**

### Информация об авторах

*Makeeva Виктория Витальевна* — студент 4-го курса факультета инфокоммуникационных сетей и систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: vika.makeeva2015@yandex.ru

*Vivchar Роман Михайлович* — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры программной инженерии и вычислительной техники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: rvivcar12@sut.ru

*Berezkin Александр Александрович* — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры программной инженерии и вычислительной техники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: berezkin.aa@sut.ru

## Identification of Railroad Transport Emergency Situations in Russia Based on Data Clustering Analysis

V. Makeeva ✉, R. Vivchar, A. Berezkin

The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications,  
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

**Purpose.** Identification of emergency situations on the railway to ensure safety and optimize processes. This includes monitoring the state of infrastructure, train movements, weather conditions and other factors that can lead to emergencies. **The purpose** of the work is to develop specialized software using cluster data analysis to identify the causes of accidents in Russian railway transport. This is critically important because of the significant role of rail transport on public safety and the economy of the country, as well as because of the potential threats associated with possible emergencies, especially during the transportation of dangerous goods. **Methods.** Cluster analysis to systematize various types of anomalies occurring in the railway infrastructure, taking into account parameters such as sources of problems, geographical location and time characteristics. This will help identify key groups of situations and better understand their nature, as well as evaluate the effectiveness of emergency prevention in various groups. **Results.** Using the method of cluster data analysis, the main patterns underlying unusual circumstances in the functioning of railway transport are identified. This allows us to come to significant conclusions, including the identification of various categories of emergency situations, optimization of safety measures and improvement of the effectiveness of the railway system. **Novelty.** The novelty of the proposed solution lies in applying cluster analysis to identify trends, patterns, and potential scenarios in data related to railway accidents. **Practical relevance.** This research aims to provide recommendations for improving infrastructure, enhancing safety measures, and ultimately contributing to the overall efficiency of the transportation system in the long term perspective.

**Key words:** emergency situations, emergencies, cluster analysis, railway transport, process optimization, trends, safety, Data Mining software development

### Information about Author

*Makeeva Victoria* — a 4<sup>th</sup> Year Student of Faculty of Information and Communication Networks and Systems (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: vika.makeeva2015@yandex.ru

*Vivchar Roman* — Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Software Engineering and Computer Engineering (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: rvivcar12@sut.ru

*Berezkin Aleksander* — Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Software Engineering and Computer Engineering (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: berezkin.aa@sut.ru

УДК 004.057

## Повышение эффективности трансфера технологий посредством учета уровней готовности технологий и зрелости интероперабельности взаимодействующих организаций

Нестеров А. А.

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича  
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

**Постановка задачи:** создание и функционирование центров трансфера технологий как структурных подразделений образовательных и научных организаций, которые осуществляют коммерциализацию результатов интеллектуальной деятельности, предусмотренное «Концепцией технологического развития на период до 2030 года», актуализирует вопросы эффективности их деятельности. **Целью работы** является исследование влияния уровней готовности технологий и параметров интероперабельности взаимодействующих организаций на эффективность функционирования центров трансфера технологий. Элементами **новизны** представленного решения является использование параметров интероперабельности организаций для оценки эффективности функционирования центров трансфера технологий. **Результат:** в работе предложено введение шкалы оценки эффективности функционирования центров трансфера технологий в зависимости от уровня готовности технологии и уровня зрелости интероперабельности организаций. Подготовлены **предложения** по использованию результатов проведенных исследований в целях обеспечения повышения качества организационной интероперабельности. Представлены **рекомендации**, направленные на повышение эффективности Центра трансфера технологий СПбГУТ.

**Ключевые слова:** трансфер технологий, центр трансфера технологий, интероперабельность, организационная интероперабельность, уровень готовности технологии, организационно-техническая система

Автор выражает благодарность доктору технических наук С. И. Макаренко за вовлечение в исследования в области интероперабельности, а также менеджеру проектов ЦТТ СПбГУТ, кандидату экономических наук Н. Н. Громовой за ценные советы и совместную работу над задачами повышения эффективности деятельности ЦТТ.

### Введение

В Российской Федерации в 2024 г. функционирует 38 центров трансфера технологий (ЦТТ), созданных в университетах и научных организациях в рамках реализации федерального проекта «Развитие масштабных научных и научно-технологических проектов по приоритетным исследовательским направлениям». Деятельность ЦТТ направлена на достижение показателя указанного федерального проекта «Количество отечественных технологий, используемых организациями реального сектора экономики», и от эффективности функционирования ЦТТ зависит успешная и своевременная реализация проекта. В свою очередь, эффективность функционирования ЦТТ также оценивается по ряду показателей.

#### Библиографическая ссылка на статью:

Нестеров А. А. Повышение эффективности трансфера технологий посредством учета уровней готовности технологий и зрелости интероперабельности взаимодействующих организаций // Вестник СПбГУТ. 2024. Т. 2. № 2. С. 2. EDN: ODDULA

#### Reference for citation:

Nesterov A. Increasing the Efficiency of Technology Transfer by Taking into Account Technology Readiness Levels and Interoperability Maturity of Interacting Organizations // Herald of SPbSUT. 2024. Vol. 2. Iss. 2. P. 2. EDN: ODDULA

Функционирование ЦТТ подразумевает, прежде всего, передачу некой технологии от разработчика (например, организации высшего образования) в другую организацию (например, промышленное предприятие). При этом передаваемая технология характеризуется определенным уровнем готовности технологии (УГТ). С другой стороны, при функционировании ЦТТ возникает взаимодействие между осуществляющими трансфер технологий организациями, которые можно представить как организационно-технические системы (ОТС). В то же время взаимодействие различных ОТС актуализирует вопросы обеспечения их функциональной совместимости (интероперабельности). Под ОТС будем понимать множество взаимосвязанных технических средств, персонала и пользователей, организованных и функционирующих для достижения одной или нескольких поставленных целей [1].

Интероперабельность – это «способность двух или более информационных систем или компонентов к обмену информацией и к использованию информации, полученной в результате обмена» [2]. В соответствии с эталонной моделью, представленной в ГОСТ Р 55062-2012, взаимодействие информационных систем формализуется на трех иерархических уровнях интероперабельности: техническом, семантическом, организационном [2].

Целью работы является исследование влияния уровня готовности передаваемых технологий и параметров интероперабельности взаимодействующих организаций на эффективность функционирования ЦТТ.

### Формирование системы трансфера технологий

Стратегией научно-технологического развития Российской Федерации предусмотрено формирование эффективной системы взаимодействия науки, технологий и производства, повышение восприимчивости экономики и общества к новым технологиям, развитие наукоемкого предпринимательства. Одним из путей для этого является организация системы трансфера технологий, управления интеллектуальной собственностью, ее охраны и защиты<sup>1</sup>. В рамках исполнения указов и поручений Президента разработана и утверждена «Концепция технологического развития на период до 2030 года» (далее – концепция), в соответствии с которой организована деятельность ЦТТ – структурных подразделений образовательных организаций высшего образования и научных организаций, которые осуществляют коммерциализацию результатов интеллектуальной деятельности и вовлечение исследователей в решение технологических задач компаний и корпораций и (или) оказывают содействие в указанном процессе, а также привлекают организации реального сектора экономики в качестве заказчиков и партнеров к реализации научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ (НИОКТР)<sup>2</sup>. При этом одним из мероприятий в рамках концепции является расширение сети инжиниринговых центров и ЦТТ на базе образовательных организаций высшего образования и научных организаций с учетом текущих и перспективных потребностей в локализации отдельных видов производств и технологий.

Таким образом, одним из ключевых моментов взаимодействия государства, науки и бизнеса становится создание эффективных условий для реализации процесса трансфера (передачи) технологий. Передача технологии в широком смысле подразумевает весь процесс от появления идеи до получения готового продукта и коммерциализации.

В рамках реализации федерального проекта «Развитие масштабных научных и научно-технологических проектов по приоритетным исследовательским направлениям» национального проекта «Наука и университеты» Минобрнауки России с 2021 г. проводит конкурс грантов на создание и развитие ЦТТ. По итогам двух проведенных конкурсов победителями признаны 38 университетов и научных организаций более чем из 15 регионов России. Таким образом, реализация концепции актуализирует задачу повышения эффективности функционирования ЦТТ.

---

<sup>1</sup> Указ Президента РФ от 28.02.2024 № 145 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации»

<sup>2</sup> Распоряжение Правительства Российской Федерации от 20.05.2023 г. № 1315-р «Концепция технологического развития на период до 2030 года»

## Влияние уровня готовности технологии и параметров интероперабельности на эффективность функционирования ЦТТ

В 2023 г. Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ) был признан одним из победителей конкурса грантов в форме субсидий на оказание государственной поддержки создания и развития ЦТТ. Целью создания ЦТТ СПбГУТ является формирование комплексной системы трансфера технологий и коммерциализации разработок в области цифровых технологий, информационных решений, радио- и проводных систем связи.

При исследовании процесса трансфера технологий будем рассматривать передающую и принимающую технологию стороны (организации) как ОТС. Обозначим передающую сторону (СПбГУТ) как ОТС<sub>1</sub> и принимающую сторону (индустриального партнера) как ОТС<sub>2</sub>. Рассматривая передающую и принимающую технологию стороны как ОТС, обратимся к вопросу обеспечения их интероперабельности. При этом взаимодействующие ОТС можно представить как совокупность организационной и технической подсистем [3].

При подготовке проекта трансфера технологий для снижения возможных рисков передающая и принимающая стороны должны проводить оценку готовности технологий [4]. В нашем случае передающая сторона ОТС<sub>1</sub> должна проводить оценку УГТ, а принимающая сторона ОТС<sub>2</sub> должна оценивать уровень готовности системы, в которую предполагается интегрировать принимаемую технологию. Показатель УГТ — это характеристика соответствия конкретной технологии уровню ее зрелости от идеи до серийного производства. Оценка достижения того или иного УГТ осуществляется с применением шкалы, имеющей 9 уровней (таблица 1) [5].

Таблица 1. Уровни готовности технологий

Уровень готовности технологии	Численное значение
УГТ 1: Основные принципы технологии изучены и опубликованы	1
УГТ 2: Концепция технологии и / или ее применения сформулированы	2
УГТ 3: Критические функции и / или характеристики подтверждены аналитическим и экспериментальным путем	3
УГТ 4: Компонент и / или макет испытаны в лабораторном окружении	4
УГТ 5: Компонент и / или макет испытаны в окружении, близком к реальному	5
УГТ 6: Модель системы/подсистемы или прототип продемонстрированы в окружении, близком к реальному	6
УГТ 7: Прототип системы продемонстрирован в условиях эксплуатации	7
УГТ 8: Реальная система завершена и квалифицирована в ходе испытаний и демонстрации	8
УГТ 9: Реальная система подтверждена путем успешной эксплуатации (достижения цели)	9

Таким образом, УГТ является одним из факторов, влияющих на эффективность функционирования системы трансфера технологий. Как было отмечено выше, деятельность ЦТТ направлена на достижение показателя «Количество отечественных технологий, используемых организациями реального сектора экономики», что подразумевает необходимость доведения технологии до стадии успешной эксплуатации, т. е. уровня УГТ 9. Соответственно, чем выше УГТ, планируемой к трансферу, тем более эффективным будет функционирование ЦТТ.

В [1] показано, что УГТ является одним из аспектов технического уровня интероперабельности. Таким образом, при внедрении технологий в технические подсистемы ОТС эффективность функционирования ЦТТ зависит от качества взаимодействия ОТС на техническом уровне интероперабельности, или, другими словами — от качества взаимодействия их технических подсистем.

Одной из целей ОТС<sub>1</sub> является эффективное функционирование ЦТТ, причем показателями оценки эффективности функционирования ЦТТ СПбГУТ выступают следующие параметры:

- объем доходов от коммерциализации результатов интеллектуальной деятельности (РИД);
- объем доходов от выполнения НИОКР;

- количество заключенных лицензионных соглашений на РИД;
- количество заключенных договоров на выполнение НИОКР.

Каждый из приведенных выше показателей оценки эффективности функционирования ЦТТ, в свою очередь, зависит от качества взаимодействия между ОТС<sub>1</sub> и ОТС<sub>2</sub>, или, другими словами, от интероперабельности двух организаций. Понятие интероперабельности организаций связано со способностью одних организаций взаимодействовать с другими путем обмена информацией и другими активами [5]. Как уже было отмечено, эталонная модель интероперабельности формализуется на трех уровнях (техническом, семантическом, организационном).

Взаимодействие организаций актуализирует вопросы интероперабельности на организационном уровне, на котором формализуются совместимость или совместность целей организаций, их бизнес-процессов, а также единство или эквивалентность нормативно-правовой базы, регламентирующей процессы информационного взаимодействия. Организационная интероперабельность зависит от совместности целей и задач ОТС<sub>1</sub> и ОТС<sub>2</sub> — «наличия на организационном уровне общих и взаимно-вложенных целей и задач в различных ОТС; наличие общих целей и задач является первопричиной, запускающей процесс информационного взаимодействия в интересах организации совместных действий» [3]. На практике это означает, что взаимодействующие стороны (ОТС<sub>1</sub> и ОТС<sub>2</sub>) должны, во-первых, иметь цель и заинтересованность в использовании передаваемой технологии, а во-вторых, их организационные подсистемы должны демонстрировать высокий уровень способности к взаимодействию.

Уровни интероперабельности организаций описываются по шкале зрелости интероперабельности (ЗИ) организаций, имеющей 5 уровней, от 0 до 4, где 0 — минимальный, а 4 — максимальный уровень ЗИ (таблица 2) [5].

Таблица 2. Уровни ЗИ организаций

Уровень зрелости	Численное значение	Способность к интероперабельности
Уровень 0 — Неподготовленный (Unprepared)	0	Организация не имеет возможности или намерений для реализации взаимодействия с другими организациями
Уровень 1 — Определенный (Defined)	1	Организация способна должным образом моделировать и описывать свои системы для подготовки к ограниченному взаимодействию с другими организациями
Уровень 2 — Согласованный (Aligned)	2	Организация способна проводить необходимые изменения для согласования своей деятельности с общепринятыми форматами или стандартами
Уровень 3 — Организационный (Organized)	3	Организация способна использовать метамоделирование для осуществления сопоставления (мэппинга), необходимого для взаимодействия с другими, аналогичными организациями
Уровень 4 — Адаптивный (Adaptive)	4	Организация способна динамично приспосабливаться и договариваться с любой другой организацией

Каждый из этих уровней определяет степень возможностей, необходимых для взаимодействия организаций. Таким образом, эффективность функционирования ЦТТ  $A$  зависит от уровня организационной интероперабельности ОТС<sub>1</sub> и ОТС<sub>2</sub> — чем выше уровень ЗИ организаций ОТС<sub>1</sub> и ОТС<sub>2</sub>, тем эффективнее будет функционировать ЦТТ. В общем случае эффективность работы ЦТТ можно представить как функцию  $A$ :

$$A = f(T_i, U_j, U_k), \quad (1)$$

где  $A$  — эффективность функционирования ЦТТ, которая зависит от уровня готовности  $i$ -й технологии  $T_i$ , уровней ЗИ взаимодействующих  $j$ -й и  $k$ -й организаций  $U_j$  и  $U_k$ . При этом набор численных значений уровня готовности  $i$ -й технологии  $T_i$  и уровней ЗИ взаимодействующих  $j$ -й и  $k$ -й организаций  $U_j$  и  $U_k$  содержит  $9 \times 5 \times 5 = 225$  возможных вариантов.



Рассмотрим частный случай СПбГУТ, когда ЦТТ создан в составе одной из взаимодействующих ОТС (в составе ОТС<sub>1</sub>), а его функционирование имеет целью передачу технологий, разработанных СПбГУТ, индустриальному партнеру. В таком случае ЦТТ является подсистемой ОТС<sub>1</sub>, уровень ЗИ которой является константой. Экспертным путем уровень ЗИ СПбГУТ  $U_1$  можно оценить как «уровень 2 — согласованный», тогда:

$$A_1 = f(T_i, U_k), \quad (2)$$

где  $A_1$  — эффективность функционирования ЦТТ ОТС<sub>1</sub> (СПбГУТ), которая зависит от уровня готовности  $i$ -й технологии  $T_i$  и уровня ЗИ  $k$ -й организации  $U_k$ . В таком случае, поскольку:

$$T_i = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\} U_k = \{0, 1, 2, 3, 4\}, \quad (3)$$

набор численных значений уровня готовности  $i$ -й технологии  $T_i$  и уровней ЗИ взаимодействующих организаций  $U_1$  и  $U_k$  содержит 45 возможных вариантов.

Введем дискретную четырехуровневую шкалу, значения которой может принимать эффективность функционирования ЦТТ ОТС<sub>1</sub>  $A_1$ :

- низкая;
- средняя;
- высокая;
- очень высокая.

Сгруппируем все возможные 45 вариантов набора численных значений уровня готовности  $i$ -й технологии  $T_i$  и уровня ЗИ взаимодействующего с СПбГУТ предприятия  $U_k$  в группы, в зависимости от величины значения произведения  $E_{ik} = T_i \times U_k$ , а каждой группе приведем в соответствие одно из значений  $A_1$ . Результаты группировки, исходя из рассчитанного значения  $E_{ik}$ , внесены в таблицу 3.

Таблица 3. Результаты группировки вариантов набора численных значений УГТ и уровня ЗИ взаимодействующего с СПбГУТ предприятия

Значение $E_k$	Группа	Эффективность функционирования ЦТТ $A_1$
[0–3]	1	низкая
(3–10]	2	средняя
(10–24]	3	высокая
(24–36]	4	очень высокая

На рисунке 1 показана эффективность функционирования ЦТТ СПбГУТ  $A_1$  в зависимости от уровня готовности  $i$ -й технологии  $T_i$  и уровня ЗИ  $k$ -й организации  $U_k$ . Эффективность функционирования ЦТТ можно проиллюстрировать следующим примером. Рассмотрим случай, когда уровень ЗИ одной из взаимодействующих организаций  $U_k$  принимает значение 0 («уровень 0 — неподготовленный»), т. е. организация не имеет возможности или намерений для взаимодействия с другими организациями. Как следствие, любая предполагаемая к трансферу технология, даже с максимальным уровнем готовности, в такой ситуации не может быть передана, и, следовательно, эффективность работы ЦТТ будет низкой. В обратной ситуации, когда уровень ЗИ взаимодействующей организации  $U_k$  принимает значение 4 («уровень 4 — адаптивный»), т. е. взаимодействующая организация способна динамично приспосабливаться и договариваться, эффективность работы ЦТТ будет высокой даже при относительно низких значениях уровней готовности предполагаемых к трансферу технологий.

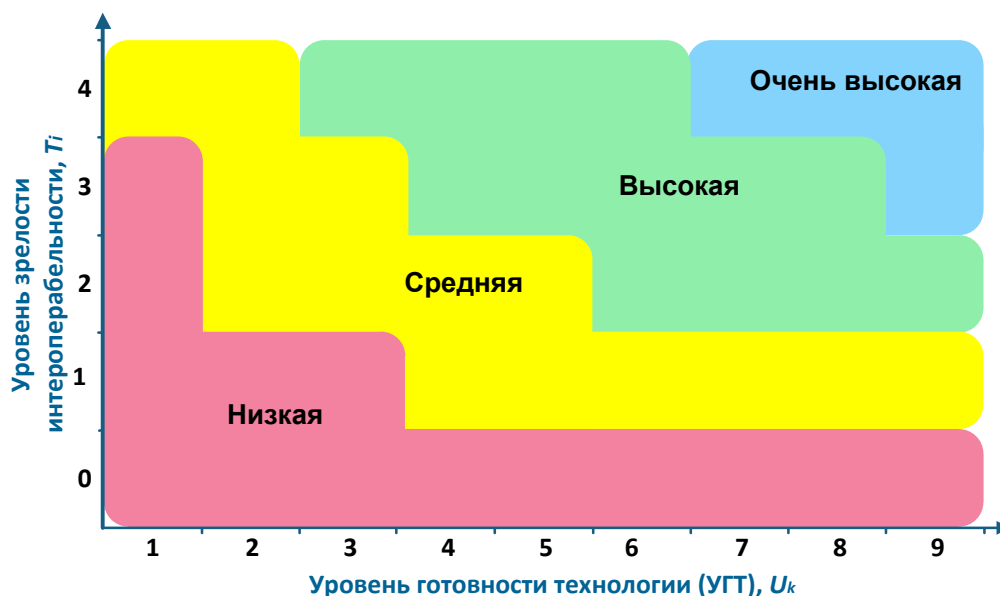


Рис. 1. Эффективность функционирования ЦТТ в зависимости от УГТ и уровня ЗИ организации

С учетом вышеизложенного и в контексте повышения эффективности работы ЦТТ в СПбГУТ можно сформулировать следующие рекомендации.

1. Для повышения уровня готовности передаваемых технологий  $T_i$  необходимо, с одной стороны, стимулировать исследователей и обучающихся СПбГУТ к работе с уже имеющимися технологиями и созданным научным заделом, а с другой стороны — вести постоянный поиск и отбор новых разработок. Это может достигаться внедрением практики материального стимулирования исследователей, а также путем проведения конкурсов научных разработок университета. В настоящий момент в СПбГУТ проводится ежегодный конкурс разработок «Bonch.Tech», к участию в котором приглашаются студенты, аспиранты и молодые ученые. Целесообразно рассмотреть проведение конкурса научных проектов и разработок среди научных групп и ведущих исследователей СПбГУТ.

2. Для повышения уровня ЗИ взаимодействующих организаций  $U_j$  и  $U_k$  необходимо, с одной стороны, вести работу по повышению уровня ЗИ СПбГУТ, а с другой стороны, принимать меры по повышению уровня ЗИ промышленных партнеров, в частности:

а) для повышения уровня ЗИ СПбГУТ рекомендуется рассмотреть применение практики метамоделирования в целях обеспечения возможности взаимодействия с другими предприятиями; еще одной рекомендацией может стать использование для трансфера технологий ресурсов малых инновационных предприятий, доля в которых принадлежит СПбГУТ. Уровень ЗИ малых инновационных предприятий может достигать максимального значения «уровень 4 — адаптивный» за счет высокой организационной гибкости и меньшего количества барьеров интероперабельности;

б) для повышения уровня ЗИ промышленных партнеров, с которыми СПбГУТ планирует взаимодействовать, рекомендуется предварительно провести экспертную оценку в соответствии с [5] и в случае определения уровня ЗИ потенциального промышленного партнера как «уровень 0 — неподготовленный» или «уровень 1 — определенный» рекомендуется взаимодействие с целью трансфера технологий с таким партнером не инициировать.

## Выводы

Проведенный в данной работе Анализ показывает, что эффективность функционирования ЦТТ зависит от уровня готовности передаваемой технологии, а также от уровней ЗИ взаимодействующих организаций. При рассмотрении взаимодействующих организаций как ОТС эффективность функционирования системы трансфера технологий зависит от качества взаимодействия их технических и организационных подсистем. Представлены рекомендации, направленные на повышение эффективности ЦТТ,

иллюстрированные примерами из деятельности ЦТТ в СПбГУТ. Представляется актуальным использовать результаты проведенных исследований для дальнейшей разработки и развития элементов научно-методического аппарата, обеспечивающих повышение качества организационной интероперабельности.

### Литература

1. Макаренко С. И. Интероперабельность организационно-технических систем. СПб.: Наукоемкие технологии, 2024. 313 с. EDN: YVWUGI
2. ГОСТ Р 55062-2012. Информационные технологии (ИТ). Системы промышленной автоматизации и их интеграция. Интероперабельность. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2014. 12 с.
3. Макаренко С. И., Нестеров А. А. Структурно-функциональная модель интероперабельности организационно-технических систем // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 4. С. 65–74. DOI: 10.31854/1813-324X-2023-9-4-65-74. EDN: UWVOXU
4. ГОСТ Р 58048-2017. Трансфер технологий. Методические указания по оценке уровня зрелости технологий. М.: Стандартинформ, 2017.
5. ГОСТ Р ИСО 11354-2 – 2016. Усовершенствованные автоматизированные технологии и их применение. Требования к установлению интероперабельности процессов промышленных предприятий. Ч. 2. Модель зрелости для оценки интероперабельности предприятий. М.: Стандартинформ, 2014. 20 с.

Статья поступила 21 мая 2024 г.  
Одобрена после рецензирования 3 июня 2024 г.  
Принята к публикации 6 июня 2024 г.

### Информация об авторе

*Нестеров Алексей Альбертович* — заместитель руководителя Центра трансфера цифровых технологий и технологий систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: [nesterov.aa@sut.ru](mailto:nesterov.aa@sut.ru)

## Increasing the Efficiency of Technology Transfer by Taking into Account Technology Readiness Levels and Interoperability Maturity of Interacting Organizations

A. Nesterov

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications,  
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

**Statement of the problem:** *the creation and operation of technology transfer centers as structural divisions of educational and scientific organizations that commercialize the results of intellectual activity, provided for by the “Concept of Technological Development for the Period until 2030”, updates the issues of the effectiveness of their activities. **The purpose** of the article is to study the influence of technology readiness levels and interoperability parameters of interacting organizations on the efficiency of the functioning of technology transfer centers. Elements of **novelty** of the presented solution are the use of interoperability parameters of organizations to assess the effectiveness of the functioning of technology transfer centers. **Result:** the work proposes the introduction of a scale for assessing the effectiveness of the functioning of technology transfer centers depending on the technology readiness level and the level of maturity of interoperability of organizations. **Proposals** have been prepared for using the results of the research in order to improve the quality of organizational interoperability. **Recommendations** aimed at increasing the efficiency of the technology transfer center in SPbSUT are presented.*

**Key words:** *technology transfer, technology transfer center, interoperability, organizational interoperability, technology readiness level, organizational and technical system*

### Information about Author

Nesterov Alexey — Deputy Head of the Technology Transfer Center (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: [nesterov.aa@sut.ru](mailto:nesterov.aa@sut.ru)

УДК 629.7.054.07

## Методика оценки альтиметров по критерию обобщенной эффективности

Говако А. С. ✉, Погорелов А. А.

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация

<sup>2</sup> Военная орденов Жукова и Ленина Краснознаменная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного, Санкт-Петербург, 194064, Российская Федерация

**Постановка задачи:** необходимость использования альтиметров для измерения высоты при малой эффективности и дороговизне известных методик оценки требует разработки новой методики для выявления преимуществ, недостатков и особенностей эксплуатации каждой модели. **Целью работы** является проведение сравнительного анализа четырех альтиметров по критерию обобщенной эффективности, складывающемуся из следующих параметров: цена, диапазон рабочих температур, максимальная рабочая высота, относительная погрешность измерений, вес и потребляемая мощность. **Используемые методы:** сравнение альтиметров при помощи критерия обобщенной эффективности. **Результат:** использование представленной методики оценки альтиметров выявило особенности каждой модели, что позволило представить рекомендации по применению их в конкретных условиях. Элементами **новизны** представленного решения является использование критерия обобщенной эффективности для оценки альтиметров. **Теоретическая/Практическая значимость:** результаты сравнительного анализа предлагается использовать при определении модели альтиметра для применения на различных видах самолетов, различной максимальной высоте полета. Методика оценки по критерию обобщенной эффективности позволит принимать решения о покупке любых выбранных для исследования электронных приборов, проводить по ним сравнительный анализ, определять достоинства и недостатки.

**Ключевые слова:** альтиметр, критерий обобщенной эффективности, бортовая аппаратура, сравнительная оценка

### Актуальность исследования

Альтиметры являются важной составляющей современной бортовой аппаратуры самолета. Правильное измерение и контроль высоты — залог безопасности полета, поэтому на современном летательном аппарате средства, измеряющие высоту полета, часто дублируются, а отказ хотя бы одного из этих приборов расценивается как предпосылка к летному происшествию [1].

Помимо авиации альтиметры используются в геодезии (при проведении геодезических работ и создании карт местности), в сельском хозяйстве (для оценки и контроля уровня воды в поливных системах), а также в альпинизме (для определения точной высоты и контроля изменений при вертикальном перемещении).

Актуальность сравнения альтиметров обусловлена необходимостью выбора из всего разнообразия моделей оптимального устройства для различных целей и условий использования, возможного улучшения характеристик и отслеживания новых технологий и инноваций.

### Библиографическая ссылка на статью:

Говако А. С., Погорелов А. А. Методика оценки альтиметров по критерию обобщенной эффективности // Вестник СПбГУТ. 2024. Т. 2. № 2. С. 3. EDN: ZCZYUO

### Reference for citation:

Govako A., Pogorelov A. Methodology for Measuring Altimeters according to the Criterion Generalized Effectiveness // Herald of SPbSUT. 2024. Vol. 2. Iss. 2. P. 3. EDN: ZCZYUO

## Постановка задачи

В соответствии с поставленной целью сравнительного анализа альтиметров были определены основные задачи настоящего исследования:

1. Поиск в Интернете и выбор моделей альтиметров для сравнения.
2. Определение сравниваемых характеристик и сбор информации по ним.
3. Расчет критерия эффективности каждой выбранной характеристики, критерия обобщенной эффективности и определение коэффициентов важности.
4. Анализ полученных результатов.

## Методика сравнения альтиметров при помощи критерия обобщенной эффективности

Методика сравнения альтиметров при помощи критерия обобщенной эффективности представляет собой комплексный подход, который позволяет оценить и сравнить характеристики и эффективность работы различных приборов. Она может быть использована для выбора оптимального прибора для конкретных условий эксплуатации или оценки качества работы уже существующих устройств [2].

Достоинства этой методики состоят в том, что она позволяет без особых материальных затрат провести качественное сравнение, учесть все основные характеристики и аспекты работы оцениваемого устройства. Другие методики, такие как тестирование в различных условиях, которое предполагает оценку эффективности при помощи проведения испытаний с изменением температуры, влажности, давления и т. д., или оценка удовлетворенности пользователей на основе результатов опроса о качестве данного устройства, такими преимуществами не обладают [3–6].

Основные этапы применения методики:

*Этап 1.* Определение критериев оценки: перед началом сравнения необходимо определить критерии, по которым будут оцениваться приборы. В нашем случае это критерий обобщенной эффективности, складывающийся из критерия эффективности следующих характеристик: цена, диапазон рабочих температур, максимальная высота над уровнем моря, относительная погрешность, вес и потребляемая мощность.

*Этап 2.* Оценка приборов по критериям эффективности характеристик: на основе собранных данных проводится оценка каждого прибора по выбранным критериям. Для этого используем метод сравнения абсолютных значений.

*Этап 3.* Расчет обобщенного показателя эффективности: после оценки каждого прибора по отдельным критериям необходимо рассчитать обобщенный показатель эффективности. Это позволит получить общую оценку каждого прибора и провести их сравнение.

*Этап 4.* Анализ результатов: на основании полученных результатов можно сделать вывод о том, какой прибор является наиболее оптимальным для заданных условий эксплуатации.

Необходимо учитывать специфику применения и требования к безопасности полетов, чтобы обеспечить надежную и эффективную работу оборудования. Методика сравнения двух пилотажно-навигационных приборов с использованием критерия обобщенной эффективности является действенным инструментом для принятия обоснованных решений при выборе оборудования для авиации. Он позволяет учесть все важные аспекты работы приборов и получить объективную оценку их эффективности.

Расчет обобщенной эффективности каждой модели будет производиться по формуле:

$$\sum_n = a_n + b_n + c_n + d_n + e_n + f_n, \quad (1)$$

где  $a$  — эффективность цены, рассчитывается по формуле:

$$a_n = \frac{C_{min}}{C_n}, \quad (2)$$

где:  $C_{min}$  — минимальная цена среди альтиметров;  $C_n$  — цена  $n$ -го альтиметра;

$b$  — эффективность диапазона рабочих температур, рассчитывается по формуле:

$$b_n = \frac{T_n}{T_{max}}, \quad (3)$$

где:  $T_{max}$  — максимальный диапазон рабочих температур среди альтиметров;  $T_n$  — диапазон рабочих температур  $n$ -го альтиметра;

$c$  — эффективность максимальной рабочей высоты, рассчитывается по формуле:

$$c_n = \frac{h_n}{h_{max}}, \quad (4)$$

где:  $h_{max}$  — максимальная рабочая высота среди альтиметров;  $h_n$  — максимальная рабочая высота  $n$ -го альтиметра;

$d$  — эффективность относительной погрешности, рассчитывается по формуле:

$$d_n = \frac{\varepsilon_{min}}{\varepsilon_n}, \quad (5)$$

где:  $\varepsilon_{min}$  — минимальная относительная погрешность измерений среди альтиметров;  $\varepsilon_n$  — относительная погрешность измерений  $n$ -го альтиметра;

$e$  — эффективность веса, рассчитывается по формуле:

$$e_n = \frac{m_{min}}{m_n}, \quad (6)$$

где:  $m_{min}$  — минимальный вес среди выбранных альтиметров;  $m_n$  — вес  $n$ -го альтиметра;

$f$  — эффективность потребляемой мощности, рассчитывается по формуле:

$$f_n = \frac{W_{min}}{W_n}, \quad (7)$$

где:  $W_{min}$  — минимальная потребляемая мощность среди выбранных альтиметров;  $W_n$  — потребляемая мощность  $n$ -го альтиметра.

Разработанная методика позволяет оценивать эффективности приборов новым способом, основанным на расчете критерия обобщенной эффективности. Каждая составляющая формулы представляет собой эффективность выбранной для оценки характеристики прибора.

### Пример применения методики

Рассмотрим использование методики применительно к следующим альтиметрам:

1. Indu Altimeter;
2. Winter Instruments 4 HM 6;
3. UMA 5-411-20;
4. P/N 2M11C (KUB 700).

На первом этапе, в соответствии с представленной методикой, определим критерий оценки. В работе будет учитываться критерий обобщенной эффективности. Значения выбранных технических характеристик приведены в таблице 1.

Таблица 1. Технические характеристики сравниваемых альтиметров

№	Модель	Цена (С)	Диапазон рабочих температур (Т)	Максимальная высота над уровнем моря (h)	Относительная погрешность (ε)	Вес (m)	Потребляемая мощность (W)
1	Indu Altimeter	54 629 р.	от -30°C до +60°C	10 000 м	3 %	0,240 кг	1,44 Вт
2	Winter Instruments 4 HM 6	50 150 р.	От -35°C до +55°C	6 000 м	2 %	0,230 кг	2,00 Вт
3	UMA 5-411-20	45 031 р.	От -20°C до +40°C	6 100 м	2 %	0,200 кг	1,80 Вт
4	P/N 2M11C (KUB700)	61 200 р.	От -30°C до +65°C	13 716 м	4 %	0,264 кг	2,40 Вт

На втором этапе на основе собранных данных проведем оценку каждого прибора по критерию эффективности характеристик и представим результаты в таблице 2.

Таблица 2. Критерии эффективности характеристик альтиметров

№	Модель	Эффективность цены	Эффективность диапазона рабочих температур	Эффективность максимальной высоты над уровнем моря	Эффективность относительной погрешности	Эффективность веса	Эффективность потребляемой мощности
1	Indu Altimeter	0,82	0,95	0,73	0,67	0,83	1
2	Winter Instruments 4 HM 6	0,89	0,95	0,44	1	0,87	0,72
3	UMA 5-411-20	1	0,63	0,44	1	1	0,8
4	P/N 2M11C (KUB700)	0,74	1	1	0,4	0,75	0,6

На третьем этапе рассчитываем показатель обобщенной эффективности для каждой модели альтиметра по формуле (1):

$$\begin{aligned} \Sigma_1 &= \frac{45031}{54629} + \frac{90}{95} + \frac{10000}{13716} + \frac{2}{3} + \frac{0,2}{0,24} + \frac{1,44}{1,44} \approx 5; \\ \Sigma_2 &= \frac{45031}{50150} + \frac{90}{95} + \frac{6000}{13716} + \frac{2}{2} + \frac{0,2}{0,23} + \frac{1,44}{2} \approx 4,87; \\ \Sigma_3 &= \frac{45031}{45031} + \frac{60}{95} + \frac{6100}{13716} + \frac{2}{2} + \frac{0,2}{0,2} + \frac{1,44}{1,8} \approx 4,79; \\ \Sigma_4 &= \frac{45031}{61200} + \frac{95}{95} + \frac{13716}{13716} + \frac{2}{4} + \frac{0,2}{0,264} + \frac{1,44}{2,4} \approx 4,59. \end{aligned}$$

На четвертом этапе проанализируем полученные результаты и сделаем выводы об эффективности каждого альтиметра для заданных условий эксплуатации.

1) Indu Altimeter имеет наибольший критерий обобщенной эффективности. Он является самым оптимальным выбором для крупных и высокоскоростных пассажирских авиалайнеров [7, 8] из всех рассмотренных моделей, а также имеет наибольшую максимальную высоту полета для такого типа летательных аппаратов (10 000 м).

2) Winter Instruments 4 HM 6 и UMA 5-411-20 имеют более низкий критерий обобщенной эффективности, однако обладают преимуществом в цене, относительной погрешности и весе. Эти альтиметры стоит использовать на небольших самолетах гражданской авиации и некоторых реактивных самолетах [7, 8], которые летают на высоте не более 6 000 м.



3) P/N 2M11C (KUB 700) имеет наименьший критерий обобщенной эффективности, однако обладает преимуществом в диапазоне рабочих температур и максимальной высоте над уровнем моря. Этот альтиметр может использоваться как на крупных и высокоскоростных пассажирских авиалайнерах, так и на истребителях [7, 8].

### Выводы

Разработанная методика позволяет сравнить альтиметры при помощи критерия обобщенной эффективности, использование которого обладает определенной новизной.

Исследование проводилось с целью получения результатов сравнительного анализа для определения оптимальных условий эксплуатации и выявления преимуществ каждой выбранной модели альтиметров.

В ходе апробации методики была произведена сравнительная оценка четырех альтиметров по следующим параметрам: цена, диапазон рабочих температур, максимальная высота над уровнем моря, относительная погрешность, вес, потребляемая мощность. Был рассчитан обобщенный показатель эффективности, который выражает общее качество каждой модели. Результаты расчетов приведены в таблице 3:

Таблица 3. Обобщенный показатель эффективности

№	Модель	Обобщенный показатель эффективности
1	Indu Altimeter	5,00
2	Winter Instruments 4 HM 6	4,87
3	UMA 5-411-20	4,79
4	P/N 2M11C (KUB700)	4,59

Исследование показало, что общее качество лучше всего у Indu Altimeter, также он обладает наименьшей потребляемой мощностью, поэтому его следует применять на крупных и высокоскоростных пассажирских авиалайнерах [7, 8]. Winter Instruments 4 HM 6 и UMA 5-411-20 обладают приблизительно схожим общим качеством и рекомендуются к применению на небольших самолетах гражданской авиации и некоторых реактивных самолетах [7, 8], при этом UMA 5-411-20 обладает наименьшей ценой и весом. P/N 2M11C (KUB 700) имеет наименьшее общее качество, но обладает наибольшей максимальной высотой над уровнем моря и наибольшим диапазоном рабочих температур, что указывает на возможность использования его как на крупных и высокоскоростных пассажирских авиалайнерах, так и на истребителях [7, 8].

Методику оценки альтиметров по критерию обобщенной эффективности можно использовать при определении эффективности любого прибора, у которого можно определить эталонное значение характеристики только по наибольшему или наименьшему значению среди всех остальных выбранных для сравнения устройств.

В дальнейшем планируется развитие представленной методики в направлении учета факторов, которые затруднительно оценить при помощи числового значения, полученного из соотношения эталонного и оцениваемого значения, например, такие факторы, как удобство использования и площадь, занимаемая на приборной панели.

### Литература

1. Романов А. А. Анализ основных тенденций развития спутниковых альтиметров: «подрывные» или эволюционные технологии? // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2018. Т. 5. Вып. 4. С. 3–13. DOI: 10.30894/issn2409-0239.2018.5.4.3.13. EDN: DWJMRO

2. Хнаев О. А., Данилов А. М. Синтез обобщенного критерия качества // Молодой ученый. 2014. № 21 (80). С. 240–242. EDN: TCUZML. URL: <https://moluch.ru/archive/80/14552/> (дата обращения 18.05.2024)

3. Пархимович В. А., Ципенко В. Г. Практическая аэродинамика: учебное пособие для вузов. 2-е изд. М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К°», 2024. 326 с. EDN: QTSVPX
4. Симонов А. Н. Волков Р. В., Дворников С. В. Основы построения и функционирования угломерных систем координатометрии источников радиоизлучений: учебное пособие. СПб.: ФГКВУВО «Военная Академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного» МО РФ, 2017. 248 с. EDN: XRBXML
5. Дворников С. В., Фокин Г. А., Аль-Одхари А. Х., Федоренко И. В. Оценка влияния свойств сигнала *PRS LTE* на точность позиционирования // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2017. № 4. С. 94–103. EDN: YQWNLJ
6. Дворников С. В., Симонов А. Н., Богдановский С. В. Способ позиционирования беспилотного летательного аппарата на основе поляризационно-адаптивной обработки радиосигналов от реперных станций // Телекоммуникации. 2017. № 8. С. 36–42. EDN: ZDNGYN
7. ГОСТ 22837-77. Оборудование самолетов и вертолетов пилотажно-навигационное бортовое. Термины и определения. М.: Издательство стандартов, 1978. 9 с.
8. Авиационные приборы и пилотажно-навигационные комплексы: учебное пособие: в 2 ч. / сост. Е. В. Антонец, В. И. Смирнов, Г. А. Федосеева. Ч. 1. Ульяновск: УВАУ ГА, 2007. 119 с.

**Статья поступила 03 июня 2024 г.**  
**Одобрена после рецензирования 6 июня 2024 г.**  
**Принята к публикации 10 июня 2024 г.**

### **Информация об авторах**

*Говако Александр Сергеевич* — студент института радиотехники и инфокоммуникационных технологий Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. E-mail: sasha\_govako@mail.ru

*Погорелов Андрей Анатольевич* — кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры радиосвязи Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного. E-mail: aprod@yandex.ru

# Methodology for Measuring Altimeters according to the Criterion Generalized Effectiveness

A. Govako , A. Pogorelov

<sup>1</sup> Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, 190000, Russian Federation

<sup>2</sup> Military Academy of Communications, St. Petersburg, 194064, Russian Federation

**Purpose:** given the importance of altimeters due to their ability to measure altitude and the inefficiency and costliness of known estimation methods, it is necessary to develop a new methodology, use it on the devices selected for comparison, and identify the advantages, disadvantages, and operational features of each model. The purpose of the work is to carry out a comparative analysis of four altimeters according to the following parameters: price, operating temperature range, maximum operating altitude, relative measurement error, weight and power consumption. **Methods used:** comparison of altimeters using a generalized performance criterion. **Result:** the use of the presented methodology for evaluating altimeters revealed the features of each model, which made it possible to provide recommendations for their use in specific conditions. The elements of **novelty** of the presented solution are the use of generalized efficiency criterion and importance coefficients. **Theoretical/Practical Significance:** the results of the comparative analysis are proposed to be used in determining the altimeter model for use on different types of aircraft, different maximum flight altitudes. The method of evaluation by the criterion of generalized efficiency will allow to make decisions on the purchase of any electronic devices selected for the study, to conduct a comparative analysis of them, to determine the advantages and disadvantages of each device.

**Key words:** altimeter, efficiency, airplane, on-board equipment

## Information about Author

Govako Alexander — student of the Institute of Radio Engineering and Infocommunication Technologies (Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation). E-mail: sasha\_govako@mail.ru

Pogorelov A. A. — Ph. D. of Engineering Sciences, Professor of the Department Radiocommunication (Military Academy of Communications). E-mail: anpog@yandex.ru

УДК 621.396.969

## Разработка и апробация анализатора сигналов стандарта LTE средствами программно-конфигурируемого радио

Цап В. В. ✉, Фокин Г. А.

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича  
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

**Цель работы** — программная реализация и экспериментальная апробация анализатора сигналов стандарта LTE средствами программно-конфигурируемого радио для позиционирования с точностью до принадлежности к соте. **Результат:** разработано программное обеспечение анализатора сигналов стандарта LTE на языке MATLAB, реализующее прием, обработку и извлечение необходимых блоков системной информации, которая передается базовыми станциями стандарта LTE по широкополосным каналам; сконфигурирован интерфейс для работы с платой USRP B210; в ходе экспериментальной апробации выполнен прием и обработка блоков системной информации из радиозэфира с извлечением идентификаторов операторских базовых станций и последующим обращением в открытую базу данных OpenCellID для получения глобальных координат. **Новизна:** из обзора открытых отечественных источников следует, что настоящее исследование является первой работой, в которой детально описан порядок анализа широкополосных сигналов стандарта LTE для определения местоположения пользовательского устройства, не являющегося абонентом сети. **Практическая значимость:** программно реализованный и экспериментально апробированный анализатор сигналов стандарта LTE позволяет определять местоположение пользователя, не являющегося абонентом какой-либо сети, с точностью до принадлежности к ближайшей соте в условиях недоступности глобальных навигационных спутниковых систем.

**Ключевые слова:** стандарт LTE, программно-конфигурируемое радио, среда разработки MATLAB, блок системной информации, позиционирование

**Источник финансирования:** статья подготовлена в рамках прикладных научных исследований СПбГУТ, регистрационный номер 1023031600087-9-2.2.4;2.2.5;2.2.6;1.2.1;2.2.3 в ЕГИСУ НИОКТР.

### Введение

На сегодняшний день сети стандарта LTE (аббр. от англ. Long-Term Evolution — букв. «долгосрочное развитие») являются доминирующими системами радиосвязи по радиопокрытию и обслуживанию; в частности, за последние восемь лет радиопокрытие сетями LTE в странах СНГ выросло на 49,1 %, достигнув 92 % [1]. В связи с санкционными ограничениями по ввозу телекоммуникационного оборудования на территорию России [2] ожидать стремительного развертывания сетей пятого поколения 5G стандарта NR (аббр. от англ. New Radio) не приходится, поэтому в ближайшее десятилетие сети стандарта LTE останутся основными сетями сотовой подвижной радиосвязи.

Одним из возможных подходов к программно-аппаратной реализации систем радиосвязи и устройств приема и передачи сигналов является программно-конфигурируемое радио (SDR, аббр. от англ. Software Defined Radio) [3–10]. Аппаратные модули SDR реализуются на архитектуре с нулевой

---

#### Библиографическая ссылка на статью:

Цап В. В., Фокин Г. А. Разработка и апробация анализатора сигналов стандарта LTE средствами программно-конфигурируемого радио // Вестник СПбГУТ. 2024. Т. 2. № 2. С. 4. EDN: LPOWHF

#### Reference for citation:

Tsap V., Fokin G. Development and Testing of LTE Signal Analyzer Using Software-Defined Radio // Herald of SPbSUT. 2024. Vol. 2. Iss. 2. P. 4. EDN: LPOWHF

промежуточной частотой [4–7], что снижает сложность оборудования, производящего обработку радиосигнала, за счет уменьшения частоты дискретизации и, следовательно, снижения требований к аналого-цифровому и цифро-аналоговому преобразователям. После преобразования сигнала в цифровую форму его можно обрабатывать методами и средствами цифровой обработки сигналов, реализованными на языках программирования высокого уровня, что упрощает и тем самым ускоряет разработку прототипов систем радиосвязи [8–10].

Помимо систем радиосвязи существующие программно-аппаратные средства SDR позволяют разрабатывать и системы радиотехнического позиционирования [11–13].

В настоящее время в России осуществляется разработка радиотехнических систем навигации, реализующих услуги позиционирования независимо от глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [14]. В условиях отсутствия сигналов ГНСС для определения местоположения пользовательских устройств (UE, *аббр. от англ. User Equipment*) могут использоваться сигналы базовых станций (БС) сетей связи стандарта LTE. Анализируя широкополосные сигналы стандарта LTE средствами SDR, можно извлекать координаты ближайших БС всех работающих в данном районе операторов, не будучи абонентом какой-либо отдельной сети. В связи с широко развитой инфраструктурой и подавляющим радиопокрытием сетей связи LTE разработка и экспериментальная апробация анализатора сигналов стандарта LTE средствами SDR для решения задач позиционирования UE по сигналам нескольких БС представляется достаточно актуальной и востребованной.

Материал настоящей работы организован далее следующим образом: сначала выполняется обзор существующих технических решений по анализу сигналов стандарта LTE; затем приводится обоснование выбора программной среды разработки анализатора сигналов стандарта LTE; после формализации процедур обработки рассматриваются особенности программной реализации и экспериментальной апробации анализатора широкополосных сигналов стандарта LTE применительно к задаче определения местоположения ближайшей БС.

### Обзор существующих технических решений по анализу сигналов стандарта LTE

Выполним обзор существующих комплексов радиоконтроля, реализующих анализ сигналов стандарта LTE, основываясь на анализе открытых отечественных источников.

1. Портативный комплекс радиоконтроля «Омега-М5» [15] предназначен для идентификации и фиксации соединений между базовой и мобильной станциями, работающими в сетях стандартов GSM (*аббр. от англ. Global System for Mobile Communications* — глобальная система мобильной связи), UMTS (*аббр. от англ. Universal Mobile Telecommunications System* — универсальная система мобильной связи) и LTE. Применительно к сетям LTE комплекс «Омега-М5» может осуществлять сканирование диапазонов частот 832–862, 880–915, 1710–1785, 1900–1920, 2300–2400, 2500–2570, 2570–2620 МГц, которые соответствуют диапазонам В3, В7, В8, В20, В33, В38, В40 в направлении UL (*аббр. от англ. Uplink* — восходящая линия связи) с частотным дуплексом (FDD, *аббр. от англ. Frequency Division Duplex*), или в направлениях UL и DL (*аббр. от англ. Downlink* — нисходящая линия связи) с временным дуплексом (TDD, *аббр. от англ. Time Division Duplex*) [16]. Также комплекс способен имитировать работу БС для перехвата трафика абонентов.

2. Комплекс радиоконтроля «Призрак» [17] позволяет распознавать и записывать фрагменты радиосигнала в диапазоне частот 0,01–12 000 МГц при анализе сигналов стандартов GSM, EDGE (*аббр. от англ. Enhanced Data Rates for GSM Evolution* — повышенная скорость передачи данных для стандарта GSM), UMTS, HSDPA (*аббр. от англ. High-Speed Downlink Packet Access* — высокоскоростной пакетный доступ в нисходящей линии связи), LTE-A (*аббр. от англ. LTE Advanced* — улучшение стандарта LTE), IS-95 (*аббр. от англ. Interim Standard 95* — временный стандарт 1995 г.). Комплекс имеет возможность отправки записанных фрагментов радиосигнала по протоколу WAV (*аббр. от англ. Waveform Audio File Format* — формат файла для хранения цифрового сигнала) на автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора. В соответствии с распознанными параметрами сигнала (рабочей частотой, видом модуляции, символьной скоростью и др.) комплекс определяет стандарт связи из заранее подготовленной справочной информации.

3. Анализатор спектра «FSH4» [18] создан для проведения контрольно-измерительных работ при обслуживании БС. Кроме того, применение его вместе с измерительным программным комплексом «FSH-K50E» в диапазоне частот 15–4000 МГц позволяет производить измерение параметров сигналов стандарта LTE, в числе которых коэффициент вектора ошибок каждого в отдельности канала управления, отображение на сигнальном созвездии принятых символов, определение физических идентификаторов находящихся поблизости БС.

Несмотря на разные сферы применения описанных комплексов, они имеют схожую функциональность, заключающуюся в обнаружении и записи сигналов LTE из радиоэфира. Также рассмотренные комплексы имеют разделение на аппаратный радиоприемник и программный модуль цифровой обработки сигналов. В отличие от анализатора спектра «FSH4», который используется в сетях связи общего пользования, подробной информации о комплексах «Омега-М5» и «Призрак» в открытом доступе недостаточно. Однако основные особенности работы этих комплексов, отмеченные выше, позволяют сформулировать обобщенные задачи, которые должен решать анализатор сигналов стандарта LTE: 1) запись и последующая отправка фрагментов радиоэфира на АРМ; 2) нахождение в записи радиоэфира сигналов, излучаемых БС стандарта LTE; 3) определение сетевых идентификаторов БС стандарта LTE; 4) запрос в базу данных (БД) на извлечение местоположения БС стандарта LTE.

### Обоснование выбора программной среды разработки анализатора сигналов стандарта LTE

На основе сформулированных выше обобщенных задач выполним далее обоснование выбора программной среды разработки анализатора сигналов стандарта LTE применительно к задаче определения местоположения ближайшей БС. Исходными данными для выбора являются следующие факторы: во-первых, в качестве БД местоположений БС будем использовать БД открытого проекта OpenCellID [19]; во-вторых, разработку и экспериментальную апробацию сигналов будем проводить для имеющейся в наличии платы SDR USRP B210 [20] компании Ettus Research.

Компания Ettus Research предоставляет согласно свободной лицензии GPL (*аббр. от англ. General Public License*) драйвер UHD (*аббр. от англ. USRP Hardware Driver*) для работы с платами USRP [21] на языках программирования C, Python, а также интерфейсы для популярных программных сред разработки LabVIEW [22], MATLAB [23] и GNU Radio [24]. Рассмотрим особенности перечисленных программных сред.

Программы в средах разработки GNU Radio и LabVIEW создаются посредством описания их графических блок-схем, которые могут состоять как из готовых блоков, распространяемых вместе со средой, так и определенных пользователем и написанных на языках программирования Python и C++ для GNU Radio, а также MATLAB, C и C# для LabVIEW. В среде MATLAB, в отличие от остальных сред разработки, программа анализа сигналов может быть полностью создана на текстовом языке программирования.

Среда LabVIEW предоставляет средства преобразования созданных блок-схем в отдельные исполняемые файлы, не зависящие от среды и запускаемые вне ее, только с условием установленной на компьютере библиотеки «LabVIEW Runtime Engine» [25]. В среде GNU Radio после описания блок-схемы программы генерируется скрипт на языке программирования Python, а значит созданная программа далее не зависит от используемой при ее написании среды. В MATLAB существует возможность генерации исходного кода на других языках программирования с помощью пакетов «MATLAB Coder» [26] и «HDL Coder» [27].

Рассматривая остальные возможности, кроме автоматической генерации кода, отметим, что при разработке в средах LabVIEW и GNU Radio объем работ увеличивается за счет последующего описания взаимодействия блоков на целевом языке, в случае же среды MATLAB этот этап происходит одновременно с написанием программы, и далее остается только решить задачу переноса алгоритма на синтаксис другого языка программирования.

Рассмотрим языки программирования, использующиеся в этих средах. Все они являются кроссплатформенными: C и C++ — за счет использования компиляторов, написанных для различных аппаратных платформ; C#, Python и MATLAB — за счет использования сред выполнения, написанных для разных операционных систем. Их можно разделить на две группы по виду типизации: 1) статическая: C, C++, C#; 2) динамическая: Python, MATLAB.

Написание и отладка исходного кода на статически типизированных языках требует больше времени, код становится более сложным и объемным. Динамически типизированные языки обладают менее объемным синтаксисом, увеличивают скорость разработки алгоритмов, избавляют пользователя от обязанности вывода типов данных. Но написанные на таких языках программы исполняются медленнее из-за необходимости производить трансляцию кода во время выполнения; помимо этого, также увеличивается вероятность ошибок из-за неправильного вывода типов переменных. Несмотря на описанные недостатки языков с динамической типизацией, выберем их из-за преимуществ в скорости разработки.

Python и MATLAB являются интерпретируемыми языками, поддерживающими множество парадигм программирования. MATLAB имеет объемную стандартную библиотеку, включающую большинство математических функций и операторов, множество функций графического вывода и создания документации, а также множество дополнительных пакетов, призванных решать узкоспециализированные задачи. В отличие от MATLAB, для Python существуют разные интерпретаторы, функциональность языка обеспечивается наличием множества отдельно поставляемых библиотек. Существенное различие между этими языками заключается в том, что MATLAB является проприетарным языком с собственной средой разработки, а Python — свободно распространяемым языком.

Реализация процедур обработки сигналов из примитивных функций как на языке MATLAB, так и Python, позволяет в дальнейшем перейти к их реализации на языке HDL (*аббр. от англ.* Hardware Description Language — язык описания аппаратуры) программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Аргументом в пользу выбора среды разработки MATLAB является наличие встроенных пакетов расширения, в том числе пакета расширения LTE Toolbox: сравнивая самостоятельно реализованные из примитивных функций программные модули со встроенными высокоуровневыми функциями пакета расширения можно верифицировать корректность их реализации.

### Формализация процедур обработки широкополосных сигналов стандарта LTE

Для извлечения местоположения БС из БД OpenCellID при отправке запроса следует сообщить следующие идентификаторы, принадлежащие БС: мобильный код страны (MCC, *аббр. от англ.* Mobile Country Code), код мобильной сети (MNC, *аббр. от англ.* Mobile Network Code), код региона местоположения (LAC, *аббр. от англ.* Location Area Code), идентификатор соты (CID, *аббр. от англ.* Cell Identity) [19]. Эти идентификаторы передаются БС в поле cellAccessRelatedInfo блока системной информации SIB1 (*аббр. от англ.* System Information Block Type 1) (таблица 1), который передается в сообщении BCCH-DL-SCH-Message [28] в логическом канале BCCH (*аббр. от англ.* Broadcast Control Channel — широкополосный канал управления) через транспортный канал DL-SCH (*аббр. от англ.* Downlink Shared Channel — транспортный канал с разделением пользователей). Расписание передачи SIB1 определяется системным номером кадра (SFN, *аббр. от англ.* System Frame Number) [28], который передается в блоке MIB (*аббр. от англ.* Master Information Block — блок системной информации) (таблица 2), являющегося частью сообщения BCCH-BCH-Message [28], в канале BCCH через транспортный канал BCH (*аббр. от англ.* Broadcast Channel).

Формализуем далее процедуры формирования, передачи, приема и обработки широкополосных сигналов в транспортных и физических каналах. Данная формализация необходима для последующей программной реализации в среде MATLAB из примитивных функций. После формирования блоков MIB, SIB1 они передаются в транспортные каналы BCH и DL-SCH. Первой процедурой является вычисление и прикрепление CRC-суммы (*аббр. от англ.* Cyclic Redundancy Check — циклический избыточный код). Для канала BCH используется полином генератора  $g_{CRC16}$  [29], после вычисления CRC-суммы она дополнительно скремблируется в зависимости от количества используемых БС антенных портов [29]: для одного антенного порта скремблирование отсутствует, для двух портов используется единичная последовательность, для четырех портов — последовательность чередующихся 0 и 1. В канале DL-SCH используется генератор с полиномом  $g_{CRC24A}$  [29]. Значения указанных полиномов приводятся ниже [29]:

- 1)  $g_{CRC16} = 10001000000100001$ ;
- 2)  $g_{CRC24A} = 1100001100100110011111011$ .

Таблица 1. Структура поля cellAccessRelatedInfo сообщения SIB1 [28]

Поле	Описание
plmn-IdentityList	Набор идентификаторов сетей, которым принадлежит БС
trackingAreaCode	Код зоны слежения
cellIdentity	Идентификатор БС
cellBarred	Флаг доступности БС
intraFreqReselection	Флаг доступности реселекции в другие соты, работающие с такой же частотой
csg-Indication	Флаг закрытой абонентской группы
csg-Identity	Идентификатор закрытой абонентской группы

Таблица 2. Структура сообщения MIB [28]

Поле	Описание
dl-Bandwidth	Ширина канала
phich-Config	Конфигурация физического канала PHICH (аббр. от англ. Physical Hybrid ARQ Indicator Channel — физический канал для передачи HARQ-ACK)
System Frame Number	Системный номер кадра
spare	Заполняющие биты

Поскольку в канале DL-SCH передается информация, включающая данные каналов трафика, объем обрабатываемого транспортного блока может достигать больших размеров. Для идентичности дальнейшей обработки вне зависимости от размера транспортного блока его сегментируют на фрагменты длиной 6144 бит [29]. Поскольку максимальный размер блока системной информации ограничен величиной 2216 бит, то процессом сегментирования можно пренебречь. Причиной такого ограничения служит максимальный размер транспортного блока (TBS, аббр. от англ. Transport Block Size), который может быть передан в блоках DCI (аббр. от англ. Downlink Control Information — управляющая информация для нисходящей линии связи), которые будут рассмотрены далее.

Следующим этапом обработки является канальное кодирование. Для канала BCH применяется сверточный кодер, для канала DL-SCH — турбокодер [29]; скорости обоих кодеров равны 1/3.

Перед началом обработки сдвиговой регистр сверточного кодера инициализируется значениями последних шести бит кодового блока. Размер регистра составляет 7 бит. Структурная схема кодера представлена на рисунке 1. Значения полиномов сумматоров кодера:

- 1)  $G_0 = 1011011$ ;
- 2)  $G_1 = 1111001$ ;
- 3)  $G_2 = 1110101$ .

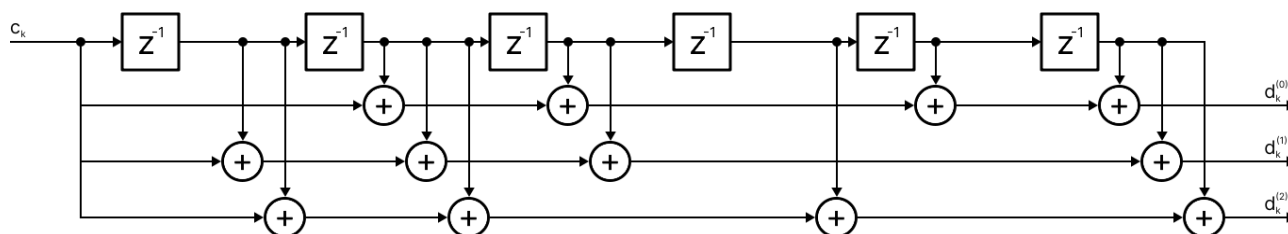


Рис. 1. Структурная схема сверточного кодера [29]

Турбокодер (рисунок 2) состоит из двух рекурсивных сверточных кодеров, включенных параллельно, перед вторым кодером используется внутренний перемежитель. Код генерируется согласно следующим полиномам:

- 1) прямой ветви:  $g_1 = 1101$ ;
- 2) обратной ветви:  $g_0 = 1011$ .



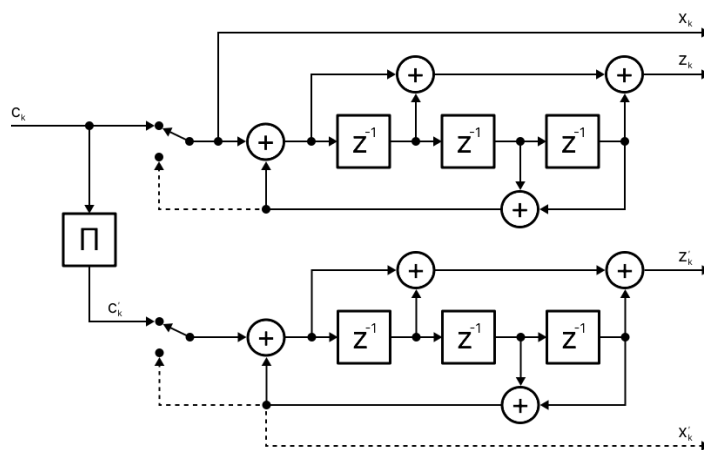


Рис. 2. Структурная схема турбокодера [29]

Сдвиговый регистр в начальный и конечный моменты времени заполнен нулевой последовательностью. Это сделано для обеспечения работоспособности декодера, поскольку для работы ему необходимо знать начальное и конечное состояние кодера. Чтобы обеспечить обнуление регистров после окончания кодирования, на их входы подаются последние три выходных бита.

Внутренний перемежитель перед вторым элементарным кодером вычисляет номер выходного бита  $\Pi(i)$  по номеру входного бита  $i$  согласно выражению:

$$\Pi(i) = (f_1 i + f_2 i^2) \bmod K, \quad (1)$$

где параметры  $f_1$  и  $f_2$  зависят от длины блока информации  $K$  и определяются в соответствии с [29].

Завершающий этап обработки блоков информации в транспортных каналах производит модуль задания скорости. Он состоит из блоковых перемежителей, блока преобразования параллельного кода в последовательный и циклического буфера.

Блоковыми перемежителями обрабатываются все три выходные последовательности кодера вне зависимости от его типа. Перемежитель представляется в виде матрицы с 32 столбцами и изменяемым количеством строк  $R_{subblock}^{TC}$  в зависимости от длины входной последовательности. Входная последовательность записывается в перемежитель по строкам и дополняется пустыми битами в случае, если ее длина не совпадает с количеством элементов матрицы. Далее перемежитель выполняет перестановку столбцов по правилам сортировки, определенным в [29] для турбокодера и сверточного кодера. Чтение данных на выходе перемежителя осуществляется по столбцам.

После блоковых перемежителей данные поступают на вход блока преобразования параллельного кода в последовательный, который в случае использования сверточного кодера отправляет далее полученные битовые потоки без их изменения, а в случае использования турбокодера дополнительно прореживает второй поток элементами третьего.

Циклический буфер задает скорость кодового слова, выкалывая пустые биты, которые появились в блоковых перемежителях, и повторяя получившийся блок данных, пока длина кодового слова не достигнет требуемого размера. В случае использования турбокодера номер первого символа  $k_0$ , с которого начинается формирование кодового слова, вычисляется по формуле [29]:

$$k_0 = R_{subblock}^{TC} \left( 2 \left\lceil \frac{N_{cb}}{8R_{subblock}^{TC}} \right\rceil rv_{idx} + 2 \right), \quad (2)$$

где  $N_{cb}$  — размер буфера, выделенного для хранения сегмента блока информации;  $rv_{idx}$  — индекс номера повтора передачи сообщения.

Сформированные в транспортных каналах кодовые слова передаются в физические каналы. Канал BCH передается в канал PBCH (аббр. от англ. Physical Broadcast Channel — физический широковещательный канал), канал DL-SCH — в канал PDSCH (аббр. от англ. Physical Downlink Shared Channel — физический канал с разделением пользователей) [29].



размещаются в первых четырех символах 1-го слота каждого из четырех последовательных кадров в шести центральных ресурсных блоках (РБ), игнорируя поднесущие, которые могут быть отданы опорным сигналам CRS (*аббр. от англ.* Cell-Specific Reference Signal — опорные сигналы, уникальные для соты) при использовании четырех антенных портов [30].

Последней процедурой, выполняемой в физических каналах перед переносом сигнала на радиочастоту, является генерация OFDM-символов (*аббр. от англ.* Orthogonal Frequency-Division Multiplexing — мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов). Для расстояния между поднесущими  $\Delta f = 15$  кГц длина символа составляет  $2048$  временных интервалов  $T_s$ , длина нормального циклического префикса —  $160 T_s$  для 1-го символа слота и  $144 T_s$  для остальных символов, расширенного —  $512 T_s$  для всех символов слота [30]. Генерация OFDM-символов осуществляется для всех поднесущих, кроме центральной ( $k \neq 0$ ) по формуле:

$$s_l^{(p)}(t) = \sum_{k=-\lfloor N_{RB}^{DL} N_{SC}^{RB} / 2 \rfloor}^{\lfloor N_{RB}^{DL} N_{SC}^{RB} / 2 \rfloor} a_{k,l}^{(p)} e^{j2\pi k \Delta f (t - N_{CP,l} T_s)}, \quad (4)$$

где  $p$  — номер антенного порта;  $l$  — номер символа в слоте;  $k$  — номер поднесущей;  $N_{RB}^{DL}$  — ширина канала, выраженная в количестве используемых РБ;  $N_{SC}^{RB}$  — количество поднесущих в одном РБ.

Для возможности подключения и работы пользователей в радиосети БС передает дополнительные сообщения и сигналы: опорные сигналы PSS (*аббр. от англ.* Primary Synchronization Signal — первичный сигнал синхронизации), SSS (*аббр. от англ.* Secondary Synchronization Signal — вторичный сигнал синхронизации), а также специальные блоки данных управляющей информации CFI (*аббр. от англ.* Control Format Indicator — индикатор формата управляющей информации), HI (*аббр. от англ.* Hybrid Automatic Repeat Request Indicator — индикатор автоматического запроса повтора передачи), DCI, CRS. Рассмотрим далее особенности их формирования, передачи, приема и обработки.

DCI — блок управляющей информации, в котором передаются параметры, требуемые для обработки каналов PDSCH и DL-SCH. Поскольку из всех типов информации, которые могут передаваться по каналам данных, интерес представляет только системная, передаваемая с SI-RNTI (*аббр. от англ.* System Information Radio Network Temporary Identifier — идентификатор радиосоединения для передачи системной информации), то достаточно рассмотреть форматы 1A и 1C (таблицы 3 и 4).

Таблица 3. Структура блока DCI формата 1A для SI-RNTI [29]

Поле	Размер поля, бит
Carrier Indicator (Индикатор несущей)	0
Differentiation Flag (Флаг различения форматов)	1
Localized / Distributed VRB Assignment Flag (Флаг типа распределения РБ)	1
Resource Block Assignment (Размещение РБ)	$\left\lceil \log_2 \left( \frac{N_{RB}^{DL}}{2} (N_{RB}^{DL} + 1) \right) \right\rceil$
Modulation and Coding Scheme (Индекс модуляционных и кодирующих схем)	5
HARQ Process Number (Номер передачи)	3 (FDD) / 4 (TDD)
New Data Indicator (Индикатор новой передачи)	1
Redundancy Version (Версия передачи)	2
TPC Command for PUSCH (Команда управления мощностью)	2
Downlink Assignment Index (Индекс передачи)	0 (FDD) / 2 (TDD)

Размер поля «Carrier Indicator» равен 0 бит согласно [32]. Если поле «Differentiation Flag» равно 0, то данный блок имеет формат 0, иначе — 1A. Поле «Localized / Distributed VRB Assignment Flag» является индикатором используемого типа размещения виртуальных РБ (VRB, *аббр. от англ.* Virtual Resource Block): 0 — локализованное, 1 — распределенное. При использовании распределенного размещения VRB и ширине канала  $N_{RB}^{DL} \geq 50$  в старшем бите поля «Resource Block Assignment» указывается используемое значение разнесения РБ  $N_{gap}$ : 0 —  $N_{gap} = N_{gap,1}$ , 1 —  $N_{gap} = N_{gap,2}$ . В поле

«Modulation and Coding Scheme» указывается индекс MCS, который используется для определения порядка модуляционной схемы и индекса TBS [32]. Размер поля «HARQ Process Number» зависит от используемого типа дуплекса: 3 бит для FDD, 4 бит — TDD. Старший бит поля «TPC Command for PUCCH» зарезервирован, а в младшем бите указывается количество физических РБ (PRB, *аббр. от англ.* Physical Resource Block)  $N_{PRB}$  для определения размера информационного блока TBS, для которого формируется этот DCI, по [32]: 0 —  $N_{PRB} = 2$ , 1 —  $N_{PRB} = 3$ . Размер поля «Downlink Assignment Index» зависит от используемого типа дуплекса [29]: 0 бит при FDD, 2 бит при TDD.

Если размер сформированного блока DCI формата 1A равен одному из размеров, указанных в [29], то он дополняется одним заполняющим битом. Если размер с учетом дополнительного бита меньше размера блока DCI формата 0, который определяется по [29], то блок дополняется заполняющими битами, пока размеры блоков DCI обоих форматов не совпадут [29].

Таблица 4. Структура блока DCI формата 1C для SI-RNTI [29]

Поле	Размер поля, бит
$N_{gap}$ (Номер набора величин разнесения РБ)	1
Localized / Distributed VRB Assignment Flag (Флаг типа распределения РБ)	$\left\lceil \log_2 \left( \left\lfloor \frac{N_{VRB, gap1}^{DL}}{N_{RB}^{step}} \right\rfloor \times \left( \left\lfloor \frac{N_{VRB, gap1}^{DL}}{N_{RB}^{step}} \right\rfloor + 1 \right) / 2 \right) \right\rceil$
Modulation and Coding Scheme (Индекс модуляционных и кодирующих схем)	5

В DCI формата 1C передается информация только о распределенном размещении VRB. Поле « $N_{gap}$ » при ширине канала  $N_{RB}^{DL} < 50$  отсутствует. Размер поля «Localized / Distributed VRB Assignment Flag» зависит от шага между РБ  $N_{RB}^{step}$ , который равен 4 при  $N_{RB}^{DL} \geq 50$  и 2 в остальных случаях [32]. По индексу MCS аналогично DCI формата 1A находится индекс TBS, но TBS определяется по [32].

В обоих форматах DCI используется тип размещения ресурсов 2 [32], в котором набор виртуальных РБ VRB передается с помощью индикатора ресурсов (RIV, *аббр. от англ.* Resource Indication Value), который формируется из значений номера первого VRB  $RB_{start}$  и количества выделяемых последовательных VRB  $L_{CRBs}$ :

- 1) при  $(L_{CRBs} - 1) \leq \left\lfloor \frac{N_{RB}^{DL}}{2} \right\rfloor$ :  $RIV = N_{RB}^{DL} (L_{CRBs} - 1) + RB_{start}$ ;
- 2) при  $(L_{CRBs} - 1) > \left\lfloor \frac{N_{RB}^{DL}}{2} \right\rfloor$ :  $RIV = N_{RB}^{DL} (N_{RB}^{DL} - L_{CRBs} + 1) + (N_{RB}^{DL} - 1 - RB_{start})$ .

Для DCI формата 1C параметры  $L_{CRBs}$ ,  $RB_{start}$  и  $N_{RB}^{DL}$  дополнительно делятся на  $N_{RB}^{step}$ .

После формирования блока информации к нему прикрепляется сумма CRC-16, которая дополнительно скремблируется значением выбранного RNTI. При кодировании используется сверточный код [29]. Поскольку DCI форматов 1A и 1C размещаются в общем пространстве поиска [32], то для них используется 4-й или 8-й уровень агрегации [32], другими словами, размер их кодового слова составляет 4 или 8 CCE (*аббр. от англ.* Control Channel Element — элемент канала управления), что означает 288 или 576 бит [30]. Согласно [29] DCI передаются по физическому каналу PDCCH (*аббр. от англ.* Physical Downlink Control Channel — физический канал управления в нисходящей линии связи).

В канале PDCCH набор кодовых слов мультиплексируется, после чего скремблируется. Для запуска генератора используется  $c_{init} = \left\lfloor \frac{n_s}{2} \right\rfloor \times 2^9 + N_{ID}^{cell}$ .

Для модуляции используется QPSK [30]. Для прекодирования используется такое же количество антенных портов, как и для передачи PBCH. Для размещения канала PDCCH в ресурсной сетке используются все группы ресурсных элементов (REG, *аббр. от англ.* Resource Element Group), оставшиеся после размещения каналов PCFICH (*аббр. от англ.* Physical Control Format Indicator Channel — физический канал для передачи индикатора CFI) и PHICH в пространстве управления. Перед размещением элементы REG перемежаются, используя блочный перемежитель для сверточного кода, на вход которого вместо битовой последовательности подаются номера REG. После перемежения и удаления пустых элементов REG циклически сдвигаются на величину  $N_{ID}^{cell}$ .

CFI — индикатор, указывающий размер пространства управления: количество символов в подкадре, которые выделены для передачи канала PDCCH. CFI может принимать значения 1, 2 и 3, для

канала шириной 6 РБ все значения увеличены на 1. Кодовые слова определяются блочным кодом длиной 32 бита и указаны в таблице 5.

Таблица 5. Кодовые слова для CFI [29]

CFI	Кодовое слово
1	01101101101101101101101101101101
2	10110110110110110110110110110110
3	11011011011011011011011011011011

Кодовые слова передаются в физический канал PCFICH [29]. Для инициализации генератора скремблирующей последовательности используется значение  $c_{init} = \left(\left\lfloor \frac{n_s}{2} \right\rfloor + 1\right) (2N_{ID}^{cell} + 1)2^9 + N_{ID}^{cell}$ .

Используется модуляционная схема QPSK [30]. Для прекодирования используется такое же количество антенных портов, как и для передачи PBCH. Символы размещаются в четырех REG. Номер первой поднесущей  $k$  REG номер  $n$  вычисляется согласно:

$$k(n) = \left(\frac{N_{sc}^{RB}}{2} (N_{ID}^{cell} \bmod 2N_{RB}^{DL}) + \left\lfloor \frac{nN_{RB}^{DL}}{2} \right\rfloor \frac{N_{sc}^{RB}}{2}\right) \bmod N_{RB}^{DL} N_{sc}^{RB}. \quad (5)$$

HI – индикатор HARQ-подтверждений. Поскольку в разрабатываемом анализаторе взаимодействия с БС на передачу и прием пользовательских данных производиться не будет, то обработку HI можно далее не рассматривать. Однако количество и расположение ресурсных элементов (РЭ), выделяемых для передач PDCCH, зависят от размещения канала PHICH, в котором передается HI. Поэтому далее необходимо рассмотреть особенности размещения символов PHICH в ресурсной сетке.

Каналы PHICH передаются группами. При использовании типа дуплекса TDD из-за различного расписания DL и UL передач в кадре типа структуры 2 [30] количество групп PHICH  $N_{PHICH}^{group}$  зависит от коэффициента масштабирования  $m_i$  для номера подкадра  $i$  [30], для типа дуплекса FDD  $m_i$  равен 1 для всех подкадров при использовании нормального циклического префикса и 2 при использовании расширенного префикса.  $N_{PHICH}^{group}$  также зависит от количества, выделяемых для передачи PHICH, ресурсов  $N_g$ , которое передается в блоке MIB в поле phich-Resource структуры PHICH-Config [28], и вычисляется согласно выражению:

$$N_{PHICH}^{group} = m_i \left\lfloor N_g \frac{N_{RB}^{DL}}{8} \right\rfloor. \quad (6)$$

Всего в одном подкадре есть три блока PHICH, в каждом из которых содержится  $N_{PHICH}^{group}$  групп. Номер символа  $l'_i$ , в котором размещается блок номер  $i$ , зависит от продолжительности передачи PHICH, передаваемой в PHICH-Config в поле PHICH-Duration: для нормальной продолжительности все блоки передаются в первом символе подкадра; для расширенной продолжительности существует несколько вариантов, но, учитывая, что SIB1 передается только в 5-м подкадре [28],  $i$  и  $l'_i$  совпадают. Символы PHICH размещаются только в REG, оставшихся после размещения канала PCFICH в ресурсной сетке. Номер REG  $\bar{n}_i$  вычисляется по следующей формуле:

$$\bar{n}_i = \left\lfloor N_{ID}^{cell} \frac{n_{l'_i}}{n_1} \right\rfloor + m' + \left\lfloor i \frac{n_{l'_i}}{3} \right\rfloor, \quad (7)$$

где  $n_{l'_i}$  – количество доступных REG в символе  $l'_i$ ;  $n_1$  – количество доступных REG в 1-м символе подкадра;  $m'$  – номер группы PHICH.

Опорные сигналы CRS предназначены для выравнивания характеристики (реакции) канала при его обработке в приемнике. Поскольку требуется прочитать системную информацию, которая передается в направлении DL, то из всех типов опорных сигналов достаточно рассмотреть CRS.

CRS состоит из элементов псевдослучайной последовательности Голда, которая инициализируется значением  $c_{init}$  [30]:

$$c_{init} = (7(n_s + 1) + l + 1)(2N_{ID}^{cell} + 1)2^{10} + 2N_{ID}^{cell} + N_{CP}, \quad (8)$$

где  $N_{CP}$  — индикатор циклического префикса, который равен 1 для нормального префикса и 0 для расширенного.

Последовательность Голда модулируется с QPSK: ее четные элементы передаются в синфазной, а нечетные — в квадратурной составляющей сигнала. CRS может одновременно передаваться по одному, двум или четырем антенным портам. Размещение модулированной последовательности в ресурсной сетке и инициализирующее значение для ее генерации зависят от номера символа  $l$ , который, в свою очередь, зависит от номера антенного порта  $p$ :

$$l = \begin{cases} 0, N_{symb}^{DL} - 3 & \text{при } p \in \{0,1\} \\ 1 & \text{при } p \in \{2,3\} \end{cases}, \quad (9)$$

где  $N_{symb}^{DL}$  — количество символов в слоте: для нормального циклического префикса — 7 символов, для расширенного — 6 [30];  $p$  — номер антенного порта.

Номер поднесущей  $k$  для элемента  $m$  определяется согласно выражению:

$$k = 6m + (v + v_{shift}) \bmod 6, \quad (10)$$

где  $v$  и  $v_{shift}$  — частотные сдвиги, которые равны:

$$v = \begin{cases} 0 & \text{при } p = 0 \text{ и } l = 0 \\ 3 & \text{при } p = 0 \text{ и } l \neq 0 \\ 3 & \text{при } p = 1 \text{ и } l = 0 \\ 0 & \text{при } p = 1 \text{ и } l \neq 0 \\ 3(n_s \bmod 2) & \text{при } p = 2 \\ 3 + 3(n_s \bmod 2) & \text{при } p = 3 \end{cases}, \quad (11)$$

$$v_{shift} = N_{ID}^{cell} \bmod 6.$$

Пример размещения CRS в ресурсной сетке одного РБ, передаваемых по четырем антенным портам, для нормального циклического префикса и  $N_{ID}^{cell} = 5$  приведен на рисунке 4.

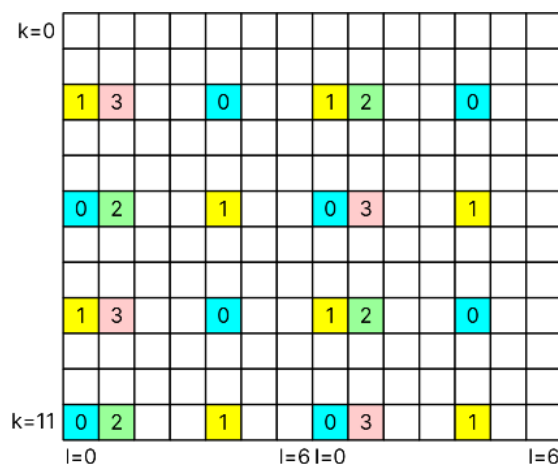


Рис. 4. Размещение CRS в ресурсной сетке [30]

Сигналы PSS и SSS предназначены для обеспечения синхронизации передач БС и UE, с их помощью находится PCI, который используется в том числе для инициализации генератора последовательностей Голда и отыскания частотных сдвигов различных физических каналов.

Первичный сигнал синхронизации PSS представляет собой последовательность Задова – Чу  $d_u(n)$  длиной 62 символа, которая равна:

$$d_u(n) = \begin{cases} e^{-j\frac{\pi u n(n+1)}{63}} & \text{при } 0 < n \leq 30 \\ e^{-j\frac{\pi u (n+1)(n+2)}{63}} & \text{при } 31 < n \leq 61 \end{cases}, \quad (12)$$

где  $u$  – корень последовательности, определяемый физическим идентификатором соты внутри группы сот  $N_{ID}^{(2)}$  (таблица 6).

Таблица 6. Корни последовательности Задова – Чу [30]

$N_{ID}^{(2)}$	Корень $u$
0	25
1	29
2	34

При использовании типа дуплекса FDD PSS передается в последнем символе 0-го и 10-го слотов каждого кадра на 62 центральных поднесущих. При использовании типа дуплекса TDD PSS размещается в третьем символе 2-го и 12-го слотов.

SSS является скремблированной последовательностью  $d(n)$ , состоящей из двух перемеженных между собой последовательностей длиной 31 символ):

$$d(2n) = \begin{cases} s_0^{(m_0)}(n)c_0(n) & \text{в подкадрах 0,1} \\ s_1^{(m_1)}(n)c_0(n) & \text{в подкадрах 5,6} \end{cases}, \quad (13)$$

$$d(2n + 1) = \begin{cases} s_1^{(m_1)}(n)c_1(n)z_1^{(m_0)} & \text{в подкадрах 0,1} \\ s_0^{(m_0)}(n)c_1(n)z_1^{(m_1)} & \text{в подкадрах 5,6} \end{cases}.$$

Эти последовательности состоят из комбинации модулированных BPSK M-последовательностей 5-го порядка, задающие полиномы и циклические сдвиги которых указаны в таблице 7. Величины сдвигов зависят от индексов  $m_0$  и  $m_1$ , значения которых приведены в [30] и зависят от физического идентификатора группы сот  $N_{ID}^{(1)}$ . Сдвиговые регистры генераторов M-последовательностей инициализируются цифровым импульсом.

Таблица 7. Параметры M-последовательностей

M-последовательность	Полином	Сдвиг
$s_0^{(m_0)}(n)$	100101	$m_0$
$s_1^{(m_1)}(n)$		$m_1$
$c_0(n)$	101001	$N_{ID}^{(2)}$
$c_1(n)$		$N_{ID}^{(2)} + 3$
$z_1^{(m_0)}(n)$	110111	$m_0 \bmod 8$
$z_1^{(m_1)}(n)$		$m_1 \bmod 8$

При использовании типа дуплекса FDD SSS передается в предпоследнем символе 0-го и 10-го слотов каждого кадра на 62 центральных поднесущих, для TDD SSS передается в последнем символе 1-го и 11-го слотов.

Для передачи сигналов синхронизации выделяются 6 центральных РБ, но, исходя из размеров этих сигналов, 10 крайних поднесущих не используются и также запрещены к использованию другими каналами.

PCI вычисляется согласно выражению [30]:

$$N_{ID}^{cell} = 3N_{ID}^{(1)} + N_{ID}^{(2)}. \quad (14)$$

Далее опишем особенности программной реализации и экспериментальной апробации рассмотренных выше процедур.

### Особенности программной реализации анализатора сигналов стандарта LTE

Блок-схема программной реализации анализатора сигналов стандарта LTE, выполняющего определение местоположения ближайшей БС, представлена на рисунке 5.

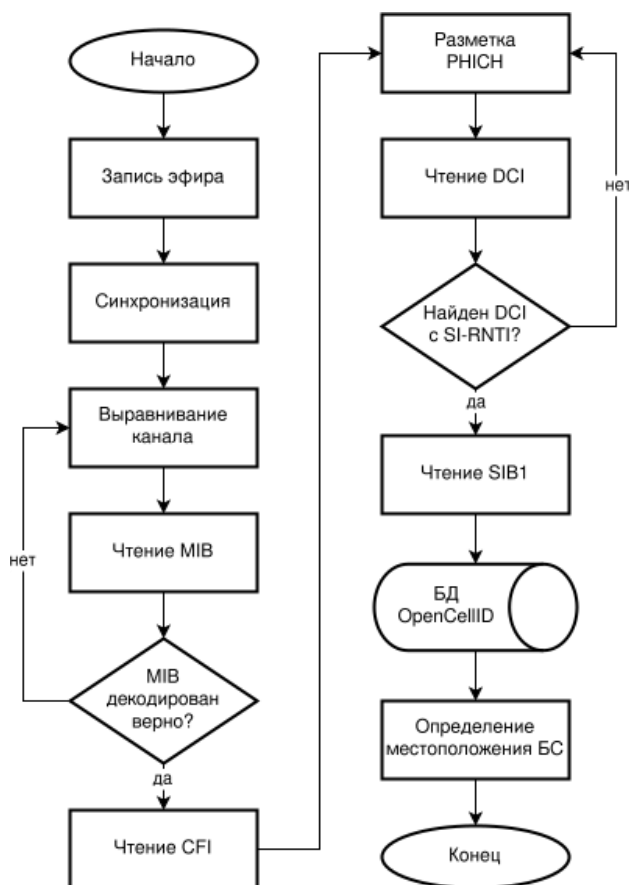


Рис. 5. Блок-схема алгоритма определения местоположения БС

Первым этапом программной реализации анализа сигналов стандарта LTE является конфигурация платы USRP B210 и запись радиоэфира. Поскольку распределение частотных каналов сетей LTE, принадлежащих операторам сотовой связи, заранее неизвестно, то номер частоты канала EARFCN (аббр. от англ. E-UTRA Absolute Radio Frequency Channel Number – номер радиочастотного канала в сети E-UTRA) будем получать с помощью внешних программ, таких как G-NetTrack [33]. Преобразование значения EARFCN в абсолютное значение частоты  $F_{DL}$  будем осуществлять согласно выражению [16]:

$$F_{DL} = F_{DL_{low}} + 0,1(N_{DL} - N_{Offs-DL}), \quad (15)$$



где  $F_{DL\_low}$  — нижняя частота диапазона;  $N_{DL}$  — номер частоты канала EARFCN;  $N_{offs-DL}$  — смещение номера частоты канала  $N_{DL}$ .

Поскольку размещение сигналов синхронизации PSS и SSS канала PHICH зависит от типа дуплекса, то будем определять его по номеру диапазона в соответствии с [16]. Для корректной записи эфира частота дискретизации  $f_d$  должна соответствовать временной единице  $T_s$  [30]:

$$f_d = \frac{1}{T_s} = 15000 \times 2048 = 30,72 \text{ МГц.} \quad (16)$$

Поскольку уменьшать частоту дискретизации не требуется, то коэффициент децимации примем равным 1. Для экономии объема памяти компьютера, выделяемой для хранения записи, примем длительность записи равной 20 кадрам: 0,2 с. Параметры записи представлены в таблице 8.

Таблица 8. Параметры записи эфира

Параметр	Значение
Частота дискретизации, МГц	30,72
Коэффициент децимации	1
Количество отсчетов в 1 кадре	2048
Длительность записи, с	0,2

Первым этапом подключения устройства UE к БС сети является синхронизация с ней — нахождение сигналов синхронизации в эфире и вычисление по ним PCI.

Для поиска PSS из всей записи эфира будем обрабатывать фрагмент длительностью 10 кадров, в течение которого состояние среды передачи может множество раз изменяться, а значит, шанс удачного нахождения истинного сигнала PSS будет высок. Вычисляя взаимную корреляционную функцию (ВКФ) этого промежутка с OFDM-символами, сгенерированными со всеми возможными корнями последовательностей Задова — Чу, по ее максимуму найдем физический идентификатор соты внутри группы сот  $N_{ID}^{(2)}$  и сдвиг от начала записи до начала символа слота, в котором передавался PSS. Для того, чтобы быть уверенными в том, что в выбранном отсчете действительно находится PSS, примем минимум пик-фактора ВКФ равным 2.

Как видно из таблицы 7, M-последовательность  $s(n)$ , из которой состоит сигнал SSS, поочередно сдвигается на величину индексов  $m_0$  и  $m_1$ . По этим индексам находится физический идентификатор группы сот  $N_{ID}^{(1)}$ .

Для этого нужно OFDM-символ принятого сигнала демодулировать и разделить на последовательности четных и нечетных элементов. Затем вычислить ВКФ  $s(n)$  и последовательности нечетных элементов, умноженной на  $c_0(n)$ . По положению максимума ВКФ найти индекс  $m_0$ . Последовательность четных элементов, умноженная на  $c_1(n)$  и  $z_1^{(m_0)}(n)$ , коррелируется с  $s(n)$ . По положению максимума ВКФ находится индекс  $m_1$ . Во избежание ошибок при нахождении индекса  $m_1$  ограничим зону, в которой будет происходить поиск максимума ВКФ диапазоном  $m_0 \pm 7$ .

На следующем этапе приемник анализатора сигналов выполняет выравнивание канала с помощью опорных сигналов CRS, передаваемых БС.

Поскольку изначально количество антенных портов неизвестно, то необходимо произвести перебор доступных значений: 1, 2 или 4 порта. Проверку правильности выбора значения будем осуществлять на этапе чтения блока MIB: если его удалось правильно декодировать, что подтверждается с помощью CRC-суммы, то и количество антенных портов подобрано верно, иначе обработка повторяется со следующим значением.

Умножив принятые CRS на комплексно-сопряженные значения сгенерированных символов, получим реакцию канала в РЭ, в которых они были размещены. Интерполировав значения по частоте на всю ширину канала и по времени на все символы, получим реакцию канала на всей ресурсной сетке. Для уменьшения количества вычислений будем считать ширину канала равной 6 РБ, поскольку именно

столько РБ отводится для размещения символов канала РВСН. Разделив принятые символы на реакцию канала, вычтем ее из принятого сигнала.

Поскольку размещение канала РВСН фиксировано, то для поиска блока МІВ будем считать РЭ первого подкадра. Так как блок МІВ занимает 4 последовательные передачи канала РВСН, для его поиска требуется обработать, как минимум, 7 передач.

После выделения требуемых РЭ, осуществляется их депрекодирование. Для одного антенного порта процедура игнорируется, при использовании двух или четырех антенных портов каждая пара соседних символов преобразовывается согласно следующей формуле:

$$\begin{aligned} x^{(0)}(i) &= \frac{\operatorname{Re}(y(2i)+y(2i+1))}{2} + j \times \frac{\operatorname{Im}(y(2i)-y(2i+1))}{2}, \\ x^{(1)}(i) &= \frac{\operatorname{Re}(y(2i+1)-y(2i))}{2} + j \times \frac{\operatorname{Im}(y(2i)+y(2i+1))}{2}. \end{aligned} \quad (17)$$

Поскольку количество слоев, используемых при передаче канала РВСН, равно количеству антенных портов, то дополнительной обработки на данном этапе не происходит и символы передаются в демодулятор в том же порядке, в котором они считывались из ресурсной сетки.

Для демодуляции будем использовать алгоритм принятия мягких решений в логарифмическом масштабе. Таким образом увеличим точность вычислений за счет того, что в отличие от жестких решений станет доступна для анализа мера надежности принятия решения. Демодулятор принимает решения согласно выражению [34]:

$$LLR(c_i) = \frac{1}{2\sigma_N^2} \left[ \min_{U \in C_i^1} |y - U| - \min_{U \in C_i^0} |y - U| \right], \quad (18)$$

где  $c_i$  — бит  $i$  текущего символа;  $LLR(c_i)$  — принятое решение для бита  $c_i$ ;  $\sigma_N$  — среднеквадратическое отклонение белого Гауссовского шума;  $y$  — принятый символ;  $U$  — символ выбранной модуляционной схемы;  $C_i^j$  — множество символов модуляционной схемы, в которых бит  $c_i$  принимает значение  $j$ .

Далее происходит поиск блока информации МІВ. Поскольку для всех четырех последовательных передач канала РВСН применяются одна скремблирующая последовательность, то процедура поиска будет заключаться в объединении мягких бит четырех соседних передач и попытке их декодирования. Если попытка декодирования окажется неудачной, то со сдвигом, равным одной передаче, процесс будет повторяться.

После осуществления дескремблирования произведем восстановление скорости кодового слова: сложив значения каждого  $k$  бита кодового слова, где  $k$  — 3 размера кодированного блока информации. Промоделировав процесс задания скорости для последовательности номеров элементов и произведя сортировку результата, найдем паттерн перестановок элементов кодированной последовательности.

Следующим этапом является декодирование по алгоритму Витерби [35]. Задачей декодера является вычисление метрик путей как Евклидова расстояния между мягкими входными битами и  $2^k$  возможными состояниями кодера (для используемого в стандарте LTE кодера  $k = 6$ ). В процессе работы декодер формирует  $2^k$  путей между различными состояниями. На каждом шаге путь с наибольшей метрикой последнего перехода из всех путей, перешедших в одно состояние, удаляется. В случае равенства метрик последнего перехода удаляется путь с наибольшей метрикой на всем пути. В случае равенства метрик путей удаляется путь с наибольшим значением последнего состояния. Если на промежутке, длина которого составляет длину кодового блока, все пути эквивалентны, то работа декодера считается завершенной и принимаются решения о значении принятых бит как выходных бит кодера при переходе им между установленными состояниями.

После декодирования кодового блока проверяется прикрепленная к нему CRC-сумма, при этом, в зависимости от количества используемых антенных портов, выбирается маска, которой она была скремблирована.

Из всей принятой ресурсной сетки выделим 5-й подкадр каждого 2-го кадра, поскольку только в нем может передаваться канал PDSCH для системной информации. Выделив из первого символа каждого подкадра РЭ, передаваемые по каналу PCFICH, произведем демодуляцию и дескремблирование бит, найдем расстояние Хэмминга между принятым кодовым словом и тремя его возможными значениями. Значением сообщения CFI будем считать то, расстояние до кодового слова которого оказалось наименьшим, но не более 8.

Поскольку размещение канала PDCCH зависит от размещения канала PHICH, то перед чтением DCI определим РЭ, выделенные для канала PHICH, по данным, полученным из блока MIB, и типу дуплекса. Если поиск DCI завершится неудачей, и при этом используется тип дуплекса TDD, то процесс будет перезапущен со следующим номером конфигурации TDD.

Выделив все РЭ в первых символах подкадра, чье количество определяется значением сообщения CFI, и исключив РЭ, занятые сигналами CRS и каналами PCFICH и PHICH, произведем перемежение REG, депрекодирование, демодуляцию и дескремблирование полученных символов. Далее вычислим предполагаемые размеры DCI форматов 1A и 1C, и, поскольку перед скремблированием все блоки DCI были мультиплексированы, будем последовательно производить перебор кандидатов на всех возможных уровнях агрегации в общем пространстве поиска, начинающегося с первого CCE в пространстве управления [32]: для каждого кандидата на роль DCI, переданного с SI-RNTI, восстанавливать скорость кодового слова, декодировать и проверять CRC-сумму полученной битовой последовательности, дескремблировав ее значением SI-RNTI: 0×FFFF [31]. После успешной проверки CRC-суммы по размеру блока информации определим формат блока DCI и произведем его чтение.

Номер первого VRB  $RB_{start}$  и количество выделяемых последовательных VRB  $L_{CRBs}$ , передаваемых с помощью индикатора RIV, найдем их последовательным перебором: значение  $L_{CRBs}$  изменяется в диапазоне от 1 до количества РБ в канале  $N_{RB}^{DL}$ , значение  $RB_{start}$  изменяется в диапазоне от 0 до  $N_{RB}^{DL} - 1$ .

При использовании распределенного размещения VRB вычислим номера PRB. Значение разнесения РБ  $N_{gap}$  определяется шириной канала согласно [30]. Количество VRB  $N_{VRB}^{DL}$  определяется выбранным значением  $N_{gap}$ :

- 1) при  $N_{gap} = N_{gap,1}$ :  $N_{VRB}^{DL} = 2\min(N_{gap}, N_{RB}^{DL} - N_{gap})$ ;
- 2) при  $N_{gap} = N_{gap,2}$ :  $N_{VRB}^{DL} = 2N_{gap} \times \left\lfloor \frac{N_{RB}^{DL}}{2N_{gap}} \right\rfloor$ .

Количество последовательных VRB  $\tilde{N}_{VRB}^{DL}$ , готовящихся к перемежению, определяется значением  $N_{gap}$ . При  $N_{gap} = N_{gap,1}$ :  $\tilde{N}_{VRB}^{DL} = N_{VRB}^{DL}$ , при  $N_{gap} = N_{gap,2}$ :  $\tilde{N}_{VRB}^{DL} = 2N_{gap}$ . Перемежитель представляется в виде матрицы с четырьмя столбцами и  $N_{row}$  строками, при  $N_{row} = P \left\lceil \frac{\tilde{N}_{VRB}^{DL}}{4P} \right\rceil$ , где  $P$  — размер группы РБ согласно [32]. Запись номеров VRB в матрицу производится по строкам, чтение — по столбцам.  $N_{null}$  пустых элементов записывается в  $\frac{N_{null}}{2}$  последних строк 2-го и 4-го столбцов, где  $N_{null} = 4N_{row} - \tilde{N}_{VRB}^{DL}$ . Номера PRB  $n_{PRB}$  вычисляются согласно формуле:

$$n_{PRB}(n_s) = \begin{cases} \tilde{n}_{PRB}(n_s) & \text{при } \tilde{n}_{PRB} < \frac{\tilde{N}_{VRB}^{DL}}{2} \\ \tilde{n}_{PRB}(n_s) + N_{gap} - \frac{\tilde{N}_{VRB}^{DL}}{2} & \text{при } \tilde{n}_{PRB} \geq \frac{\tilde{N}_{VRB}^{DL}}{2} \end{cases} \quad (19)$$

где  $\tilde{n}_{PRB}$  зависит от номера слота в подкадре  $n_s$ :  
— для 1-го слота подкадра ( $n_s = 0$ ):

$$\tilde{n}_{PRB} = \begin{cases} \tilde{n}'_{PRB} - N_{row} & \text{при } N_{null} \neq 0, \tilde{n}_{VRB} \geq \tilde{N}_{VRB}^{DL} - N_{null}, \tilde{n}_{VRB} \bmod 2 = 1 \\ \tilde{n}'_{PRB} - N_{row} + \frac{N_{null}}{2} & \text{при } N_{null} \neq 0, \tilde{n}_{VRB} \geq \tilde{N}_{VRB}^{DL} - N_{null}, \tilde{n}_{VRB} \bmod 2 = 0 \\ \tilde{n}''_{PRB} - \frac{N_{null}}{2} & \text{при } N_{null} \neq 0, \tilde{n}_{VRB} < \tilde{N}_{VRB}^{DL} - N_{null}, \tilde{n}_{VRB} \bmod 4 \geq 2 \\ \tilde{n}''_{PRB} & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (20)$$

где промежуточные номера PRB  $\tilde{n}'_{PRB}$  и  $\tilde{n}''_{PRB}$  равны:

$$\begin{aligned}\tilde{n}'_{PRB} &= 2N_{row}(\tilde{n}_{VRB} \bmod 2) + \left\lfloor \frac{\tilde{n}_{VRB}}{2} \right\rfloor + \tilde{N}_{VRB}^{DL} \left\lfloor \frac{n_{VRB}}{\tilde{N}_{VRB}^{DL}} \right\rfloor, \\ \tilde{n}''_{PRB} &= 2N_{row}(\tilde{n}_{VRB} \bmod 4) + \left\lfloor \frac{\tilde{n}_{VRB}}{4} \right\rfloor + \tilde{N}_{VRB}^{DL} \left\lfloor \frac{n_{VRB}}{\tilde{N}_{VRB}^{DL}} \right\rfloor,\end{aligned}\quad (21)$$

где  $\tilde{n}_{VRB}$  – промежуточный номер VRB, вычисляется как модуль номера VRB по количеству последовательных VRB  $\tilde{N}_{VRB}^{DL}$ ;

– для 2-го слота подкадра ( $n_s = 1$ ):

$$\tilde{n}_{PRB} = \left( \tilde{n}_{PRB}(n_s - 1) + \frac{\tilde{N}_{VRB}^{DL}}{2} \right) \bmod \tilde{N}_{VRB}^{DL} + \tilde{N}_{VRB}^{DL} \left\lfloor \frac{n_{VRB}}{\tilde{N}_{VRB}^{DL}} \right\rfloor. \quad (22)$$

Получив из блока DCI следующую информацию: набор номеров РБ, в которых размещается канал PDSCH, выбранная для его передачи модуляционная схема, размер транспортного блока TBS и индекс повторной передачи  $rv_{idx}$ , произведем по ней чтение блока SIB1.

Обработку физического канала PDSCH произведем аналогично ранее рассмотренным каналам. Восстановление скорости кодовых слов канала DL-SCH произведем по такому же алгоритму, который рассматривался для канала BCH, но с тем отличием, что для задания скорости будем использовать алгоритм для данных, кодированных турбокодером. Считая, что требуемая информация, передаваемая в блоке SIB1, изменяется очень редко, будем усреднять кодированные последовательности, полученные от нескольких передач PDSCH. Турбодекодер реализуем по алгоритму итеративного декодирования.

При итеративном декодировании мягкие решения принятых систематических  $y^s$  и проверочных бит  $y^p$  от 2 элементарных кодеров циклически обрабатываются двумя SISO-декодерами с мягкими входами и выходами (рисунок 6). Каждый декодер вычисляет и уточняет внешнюю информацию  $L^{(e)}(u_i)$  о принятых битах  $u_i$ . Между 1-м и 2-м декодерами установлен перемежитель  $\Pi$ , между 2-м и 1-м – деперемежитель  $\Pi^{-1}$ , требующиеся для восстановления порядка систематических бит, которые поступали на входы элементарных кодеров. На каждой итерации вычисляется жесткое решение суммы решений  $L(u_i)$ , полученных от обоих декодеров, и систематических бит. Если CRC-сумма последовательности жестких бит проходит проверку, то работа декодера считается завершенной, иначе декодер переходит на следующую итерацию. Поскольку при изначально неверных данных декодер никогда не сможет завершить свою работу, ограничим количество итераций пятью.

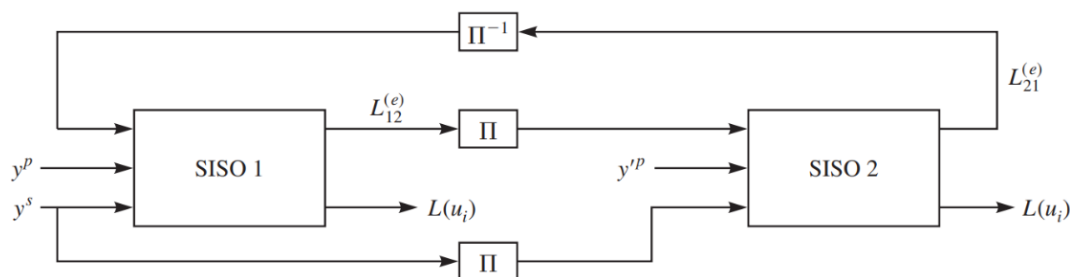


Рис. 6. Структура итеративного турбодекодера [35]

Перед началом процесса декодирования учтем влияние среды передачи в коэффициенте надежности решений, принятых демодулятором, и умножим все входные мягкие биты на него. Коэффициент надежности вычислим как среднеквадратическое отклонение закодированной последовательности от нулевой. Элементарные SISO-декодеры реализуем по алгоритму MAP (аббр. от англ. Maximum A-posteriori Probability – максимум апостериорной вероятности) в логарифмическом масштабе, который является усовершенствованием алгоритма BCJR (от первых букв фамилий его изобретателей Bahl, Cocke, Jelinek and Raviv).

Поскольку начальное и конечное состояния кодера известны, то в отличие от декодера Витерби, который вычисляет только метрики текущих переходов  $\Gamma_k(x)$ , в этом алгоритме также вычисляются метрики переходов в предыдущие  $B_k(S_i)$  и будущие  $A_k(S_i)$  состояния [36]:

$$\begin{aligned} A_k(S_i) &= \max_u [A_{k-1}(S_i^-(u)) + \Gamma_k(x(u, S_i))], \\ B_k(S_i) &= \max_u [B_{k+1}(S_i^+(u)) + \Gamma_{k+1}(x(S_i, u))], \end{aligned} \quad (23)$$

где  $i$  — номер состояния;  $k$  — номер перехода;  $u$  — мягкий бит;  $S_i^-(u)$  — предыдущее состояние для бита  $u$ ;  $S_i^+(u)$  — будущее состояние для бита  $u$ ;  $x(u, S_i)$  — набор бит для принятого бита  $u$ , который кодер мог бы сгенерировать при переходе в состояние  $S_i$ .

Пояснение к алгоритму расчета метрик представлено на рисунке 7. Вычисление итоговых метрик  $\Sigma_k(S_i, u)$  производится согласно формуле:

$$\Sigma_k(S_i, u) = A_{k-1}(S_i^-(u)) + \Gamma_k(x(u, S_i)) + B_{k+1}(S_i^+(u)). \quad (24)$$

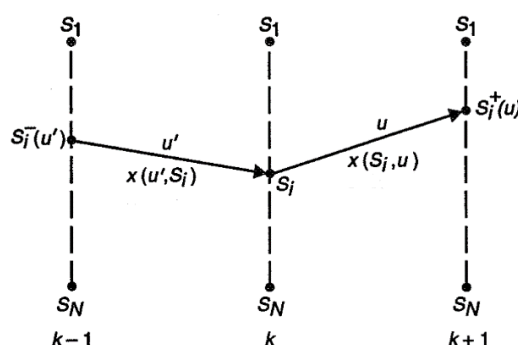


Рис. 7. Решетчатая диаграмма BCJR-декодера [36]

Декодер принимает решение о значении полученного бита как разности итоговых метрик  $\Sigma_k(S_i, u)$  для переданных бит  $u = 1$  и  $u = 0$ .

После чтения полей plmn-IdentityList, trackingAreaCode и cellIdentity блока SIB1 произведем запрос к БД OpenCellID, заранее получив ключ для доступа к сервису apiKey и сформировав HTTP-запрос, имеющий следующую структуру [19]: <http://www.opencellid.org/cell/get?key=<apiKey>&mcc=<mcc>&mnc=<mnc>&lac=<lac>&cellid=<cellid>&format=at>. В ответ от БД получим текстовую строку, в которой последовательно будут указаны широта и долгота местоположения БС, например: «+Location: 52.231644,21.011933,1713106250», в случае отсутствия записей о БС в БД: «+Error:Cell not found».

Для определения местоположения пользователя необходимо оценить координаты хотя бы трех соседних БС. После этого в первом приближении можно оценить расстояния до каждой из БС через нормирование значений средней мощности принятых сигналов.

### Особенности экспериментальной апробации анализатора сигналов стандарта LTE

Рассмотрим особенности экспериментальной апробации анализатора сигналов стандарта LTE. Успешность обнаружения сигналов стандарта LTE на начальном этапе обусловлена, в первую очередь, извлечением сигналов синхронизации.

На рисунке 8 показана спектрограмма частотно-временной ресурсной сетки подкадра стандарта LTE до и после работы функции выравнивания канала (эквалайзера) «equalize»; по одной из осей ресурсной сетки отложены номера поднесущих, а по другой — номера OFDM-символов.

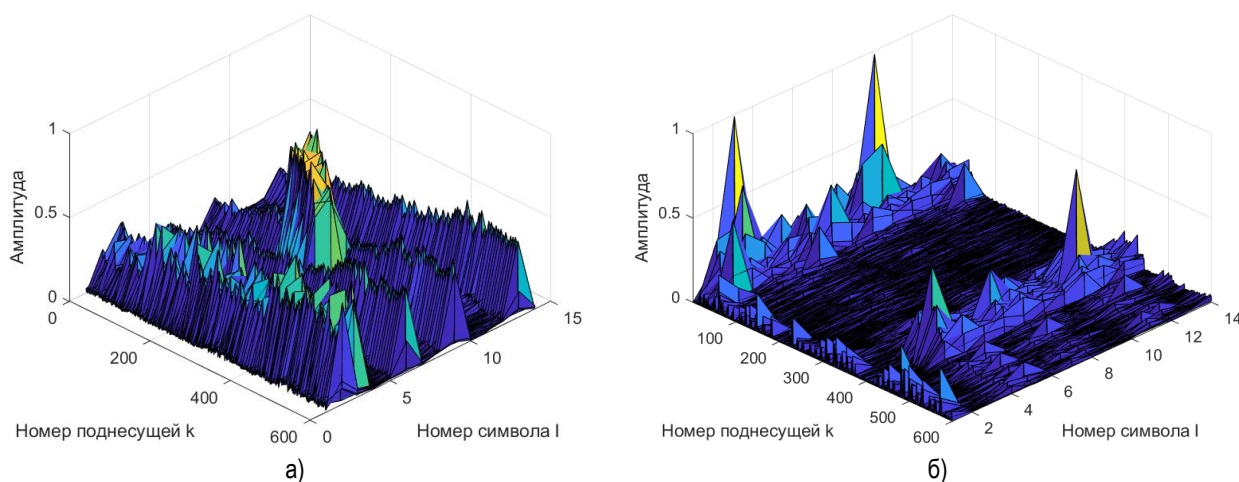


Рис. 8. Результат работы функции «equalize»: а) входные данные; б) выходные данные

Из анализа спектрограмм на рисунке 8 следует, что после обработки на ресурсной частотно-временной сетке пропали волнообразные всплески амплитуды сигнала на временной оси и ее нарастание вдоль оси частот, однако появились выделяющиеся относительно остальных РЭ пики сигналов синхронизации, а также стали визуально различимы основные элементы ресурсной сетки подкадра, включающие данные канала PDCCH в первых символах подкадра.

Оценку эффективности работы декодеров произведем имитационным моделированием с помощью случайной последовательности бит, модуляции закодированных данных и сложения полученного сигнала с шумом различной мощности. Для генерации проверочных данных были выбраны следующие параметры: длина кодируемой последовательности — 40 бит, модуляционная схема — QPSK, тип решений на выходе демодулятора — мягкие. Сравнение реализованного из примитивных функций алгоритма декодирования с работой функций, встроенных в MATLAB, выполнено по критерию коэффициента битовых ошибок BER (аббр. от англ. Bit Error Rate); результаты имитационного моделирования показаны на рисунке 9.

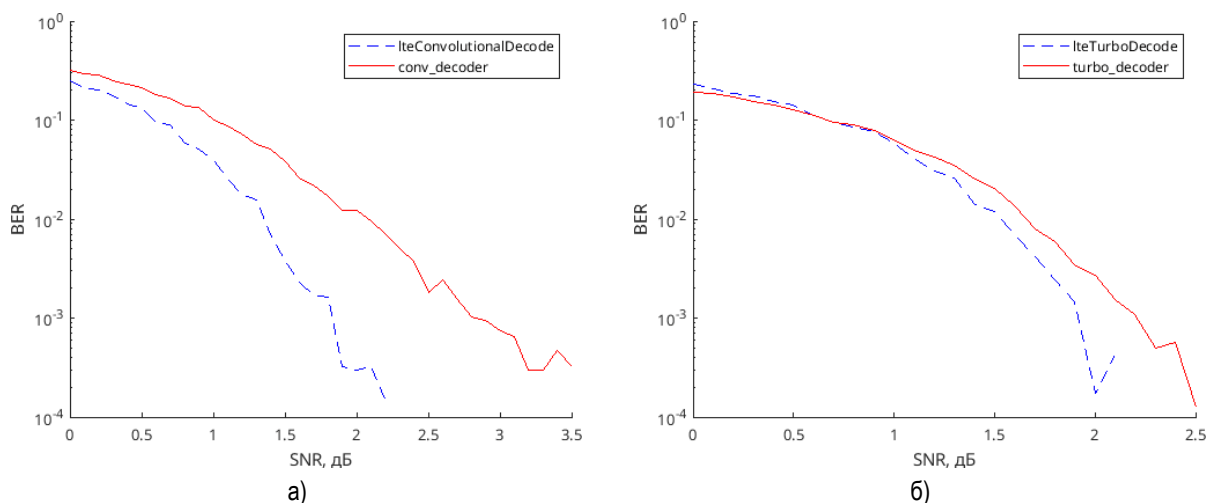


Рис. 9. График зависимости BER декодеров от отношения сигнал/шум: а) сверточных декодеров; б) турбодекодеров

Из графиков зависимости BER от отношения сигнал/шум на рисунке 9 следует, что функционирование самостоятельно реализованного (красная кривая) сверточного и турбодекодера соответствует работе встроенной функции MATLAB (синяя кривая) при отношении сигнал/шум не менее 3,5 и 2,5 дБ, соответственно.

Взаимосвязь составных программных модулей разработанного анализатора широкополосных сигналов стандарта LTE показана на рисунке 10. Структурная схема экспериментальной апробации приводится на рисунке 11.

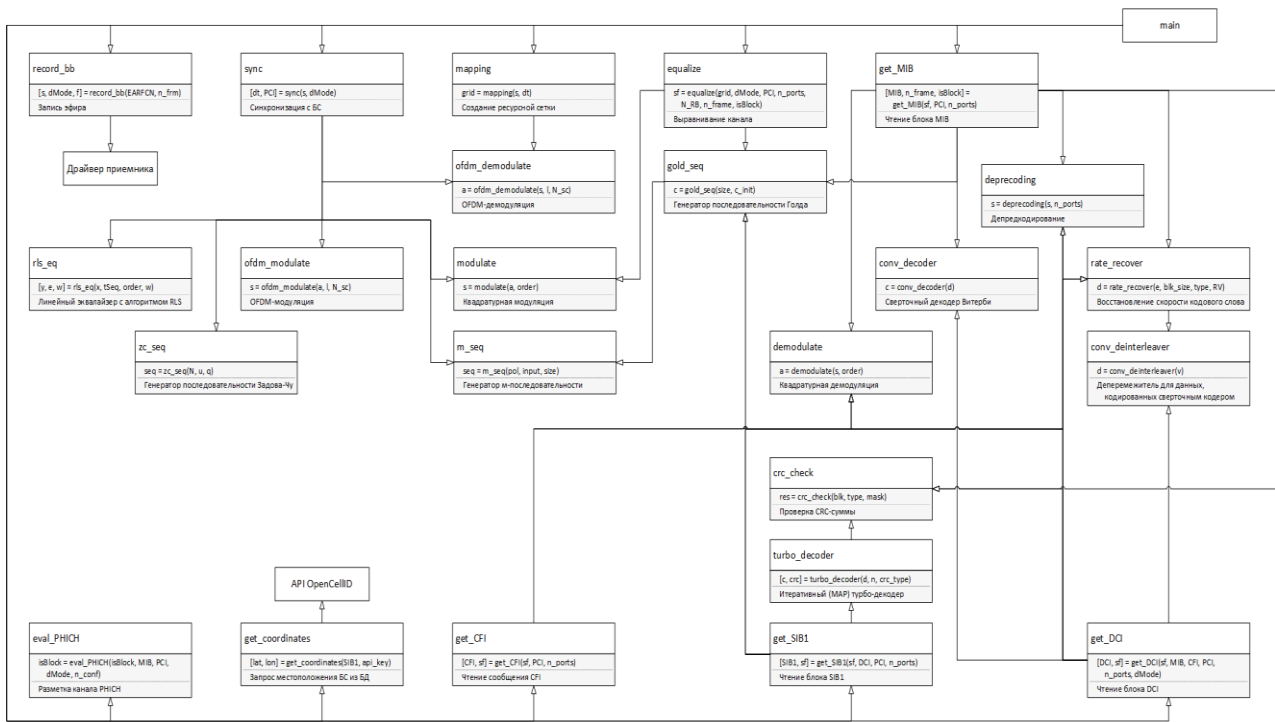


Рис. 10. Взаимосвязь составных программных модулей анализатора сигналов стандарта LTE

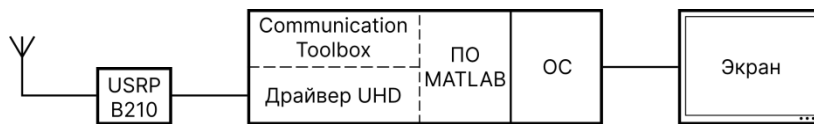


Рис. 11. Структурная схема экспериментальной апробации

Результаты профилирования программных модулей анализатора сигналов стандарта LTE по времени выполнения для одной заранее подготовленной и загруженной в АРМ записи радиоэфира длительностью 20 кадров с принятыми сигналами от БС, работающей с частотным дуплексом и двумя антенными портами, указаны в таблице 9 и на рисунке 12.

Таблица 9. Результаты профилирования программы приемника

Название функции	Количество вызовов	Время выполнения, мс	Относительное время выполнения, %
sync	1	2182	34,34
get_MIB	2	1624	25,56
get_coordinates	1	923	14,53
get_DCI	1	654	10,29
equalize	3	420	6,61
mapping	1	376	5,92
get_SIB1	1	95	1,49
get_CFI	1	11	0,17
eval_PHICH	1	10	0,16
остальное	—	59	0,93



Рис. 12. Flame-граф вызовов программы приемника

По приведенным выше данным видно, что функциями с наибольшим временем выполнения оказались: «sync» из-за вычисления ВКФ сигнала длительностью 10 кадров и сгенерированных сигналов PSS, «get\_MIB» и «get\_DCI» из-за большого количества вызовов сверточного декодера при поиске передач соответствующих сообщений, «get\_coordinates» из-за обращения программы к БД через сеть «Интернет». Чрезмерно большое время выполнения программы объясняется недостатками режима интерпретации языка MATLAB, описанными при выборе средства разработки.

Комплексную проверку программы приемника проведем с помощью приема сигналов нескольких БС. Для каждой БС запишем полученный от приемника USRP набор отсчетов в файл. Результат обработки трех таких файлов программой анализа широкополосных сигналов стандарта LTE приведен на рисунке 13.

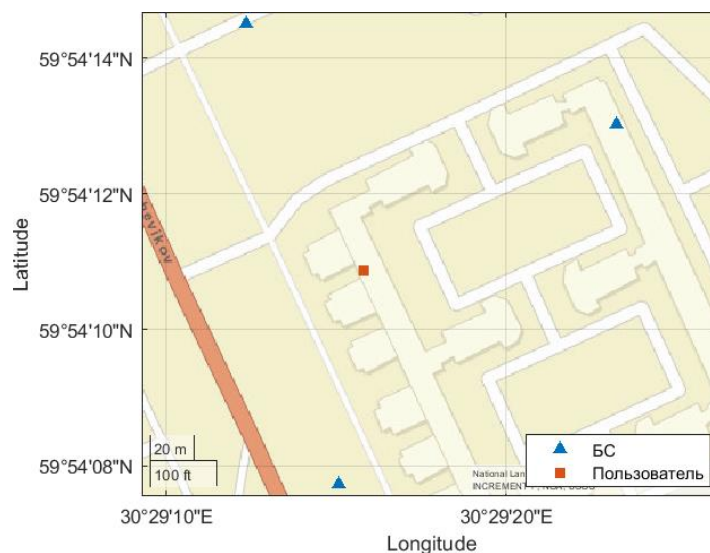


Рис. 13. Результат выполнения программы приемника

Данные на рисунке 13 позволяют сделать вывод о том, что разработанный анализатор сигналов стандарта LTE решает поставленную задачу корректно, что подтверждается отображением координат трех ближайших БС стандарта LTE на карте.

### Заключение

Описанная в настоящем исследовании разработка и апробация анализатора сигналов стандарта LTE средствами SDR является первой отечественной работой, в которой детально описан порядок анализа широкополосных сигналов стандарта LTE для определения местоположения SDR-устройства, не являющегося абонентом какой-либо сети. Разработанный из примитивных функций набор программных модулей на языке MATLAB решает задачу анализа сигналов стандарта LTE от одной БС за несколько секунд по предварительной записи радиозэфира в режиме офлайн. Для анализа сигналов стандарта LTE синхронно с записью фрагмента радиозэфира в режиме онлайн параллельно от нескольких БС необходима программная реализация описанных процедур на языке HDL ПЛИС, что является предметом дальнейших исследований и разработок.

Практическая ценность исследования заключается в экспериментальном подтверждении возможности решения навигационной задачи с точностью до принадлежности к ближайшим БС сотовых сетей стандарта LTE в условиях ненадежного приема сигналов ГНСС.

### Литература

1. ITU-D. Measuring Digital Development: Facts and Figures. 2022. URL: [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-d/opb/ind/D-IND-ICT\\_MDD-2022-PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-d/opb/ind/D-IND-ICT_MDD-2022-PDF-E.pdf) (дата обращения 23.04.2024)



2. Ukraine: EU Agrees on Eighth Package of Sanctions against Russia. European Commission — Press Release. Brussels, 6 October 2022. URL: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/document/print/en/ip\\_22\\_5989](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/document/print/en/ip_22_5989) (дата обращения 23.04.2024)
3. Collins T. F., Getz R., Pu D., Wyglinski A. M. Software-Defined Radio for Engineers. Norwood: Artech House, 2018. URL: <https://www.analog.com/media/en/training-seminars/design-handbooks/Software-Defined-Radio-for-Engineers-2018/SDR4Engineers.pdf> (дата обращения 23.04.2024)
4. Фокин Г. А. Технологии программно-конфигурируемого радио. М.: Горячая Линия — Телеком, 2019. 316 с. EDN: TMJLHA
5. Фокин Г. А. Современные тенденции в области программно-конфигурируемого радио // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2017). Сборник научных статей VI Международной научно-технической и научно-методической конференции: в 4-х тт. (Санкт-Петербург, 01–02 марта 2017 г.). 2017. Т. 1. С. 271–276. EDN: ZECFGR
6. Фокин Г. А. Принципы и технологии цифровой связи на основе программно-конфигурируемого радио: обзор современных тенденций в области создания комплекса подготовки специалистов // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 1. С. 78–94. DOI:10.31854/1813-324X-2019-5-1-78-94. EDN: ZEFYQH
7. Фокин Г. А., Лаврухин В. А., Волгушев Д. А., Киреев А. В. Модельно-ориентированное проектирование на основе SDR // Системы управления и информационные технологии. 2015. № 2 (60). С. 94–99. EDN: TWKVQB
8. Фокин Г. А., Буланов Д. В., Волгушев Д. Б. Модельно-ориентированное проектирование систем радиосвязи на основе ПКР // Вестник связи. 2015. № 6. С. 26–30. EDN: XDCTPR
9. Лаврухин В. А., Фокин Г. А. Разработка LPD-приемопередатчика с поддержкой MIMO на основе программно-конфигурируемого радио в приложении к управлению роботом // Extreme Robotics. 2016. Т. 1. № 1. С. 119–128. EDN: XERWIZ
10. Волгушев Д. Б., Киреев А. В., Фокин Г. А. Модельно-ориентированный синтез систем радиосвязи на основе программно-конфигурируемого радио // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2015, Санкт-Петербург, 03–04 марта 2015 г.). Сборник научных статей IV Международной научно-технической и научно-методической конференции. СПб.: СПбГУТ, 2015. Т. 1. С. 50–53. EDN: UNVNCF
11. Борисов Е. Г., Машков Г. М., Фокин Г. А. Экспериментальный стенд оценки точности позиционирования на основе программно-конфигурируемого радио // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. (АПИНО 2016? Санкт-Петербург, 10–11 марта 2016 г.). Сборник научных статей V Международной научно-технической и научно-методической конференции. СПб.: СПбГУТ, 2016. Т. 1. С. 120–125. EDN: WZINRT
12. Фокин Г. А. Комплекс моделей и методов позиционирования устройств в сетях пятого поколения. Дисс. ... д-ра тех. наук: 05.12.13. СПб.: СПбГУТ, 2021. 499 с. EDN: PQMSQX
13. Фокин Г. А., Волгушев Д. Б., Григорьев В. А. Способ позиционирования в сетях связи с использованием технологии программно-конфигурируемого радио. Патент на изобретение № 2817862 С1. Публикация 22.04.2024. Заявка от 18.09.2023.
14. КОНСУЛ ориентируется на местности // Коммерсантъ. 2021. № 76. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/4793821> (дата обращения 23.04.2024)
15. Комплекс радиоконтроля ОМЕГА-М5 // ООО «Приборэлектро». URL: <https://www.priborelektro.ru/product/price/programmno-apparatnye-kompleksy-256/16057.html> (дата обращения 23.04.2024)
16. ETSI TS 136 101 V15.14.0: User Equipment (UE) Radio Transmission and Reception, 2021. URL: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/136100\\_136199/136101/15.14.00\\_60/ts\\_136101v151400p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136100_136199/136101/15.14.00_60/ts_136101v151400p.pdf) (дата обращения 23.04.2024)
17. Комплекс выявления каналов утечки информации и электронных устройств негласного получения информации (ЭУНПИ) «Призрак» // ЗАО НПЦ Фирма «НЕЛК». URL: [https://nelk.ru/catalog/tekhnicheskie\\_sredstva\\_poiska\\_kanalov\\_utechki\\_informatsii/kompleksy\\_vyuavleniya\\_radioperedayushchikh\\_tekhnicheskikh\\_sredstv\\_razvedki/prizrak](https://nelk.ru/catalog/tekhnicheskie_sredstva_poiska_kanalov_utechki_informatsii/kompleksy_vyuavleniya_radioperedayushchikh_tekhnicheskikh_sredstv_razvedki/prizrak) (дата обращения 23.04.2024)
18. Data Sheet Version 32.00: FSH handheld analyzer specifications // Rohde & Schwarz: Munich, 2022. URL: [https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl\\_downloads/dl\\_common\\_library/dl\\_brochures\\_and\\_datasheets/pdf\\_1/FSH\\_dat-sw\\_en\\_5214-0482-22\\_v3200.pdf](https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/FSH_dat-sw_en_5214-0482-22_v3200.pdf) (дата обращения 23.04.2024)
19. OpenCellID wiki: API, 2024. URL: <https://wiki.opencellid.org/wiki/API> (дата обращения 30.04.2024)

20. USRP Hardware Driver and USRP Manual: USRP B2x0 Series // Ettus Research. 2024. URL: [https://files.ettus.com/manual/page\\_usrp\\_b200.html](https://files.ettus.com/manual/page_usrp_b200.html) (дата обращения 30.04.2024)
21. USRP Hardware Driver and USRP Manual: UHD Development Manual // Ettus Research. 2024. URL: [https://files.ettus.com/manual/page\\_uhd.html](https://files.ettus.com/manual/page_uhd.html) (дата обращения 30.04.2024)
22. LabVIEW: Using NI-USRP in LabVIEW // National Instruments. 2024. URL: <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/ni-usrp/page/using-usrp-labview.html> (дата обращения 30.04.2024)
23. MATLAB: USRP Support from Communications Toolbox // MathWorks. 2024. URL: <https://www.mathworks.com/hardware-support/usrp.html> (дата обращения 30.04.2024)
24. GNU Radio: USRP Source, 2024. URL: [https://wiki.gnuradio.org/index.php/USRP\\_Source](https://wiki.gnuradio.org/index.php/USRP_Source) (дата обращения 30.04.2024)
25. LabVIEW: What Are the Differences Between a LabVIEW Executable and an Installer // National Instruments. 2024. URL: <https://knowledge.ni.com/KnowledgeArticleDetails?id=kA00Z0000019YLjSAM> (дата обращения 30.04.2024)
26. MATLAB Coder: Generate C and C++ code from MATLAB code // MathWorks. 2024. URL: <https://www.mathworks.com/products/matlab-coder.html> (дата обращения 30.04.2024)
27. HDL Coder: Generate Verilog, System Verilog, and VHDL code for FPGA and ASIC designs // MathWorks. 2024. URL: <https://www.mathworks.com/products/hdl-coder.html> (дата обращения 30.04.2024)
28. ETSI TS 136 331 V15.14.0: Radio Resource Control (RRC); Protocol Specification. 2021. URL: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/136300\\_136399/136331/15.14.00\\_60/ts\\_136331v151400p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136300_136399/136331/15.14.00_60/ts_136331v151400p.pdf) (дата обращения 10.05.2024)
29. ETSI TS 136 212 V15.14.0: Multiplexing and Channel Coding. 2021. URL: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/136200\\_136299/136212/15.14.00\\_60/ts\\_136212v151400p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136212/15.14.00_60/ts_136212v151400p.pdf) (дата обращения 10.05.2024)
30. ETSI TS 136 211 V15.14.0: Physical channels and modulation, 2021. URL: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/136200\\_136299/136211/15.14.00\\_60/ts\\_136211v151400p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136211/15.14.00_60/ts_136211v151400p.pdf) (дата обращения 10.05.2024)
31. ETSI TS 136 321 V15.11.0: Medium Access Control (MAC) protocol specification. 2021. URL: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/136300\\_136399/136321/15.11.00\\_60/ts\\_136321v151100p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136300_136399/136321/15.11.00_60/ts_136321v151100p.pdf) (дата обращения 10.05.2024)
32. ETSI TS 136 213 V15.14.0: Physical layer procedures, 2021. URL: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/136200\\_136299/136213/15.14.00\\_60/ts\\_136213v151400p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136213/15.14.00_60/ts_136213v151400p.pdf) (дата обращения 10.05.2024)
33. G-NetTrack Manual // Gyokov Solutions, 2024. URL: <https://gyokovsolutions.com/manual-g-nettrack> (дата обращения 15.05.2024)
34. Yang W., Yang Z., Xu C. A Soft Demodulation Algorithm with Low Complexity for One-Dimensional DPC System // Wireless Personal Communication. 2013. № 69. PP. 1183–1195. DOI: 10.1007/s11277-012-0627-1
35. Proakis J. G., Salehi M. Digital Communications. Boston: McGraw Hill, 2008. URL: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5636847/mod\\_resource/content/1/digital%20commun%205th%20-%20proakis%2C%20salehi.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5636847/mod_resource/content/1/digital%20commun%205th%20-%20proakis%2C%20salehi.pdf) (дата обращения 15.05.2024)
36. Benedetto S., Montorsi G., Divasalar D., Pollara F. Soft-Output Decoding Algorithms in Iterative Decoding of Turbo Codes // TDA Progress Report 42–124. Jet Propulsion Laboratory, NASA. 15 February 1996. PP. 63–87. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19960022223/downloads/19960022223.pdf> (дата обращения 17.05.2024)

**Статья поступила 06 июля 2024 г.**  
**Одобрена после рецензирования 16 июля 2024 г.**  
**Принята к публикации 22 июля 2024 г.**

### Информация об авторах

*Цап Всеволод Владимирович* — студент 4-го курса факультета радиотехнологий связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича.  
E-mail: vsevolodcap@gmail.com

*Фокин Григорий Алексеевич* — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры радиосвязи и вещания Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: fokin.ga@sut.ru

## Development and Testing of LTE Signal Analyzer Using Software-Defined Radio

V. Tsap ✉, G. Fokin

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications,  
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

**The purpose** of the work is software implementation and experimental testing of an LTE standard signal analyzer using a software-defined radio for positioning with the accuracy of cell coverage. **Result:** software has been developed for a signal analyzer of the LTE standard in MATLAB, which implements the reception, processing and extraction of the necessary blocks of system information that is transmitted by base stations of the LTE standard via broadcast channels; the interface is configured to work with the USRP B210 board; during experimental testing, system information blocks were received and processed from the radio air, extracting identifiers of operator base stations and then accessing the OpenCellID open database to obtain global coordinates. **Novelty:** from the analysis of open Russian sources, it follows that this study is the first work that describes in detail the procedure for analyzing broadcast signals of the LTE standard to determine the location of an SDR device that is not a network subscriber. **Practical significance:** a software implemented and experimentally tested signal analyzer of the LTE standard allows to determine the location of a user who is not a subscriber to any network, accurate to belonging to the nearest cell in conditions of inaccessibility of global navigation satellite systems.

**Key words:** LTE standard, software defined radio, integrated development environment MATLAB, system information, positioning

### Information about Authors

Tsap Vsevolod — a 4<sup>th</sup> Year Student of Faculty of Radio Communication Technologies (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: vsevolodcap@gmail.com

Fokin Grigoriy — Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Radio Communications and Broadcasting (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: fokin.ga@sut.ru

УДК 621.391.3

## Принципы построения связного оборудования систем телемеханики с линейной топологией на базе составных кабельных линий связи

Точиллов В. Н.<sup>1</sup>, Бойков М. С.<sup>1</sup> ✉, Лукичев М. П.<sup>2</sup>, Ташчи Р. Л.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича  
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

<sup>2</sup>ЗАО «МГП «ИМСАТ»  
Санкт-Петербург, 190020, Российская Федерация

**Постановка задачи.** Требования оперативности обмена данными в протяженных проводных системах контроля и управления без возможности замены существующих линий связи предполагают модификацию соответствующих методов реализации оборудования. **Целью** работы является выбор способа преобразования исходного цифрового сигнала к виду, пригодному для ввода-вывода в линейный тракт со множеством подключенных к линии абонентов. **Полученные результаты.** Описан способ модуляции и демодуляции, обеспечивающий обмен данными между абонентами при динамическом диапазоне сигналов на входах приемников до 60 дБ и высоком уровне межсимвольных помех. Представлен вариант реализации приемо-передающего оборудования на базе доступных на рынке комплектующих. Разработана программа процессора приемника, обеспечивающая адаптацию алгоритма во всем диапазоне протяженностей и состава линий связи и скоростей передачи данных 4800÷9600 кбит/с. **Новизна.** В отличие от ЧПИ (трехуровневый сигнал с чередованием полярности импульсов), верхняя частота спектра полученного сигнала увеличивается только в 1,25 раза, и сигнал является двухуровневым, что обеспечивает его затухание на линии предельной длины приблизительно на 15 дБ меньше чем у ЧПИ. **Практическая / теоретическая значимость.** Материал может быть полезен для разработчиков аппаратуры телемеханики использующей проводные каналы связи.

**Ключевые слова:** проводная линия, линейный сигнал, способ кодирования, способ модуляции, способ демодуляции, цифровая обработка сигналов, частотная манипуляция, сопротивление шлейфа, затухание сигнала, контролируемый пункт, диспетчерский пункт

### Введение

Вопросы построения локальных систем телемеханики достаточно подробно проработаны и элементная база реализации интерфейса RS-485 представлена на рынке готовыми приемо-передатчиками (ADM485JR, ADM2483BRWZ, и др.). При ограниченном сопротивлении шлейфа (до сотен Ом) и длительности фронта при смене полярности до 0,5 длительности одиночной посылки сложностей, в основном, не возникает. Системы связи на основе передачи цифровой информации (ИКМ30 и др.) работают, как правило, в условиях больших затуханий сигнала в линии (40 и более дБ) и ограниченной полосы пропускания частот с двумя подключаемыми к линии абонентами. Режим работы преимущественно симплексный с непрерывной передачей в одном направлении. В статье рассматриваются особенности построения систем телемеханики на основе протяженных составных линий связи с множественным подключением абонентов.

#### Библиографическая ссылка на статью:

Точиллов В. Н., Бойков М. С., Лукичев М. П., Ташчи Р. Л. Принципы построения связного оборудования систем телемеханики с линейной топологией на базе составных кабельных линий связи // Вестник СПбГУТ. 2024. Т. 2. № 2. С. 5. EDN: KBOHUN

#### Reference for citation:

Boikov M., Tochilov V., Lukichev M., Tashchy R. The Principles of Constructing a Communication Equipment with Line Topology on the Base of Composite Communication Lines // Herald of SPbSUT. 2024. Vol. 2. Iss. 2. P. 5. EDN: KBOHUN

### Заданные технические характеристики оборудования

Учитывая ограниченность пропускной способности проводных линий связи, неопределенность по набору элементов линии и числа «абонентов» – контролируемых пунктов (КП), исходными данными для проектирования приняты:

- типы кабелей в составе линии – связные телефонные с воздушно-бумажной и полиэтиленовой изоляцией, с диаметрами жил 0,4–0,7 мм;
- протяженность линии (до 20 км при сопротивлении шлейфа до 3 кОм);
- режим работы (полудуплексный по одной линии);
- число КП в системе (до 20);
- период обновления информации на дисплее диспетчерского пункта (ДП) не более 3,5 с;
- объем передаваемой информации от каждого КП до 64 байт (512 бит);
- скорость передачи информации 4,8÷9,6 кбит/с;
- режим опроса (циркулярный и адресный по инициативе ДП);
- затухание сигнала в линии максимальной длины до 60 дБ.

Протяженность линии и требуемый темп функционирования предполагают использование трансформаторной развязки КП и ДП и синхронного режима обмена.

### Типовые требования к свойствам линейного сигнала цифровых систем передачи

В [1–4] при рассмотрении задачи выбора линейного сигнала цифровых систем передачи (ЦСП) предполагается:

- отсутствие постоянной составляющей в энергетическом спектре;
- низкочастотные компоненты должны быть по возможности подавлены;
- отношение верхней частоты к нижней должно быть минимизировано;
- сигнал не должен быть чувствителен к смене полярности;
- сигнал должен содержать достаточное число переходов уровня для синхронизации приемников;
- увеличение верхней частоты спектра сигнала после преобразования к коду передачи должно быть минимизировано ввиду роста затухания в линии (километрическое затухание растет пропорционально корню квадратному увеличению частоты).

### Выбор способа преобразования исходного сигнала к коду передачи с учетом перечисленных требований и особенностей проектируемой аппаратуры

В рекомендации МККТТ (с 1995г. МСЭ-Т) за номером G703 предложено использование в ЦСП сигнала ЧПИ – чередование полярности «единиц» и пассивные «нули». Устранение недостатка данного линейного сигнала, заключающегося в возможности появления продолжительных последовательностей бестоковых посылок «нулей», затрудняющих синхронизацию приемников и работу оборудования регулирования усиления, в указанных выше рекомендациях предлагается посредством замены предельной группы символов «0» комбинацией, содержащей «единицу», полярность которой не соответствует правилу чередования. При вероятности ошибок на регенерационный участок, установленной для цифрового тракта аппаратуры ИКМ30/32 [5] в пределах  $10^{-8}$ , этот способ успешно используется при незначительном коэффициенте размножения ошибок. Столь низкого коэффициента ошибок в рассматриваемой аппаратуре сомнительно ожидать при максимальном затухании сигнала, большем на 20 дБ, чем у сравниваемой, и столь протяженных линиях. Кроме того, сигнал ЧПИ трехуровневый, с пассивным «0», и поэтому требует формата сигнала «с возвращением к нулю», при котором импульсы «единиц» имеют длительность в половину тактового интервала для обеспечения размагничивания сердечника линейного трансформатора при трансляции любых сочетаний символов. Таким образом, верхняя частота спектра удваивается. Поэтому для рассматриваемого применения предлагается использовать вариант частотной манипуляции, при котором «единицы» транслируемой последовательности (рисунок 1) преобразуются в токовые импульсы чередующейся полярности длительностями в тактовый интервал, а «нули» имеют дополнительную смену полярности посередине посылки.

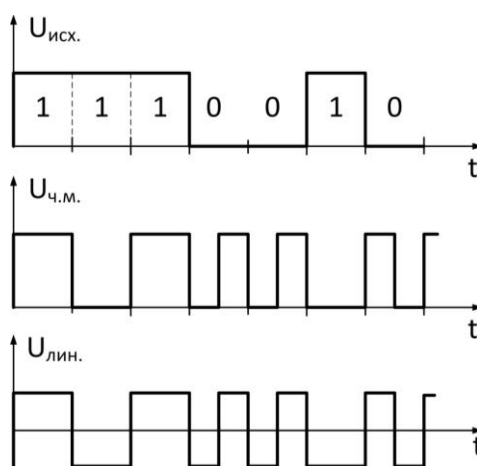


Рис.1. Диаграмма преобразования исходного цифрового сигнала к коду передачи с частотной манипуляцией

Получаемая последовательность на входе в линию – двухуровневая; не содержит в спектре частотных компонент ниже численно равной половине скорости передачи, но появляется и удвоенная частота при преобразовании «нулей». Для предотвращения появления продолжительных последовательностей «нулей», которые после 3–6 км длины линии связи (в зависимости от типа кабеля) приводят к появлению низкочастотных компонент в спектре сигнала при превышении постоянной времени перезаряда распределенной емкости линии (порядка 0,047 мкФ/км) половину тактового интервала, использовано дополнительное преобразование сигнала кодом 4B5B, повышающим плотность «единиц» (отношение числа 1 к 0 в среднем равно 53/27) и исключающим комбинации из более, чем двух нулей подряд. В таблице 1 приведено предварительное преобразование исходного цифрового сигнала табличным кодом 4B5B.

Таблица 1. Предварительное преобразование исходного цифрового сигнала

№ п/п	Исходная / преобразованная комбинация	№ п/п	Исходная / преобразованная комбинация
1.	1111 / 11111	9.	0111 / 10011
2.	1110 / 11110	10.	0110 / 01101
3.	1101 / 11101	11.	0101 / 01011
4.	1100 / 11011	12.	0100 / 01110
5.	1011 / 10111	13.	0011 / 11010
6.	1010 / 01111	14.	0010 / 10110
7.	1001 / 01010	15.	0001 / 10101
8.	1000 / 11001	16.	0000 / 01001

### Выбор алгоритма демодуляции сигнала

На рисунках 2 и 3 приведены осциллограммы линейных сигналов, снимаемых через линейные трансформаторы, подключаемые к отводам эквивалента линии на расстояниях 2, 10 и 20 км от передатчика на скорости 9,6 кбит/с.

Размах «единиц» преамбулы (см. рисунок 2) – 4,5 В, 150 мВ и 4 мВ, соответственно. Фрагменты содержат окончание преамбулы из 40 посылок «единиц», по которой приемник (реализованный на процессоре архитектуры ARM) подстраивает фазу тактовой частоты под меандр преамбулы на входе порта аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и замеряет величину «размаха», используемую для корректного восстановления принимаемых данных, а также первые символы синхропоследовательности 111111101010.... указанного далее содержания. Ограничение уровня низкочастотных компонент на входах приемников за счет преобразования сигнала кодом 4B5B, использование линейного трансформатора с высокой индуктивностью обмоток (2 × 2,8 Гн) и высокоомный вход дифференциального усилителя (10 кОм) позволили ограничить дополнительное затухание при подключении очередного КП до 0,4 дБ.

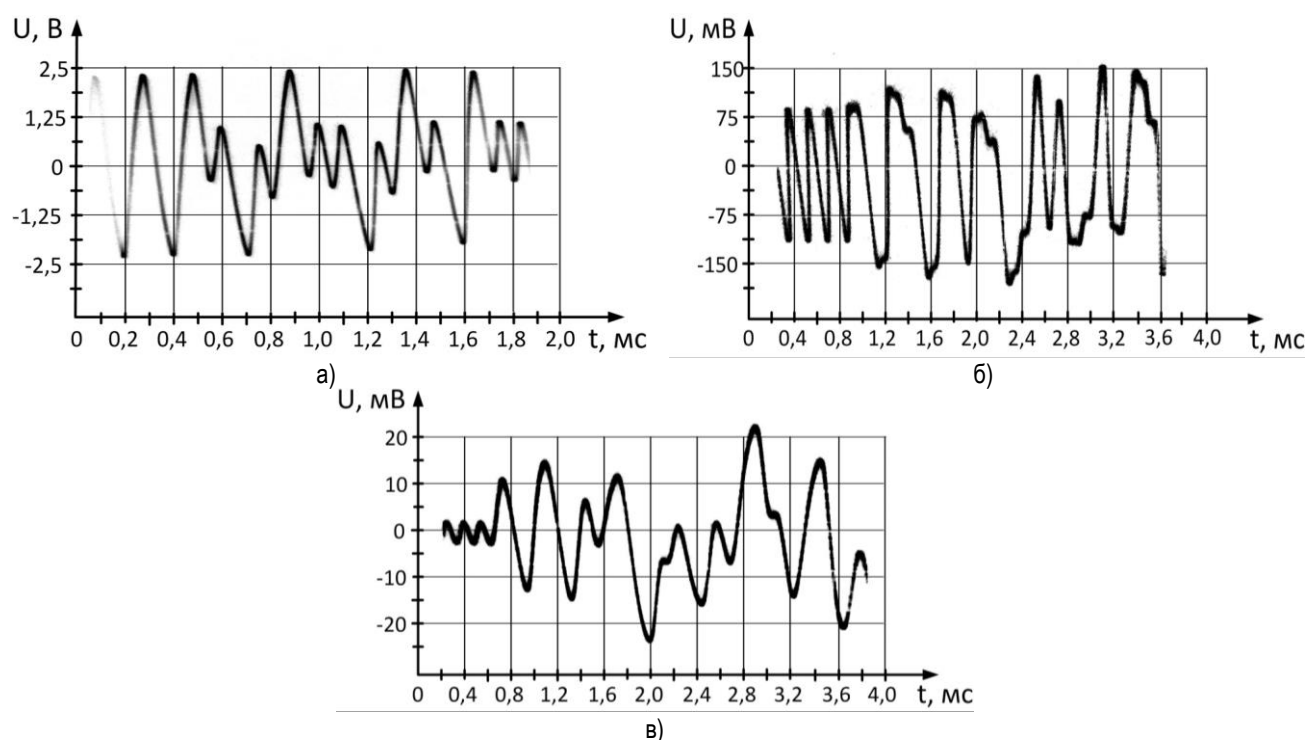


Рис. 2. Осциллограмма линейного сигнала при длине линии 2 км (а), 10 км (б) и 20 км (в) от передатчика

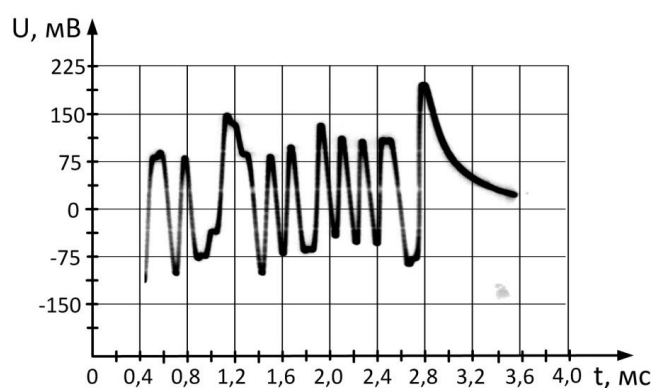


Рис. 3. Осциллограмма линейного сигнала в зоне окончания информационного блока при длине линии 10 км от передатчика

На рисунке 3 приведена осциллограмма завершающей части передаваемого сообщения на дистанции 10 км содержания ..10101, показывающая степень увеличения продолжительности фронта по завершении токовых посылок (драйвер сопряжения портов процессора с линейным трансформатором на длительность тактового интервала замыкает первичную обмотку, а затем переключается в высокоомное состояние), что имеет место при использовании сигналов с пассивным нулем. В диапазоне частот 0,8–5 кГц (на скорости 9,6 кбит/с), занимаемом рассматриваемым сигналом, модуль волнового сопротивления линии связи может быть в пределах 270–1200 Ом, поэтому для объектов с высоким уровнем помех в низкочастотном диапазоне (например, линии вдоль электрифицированных железных дорог) желательно шунтирование их через каждые ~5 км резисторами 0,5 Вт, 1 кОм.

Единого алгоритма демодуляции для линий от 0 до 20 км, меняющегося числа КП и различных скоростей передачи найти не удалось, но производительность процессора позволила даже на скорости 9,6 кбит/с, обрабатывая 16 отсчетов АЦП на бит принимаемых данных, обеспечить прием с использованием девяти алгоритмов одновременно (за время длительности 1-го бита). Решение о приеме синхросигнала принимается по фиксации комбинации FEA564F3, синтезированной по дополнительному условию исключения появления двух и более нулей подряд. Правильность приема данных контролируется 4-байтной контрольной суммой (CRC, аббр. от англ. Cyclic Redundancy Check). Фаза тактовой частоты подстраивается без воздействия на частоту задающего генератора процессора последовательным сдвигом начала цикла из шестнадцати замеров АЦП к выделенным значащим моментам модуля-

ции — смене направления изменения значения напряжения на входе порта АЦП. Погрешность синхронизации составляет при этом 1/16 длительности посылки (104 мкс для скорости 9,6 кбит/с). При отсутствии ошибок подстройка фазы занимает не более 8 тактовых интервалов.

Сеансы передач информации от КП содержат: 40 символов «преамбулы», 32 символа синхронизации, до  $64 \times 8$  данных и 32 символа CRC (два последних компонента дополнительно преобразуются кодом 4B5B); общий объем не превышает 752 бит. Запросы от ДП кратны короче. Поэтому выбрано решение о подстройке синхронизма только по преамбуле, где отсутствует межсимвольная интерференция, серьезно усложняющая эту процедуру.

Взаимная нестабильность частот процессоров задающих генераторов КП и ДП на основе кварцевых генераторов не превышает  $2 \times 10^{-5}$ , что на интервале 712 бит приведет к дополнительной погрешности не более 1,5 %. Время передачи ответа одного КП на скорости 9,6 кбит/с составит 78,3 мс. При паузе между передачами соседних КП в 2 мс время опроса 20 КП составит 1,6 с. Таким образом, даже на скорости 4,8 кбит/с требуемый период обеспечивается.

Амплитудно-частотная характеристика симметричной кабельной линии связи фактически представляет собой фильтр нижних частот. Вследствие этого, затухание «нулей» (передаваемых на удвоенной частоте) на предельной длине линии, выше, по сравнению с затуханием «единиц», не менее чем в 10 раз. Это позволяет производить демодуляцию сигнала как амплитудно-манипулированного.

### Реализация приемника линейного сигнала

Отсчеты АЦП оцифровываются с разрешением в 12 бит и поступают на входы двух фильтров с алгоритмами, соответственно:

Фильтр 1:

$$f1(i) = f1(i - 1) - x(i - 8) + x(i - 24);$$

Фильтр 2:

$$f21(i) = f21(i - 1) + x(i - 8) - x(i - 24),$$

$$f22(i) = f22(i - 1) + x(i) - x(i - 32),$$

$$f2(i) = f22(i)/2 - f(21),$$

где  $x$  — входные данные;  $f1$  — выход фильтра 1;  $f2$  — выход фильтра 2;  $f21$  и  $f22$  — внутренние переменные фильтра 2 (введены с целью разделения алгоритма фильтра 2 на составные части);  $i$  — текущий отсчет;  $i - n$  — значение отсчета на  $n$  выборках раньше.

Фильтр 1 обеспечивает подавление сигнала на удвоенной частоте (нулей), что необходимо на первой половине дистанции. Фильтр 2 улучшает условия приема на линиях большой протяженности за счет подавления низкочастотных компонент (на частотах ниже 500 Гц), где «нули» в достаточной степени подавлены за счет амплитудно-частотной характеристики самой линии.

При превышении значения напряжения на выходе выбранного фильтра в момент регистрации величины порога фиксируется «1», в противном случае — «0». Порогом служит измеренное значение «размаха» на 32 тактовых интервала ранее фиксации синхросигнала с выхода фильтра 2, умноженное на нормирующий коэффициент, значение которого, соответствующее 256, — 100 % величины размаха. Все 9 каналов приема идентичны, отличие в трех переменных: сигнал какого из фильтров используется; используется ли текущее значение на выходе фильтра в момент решения, или разность  $\Delta$  со значением на предыдущем такте; значение нормирующего коэффициента (таблица 2).

Нормирующие коэффициенты выбирались для обеспечения приема на скоростях  $4,8 \div 9,6$  кбит/с для различных протяженностей и состава линий.

Канал 9 — резервный, может быть использован как дополнительный, значения переменных задаются особыми командами. В качестве элемента сопряжения портов процессора с первичной обмоткой линейного трансформатора использовался мостовой драйвер управления двигателем постоянного тока типа DRV8837. Для сохранения уровня подавления симметричных наводок драйвер подключался к трансформатору только на время передачи через коммутатор из двух оптореле с малой проходной емкостью типа CPC1008.



Таблица 2. Значения нормирующих коэффициентов

Номер канала	Номер фильтра	Значение $\Delta$	Нормирующий коэффициент
1	1	Зн	128
2	1	$\Delta$	90
3	1	$\Delta$	130
4	2	$\Delta$	70
5	2	$\Delta$	10
6	2	$\Delta$	95
7	1	Зн	30
8	2	Зн	0
9	1/2	Зн / $\Delta$	0–255

### Заключение

Решена задача передачи телеметрической информации по протяженной проводной линии с множеством подключений, на скорости передачи до 9,6 кбит/с.

Предложен способ преобразования исходной случайной цифровой последовательности данных в линейный сигнал, допускающий возможность множественных подключений КП к общей линии связи без изменений действующих режимов. Разработана программа работы приемника, обеспечивающая функционирование КП и ДП во всем заданном диапазоне количества подключений, скоростей передачи и протяженностей линии.

Проведенные испытания на участке линии вдоль железной дороги «Финляндский вокзал – Ланская» города Санкт-Петербурга подтвердили выше изложенные характеристики оборудования.

### Литература

1. Беллами Дж. Цифровая телефония. Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1986.
2. Пропис Д.Д. Цифровая связь. Пер. с англ. М.: Радио и связь, 2000. 797 с.
3. Дворников С. В., Пшеничников А. В. Формирование спектрально-эффективных сигнальных конструкций в радио-каналах передачи данных контрольно-измерительных комплексов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2017. Т. 60. № 3. С. 221–228. DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-3-221-228. EDN: YGSOYN
4. Полушин П. А., Раджабов У. М., Лось В. О. О возможности плавной регулировки скорости передачи многоуровневых цифровых сигналов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2021. № 1(41). С. 46–54. EDN: YBIBTP
5. Системы передачи ИКМ30. Под ред. Ю. П. Иванова и Л. С. Левина. М.: Радио и связь, 1983.

Статья поступила 30 июля 2024 г.

Одобрена после рецензирования 14 августа 2024 г.

Принята к публикации 21 августа 2024 г.

### Информация об авторах

*Точилев Владимир Николаевич* — старший научный сотрудник НИЛ систем передачи телеметрической информации Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: barb@sut.ru

*Бойков Михаил Сергеевич* — научный сотрудник НИЛ систем передачи телеметрической информации Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: barb@sut.ru

*Лукичев Михаил Петрович* — заместитель главного инженера ЗАО «МГП «ИМКАТ». E-mail: mlukichev@realsys.ru

*Ташчи Руслан Леонидович* — исполнительный директор ЗАО «МГП «ИМКАТ». E-mail: mlukichev@realsys.ru

## The Principles of Constructing A Communication Equipment with Line Topology on the Base of Composite Communication Lines

V. Tochilov<sup>1</sup>, M. Boikov<sup>1</sup> ✉, M. Lukichev<sup>2</sup>, R. Tashchy<sup>2</sup>

<sup>1</sup>The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications,  
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

<sup>2</sup>R&D Company 'MGP IMSAT'  
St. Petersburg, 190020, Russian Federation

**Problem statement:** The requirements for the efficiency of data exchange in extended wired monitoring and control systems without the possibility of replacing existing communication lines imply modification of the appropriate methods of equipment implementation. The **purpose** of the work is to choose a method for converting the original digital signal to a form suitable for I/O in a linear path with many subscribers connected to the line. The **results** obtained: A **method** of modulation and demodulation is described, which provides data exchange between subscribers with a dynamic range of signals at receiver inputs up to 60 dB and a high level of intersymbol interference. A variant of the implementation of receiving and transmitting equipment based on components available on the market is presented. A receiver processor program has been developed that provides adaptation of the algorithm over the entire range of lengths and composition of communication lines and data transfer rates of 4800–9600 kbit/s. **Novelty.** Unlike the NPI (a three-level signal with alternating pulse polarity), the upper frequency of the spectrum of the received signal increases only 1.25 times, and the signal is two-level, which ensures its attenuation on a line of maximum length by about 15 dB less than that of the NPI. **Practical / theoretical relevance.** The material may be useful for developers of telemechanics equipment using wired communication channels.

**Key words:** wired line, linear signal, encoding method, modulation method, demodulation method, digital signal processing, frequency manipulation, loop resistance, signal attenuation, controlled point, control room

### Information about Authors

*Tochilov Vladimir* — Senior Research Officer of Telemetry Information Transmission Systems Laboratory (The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: barb@sut.ru

*Boikov Mikle* — Research Office of the Telemetry Information Transmission Systems Laboratory (The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: barb@sut.ru

*Lukichev Mikhail* — Systems engineer, Deputy Chief Engineer (R&D Company 'MGP IMSAT')  
E-mail: mlukichev@realsys.ru

*Tashchi Ruslan* — Executive Director (R&D Company 'MGP IMSAT'). E-mail: mlukichev@realsys.ru

**ДАТА ВЫХОДА В СВЕТ 27.08.2024**

Ответственный редактор **Татарникова И.М.**

Выпускающий редактор **Берзина Е.В.**

Выпускающий редактор **Яшугин Д.Н.**

Дизайн: **Коровин В.М.**

Изображение на обложке с сайта <http://www.freepik.com>