

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский
государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Физический факультет

Кафедра информационных технологий в физических исследованиях

Исследование влияния эффекта Доплера на прием сигналов с модуляцией
OFDM в системах космической связи

Отчет по научно-исследовательской работе
(производственной практике)
студента группы 0524М1ИСкс
1 курса магистратуры
Благодатина А.А.

Основная образовательная программа
подготовки по направлению
09.04.02 «Информационные системы
и технологии» (направленность
«Информационные технологии
в системах космической связи
и дистанционного зондирования Земли»)

Руководитель:
ст. преп. каф. ИТФИ., к.ф.-м.н.
Сорохтин Михаил Михайлович

Нижний Новгород
2025

Содержание

1. Введение.....	3
2. Цель работы.....	4
3. Теоретическая часть.....	5
3.1. OFDM модуляция.....	5
3.2. Эффект Доплера.....	7
3.3. Модель передачи сигналов.....	9
4. Практическая часть.....	10
5. Заключение.....	12
6. Список литературы.....	13

1. Введение

Современные технологии космической связи требуют высокой надежности и эффективности передачи данных, что делает актуальным исследование различных факторов, влияющих на качество сигналов. Одним из таких факторов является эффект Доплера, который возникает в результате относительного движения источника и приемника сигналов. В современных системах передачи данных [1], использующих ортогональное частотное деление (OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing), влияние эффекта Доплера может существенно сказаться на характеристиках принимаемого сигнала, таких как уровень искажений, скорость передачи данных и устойчивость к помехам.

OFDM является одной из наиболее перспективных технологий для реализации высокоскоростной передачи информации в условиях ограниченной полосы пропускания и сложных каналов связи. Благодаря своей способности эффективно противостоять межсимвольной интерференции и многолучевому распространению, OFDM широко применяется в системах связи. Однако при наличии значительных скоростей движения приемников или передатчиков, таких как спутники или космические аппараты, эффект Доплера приводит к смещению частот поднесущих, что в свою очередь вызывает проблемы с синхронизацией и декодированием информации.

2. Цель работы

Целью данной работы является исследование влияния эффекта Доплера на прием OFDM сигналов в системах космической связи.

В ходе работы ставились следующие задачи:

1. Провести анализ литературы.
2. Разработать модель передачи OFDM сигналов с учетом доплеровского смещения.
3. Провести численное моделирование для оценки влияния эффекта Доплера на передачу OFDM сигналов.

3. Теоретическая часть

3.1. OFDM модуляция

Данный вид модуляции подразумевает передачу суммы нескольких гармоник — поднесущих (рис. 1), частоты которых выбираются из условия ортогональности [2]. Полоса сигнала делится на N поднесущих. Обозначим частоту первой поднесущей как f , тогда все остальные частоты будут определяться соотношением: $f_n = nf$. Ширина спектра зависит от расстояния между поднесущими (Δf) и количества поднесущих: $F = N\Delta f$. Таким образом, OFDM сигнал можно представить в следующем виде:

$$Y_i = \sum_{n=1}^N X_n \cdot e^{j2\pi f_n t} \quad (1)$$

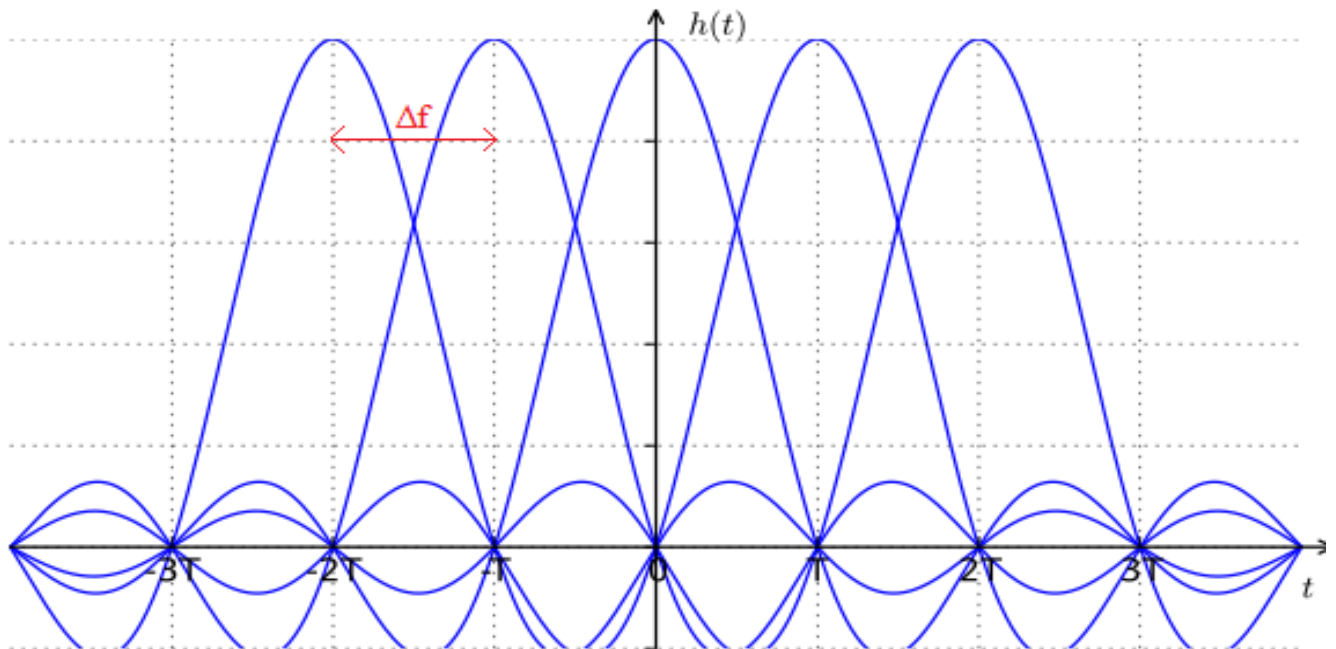


Рис. 1. Поднесущие OFDM сигнала

При последовательной передаче высокоскоростного потока данных, как правило, возникает проблема, связанная с тем, что период передачи символов намного меньше, чем время задержки в канале [3]. Это создает помехи в виде символьной интерференции, которые можно устранить с помощью эквалайзинга. В OFDM высокоскоростной поток символов данных сначала последовательно-параллельным образом преобразуется для модуляции на N параллельных

поднесущих (рис. 2). Это увеличивает период передачи символов на каждой поднесущей так, что она становится значительно больше, чем временные задержки в канале.

На рис. 3 можно увидеть схему реализации OFDM передатчика, на которой после разбиения данных на несколько подканалов, производится модуляция, а затем ОБПФ, после чего добавляется циклический префикс. OFDM приемник (рис. 4) устроен аналогично.

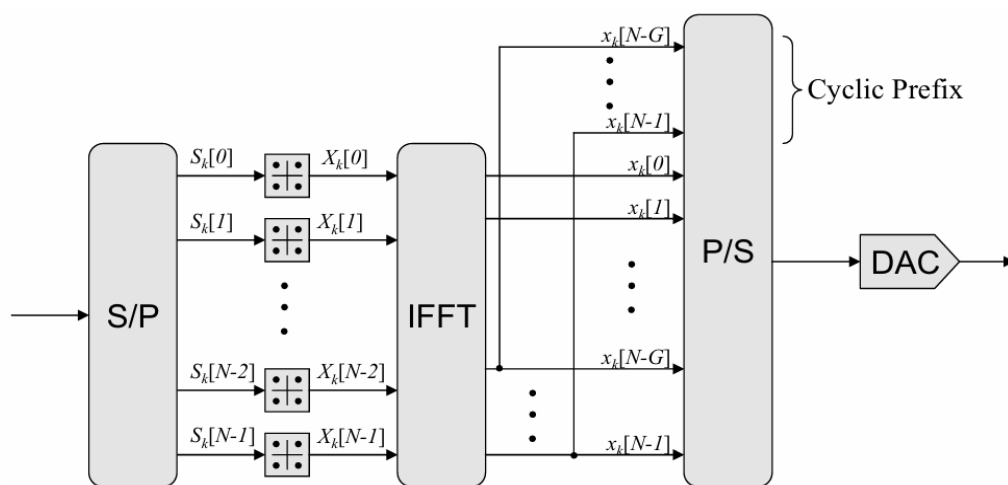


Рис. 3. Схема передатчика OFDM сигналов

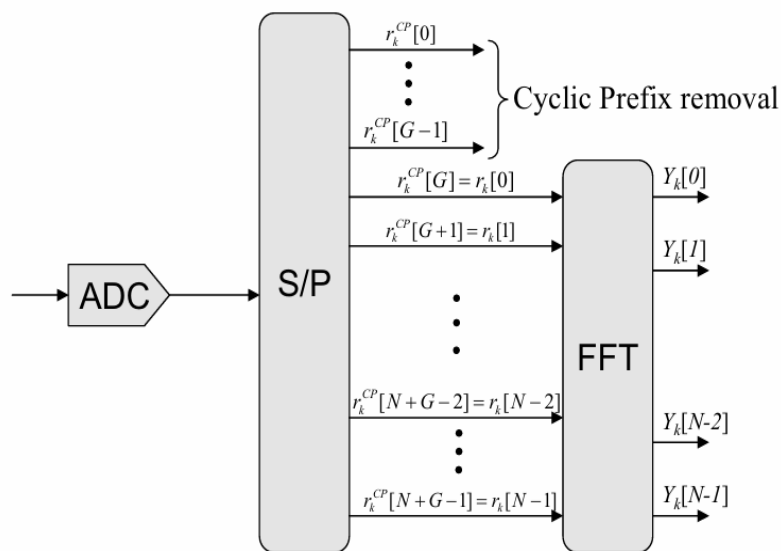


Рис. 4. Схема приемника OFDM сигнала

Для внесения в канал связи некоторой априорной информации с целью получения оценки канала связи, синхронизации и компенсации доплеровского сдвига вводятся пилотные поднесущие, которые являются немодулированными гармониками (рис. 5).

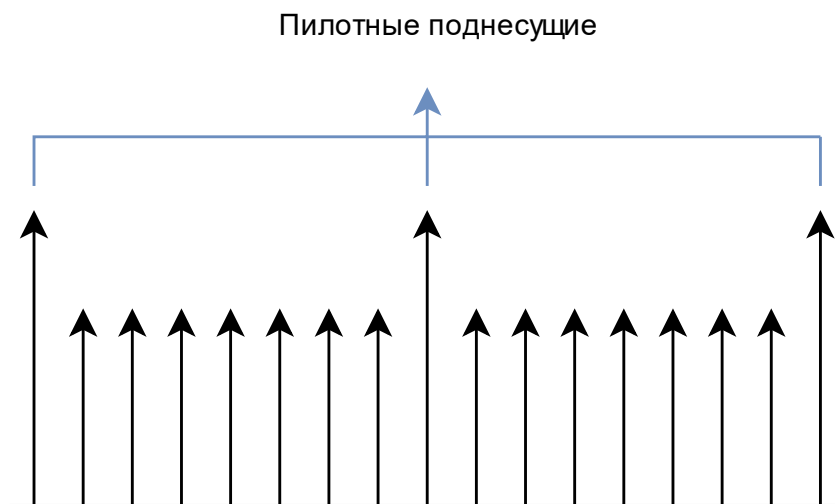


Рис. 5. Пилотные поднесущие OFDM сигнала

Зная частотные характеристики исходного и принятого сигналов, можно определить частотную характеристику канала связи:

$$H[k] = \frac{Y_p[k]}{X_p[k]}, \quad (2)$$

где $Y_p[k]$ – принятый пилотный сигнал на поднесущей k , $X_p[k]$ – переданный пилотный сигнал на поднесущей k .

3.2. Эффект Доплера

Эффект доплеровского сдвига возникает при наличии радиальной скорости приемника или передатчика относительно друг друга. В канале связи также возникают эффекты доплеровского расширения спектра и рассеяния [4], которые не рассматриваются в данной статье. Доплеровский сдвиг частоты описывается формулой 3.

$$f_d = \frac{vf_c}{c} \cos \psi, \quad (3)$$

где v - относительная скорость между передатчиком и приемником, f_c - несущая частота сигнала, c - скорость света, ψ - угол между направлением движения и линией связи (рис. 6).

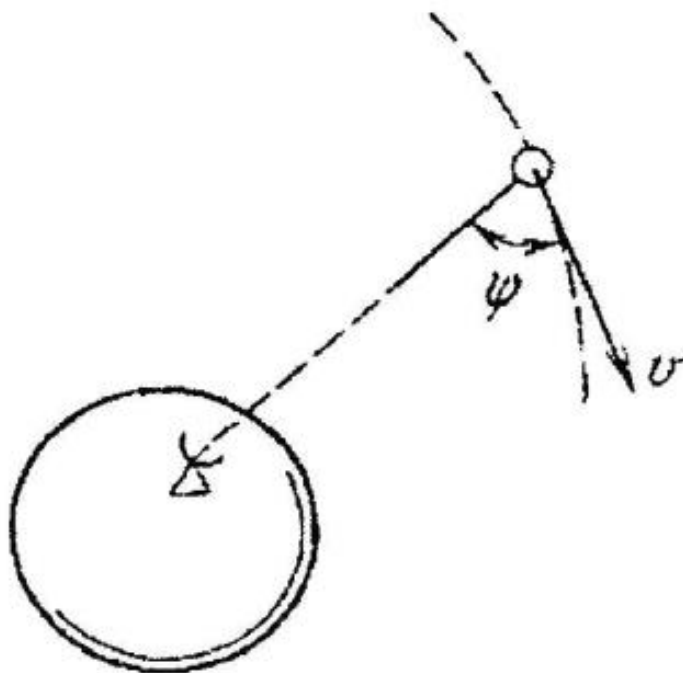


Рис. 6. Схема для расчета смещения Доплера

Для спутников низкой околоземной орбиты, которые движутся по орбите радиусом 700 км [5], скорость движения составляет около 7,5 км/с. Смещение Доплера может достигать порядка 7,5 кГц, при частоте сигнала порядка 1,6 ГГц.

Смещение Доплера приводит к возникновению разности фаз между поднесущими (формула 4).

$$\Delta \phi = 2\pi f_d \Delta t, \quad (4)$$

где Δt – временной интервал между поднесущими.

Таким образом, зная, где во временной области должны быть расположены пилотные поднесущие, можно оценить частотное смещение:

$$f_d = \frac{\Delta \phi}{2\pi \Delta t}, \quad (5)$$

3.3. Модель передачи сигналов

Схема модели канала связи показана на рис. 7.

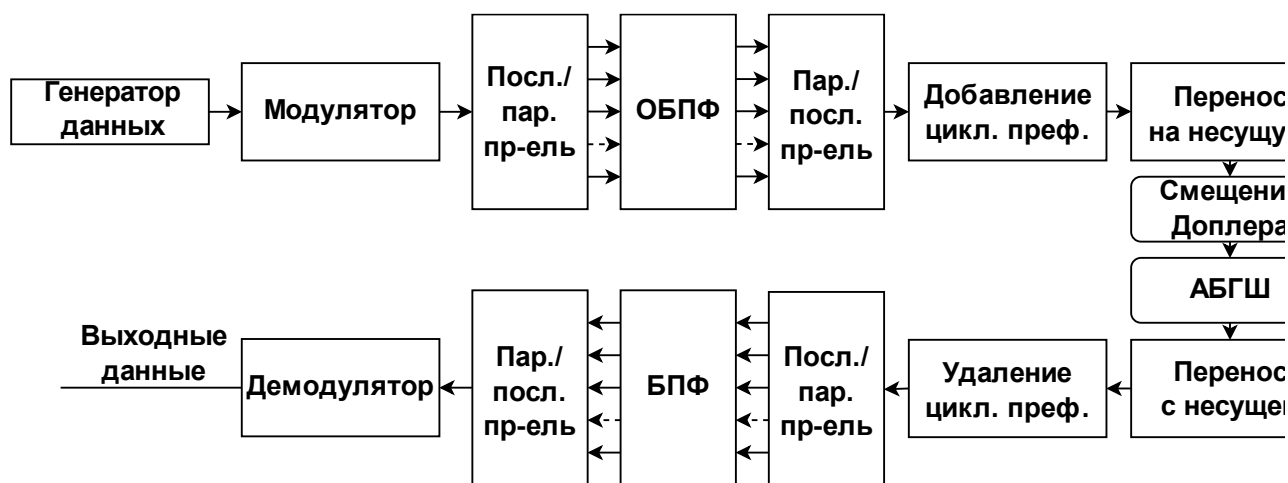


Рис. 7. Схема передачи данных с использованием OFDM

Передача данных начинается с генератора, который выдает псевдослучайную последовательность бит. Информационные биты поступают на ФМ-2 модулятор, после чего данные разбиваются на каналы, по количеству поднесущих. После блока ОБПФ данные снова сливаются в один поток, к которому добавляется циклический префикс и сигнал переносится на несущую. Канал связи представляет собой доплеровское смещение частот и наложение аддитивного белого гауссова шума. После чего, на приемной стороне все повторяется в обратном порядке.

4. Практическая часть

Для исследования влияния эффекта Доплера была разработана программа на языке GNUOctave для моделирования передачи OFDM сигналов. С помощью этой программы было проведено численное моделирование, в ходе которого были построены графики вероятности битовой ошибки (BER, Bit Error Rate) при различных значениях отношения сигнал-шум (SNR, Signal-to-Noise Ratio), различных величинах доплеровского сдвига, количестве поднесущих $N=64$, символьной скорости $\Delta f = 150$ кГц (рис. 8, 9).

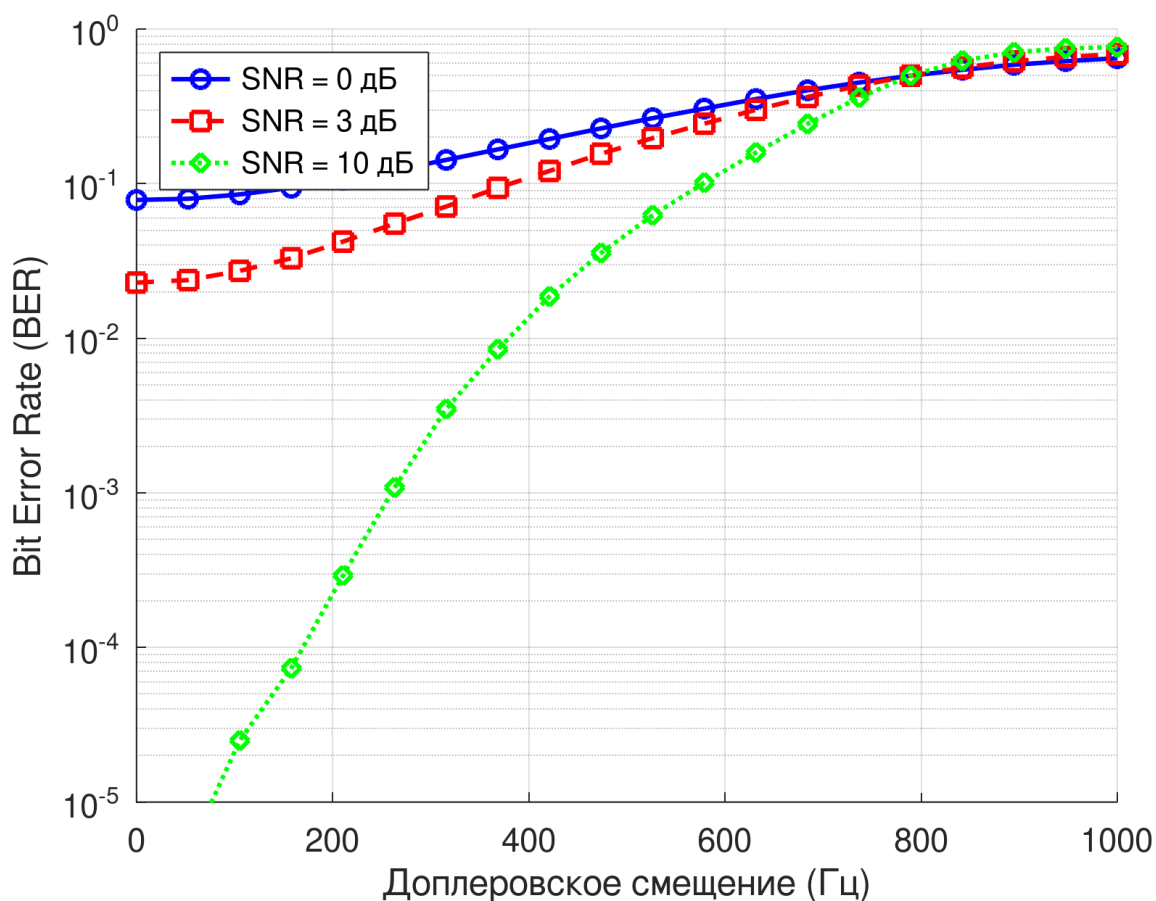


Рис. 2. График зависимости BER от величины доплеровского смещения для OFDM сигналов

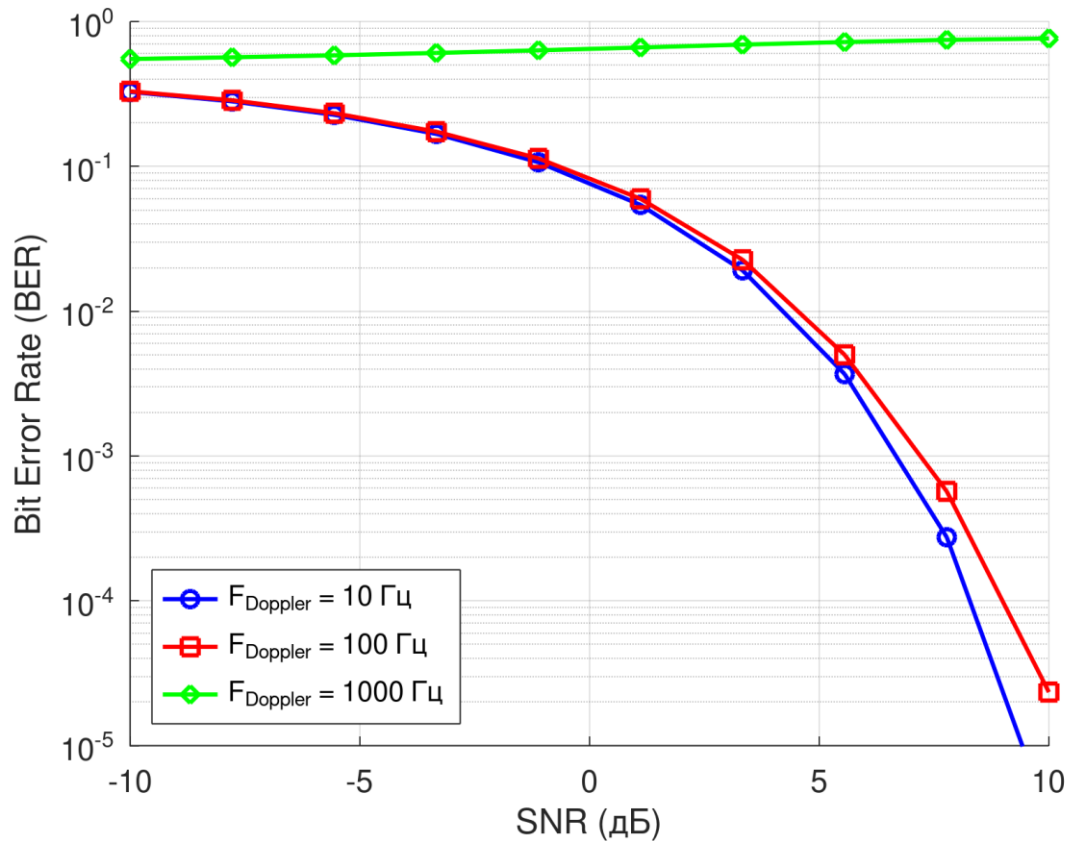


Рис. 9 График зависимости BER от SNR для OFDM сигналов

Из графиков видно, что при некотором критическом смещении поднесущих вероятность правильной демодуляции сигнала резко падает. Можно заметить, что BER характеристика при влиянии смещения Доплера зависит также и от символьной скорости Δf .

Однако при моделировании системы не были реализованы пилотные сигналы, предназначенные для компенсации частотного смещения. В дальнейшем планируется их реализовать.

Результаты численного моделирования показали, что доплеровский сдвиг частот может значительно ухудшить качество передачи данных, особенно при высоких скоростях движения космических аппаратов. Это подчеркивает необходимость учета эффекта Доплера при проектировании систем космической связи, особенно на низких околоземных орбитах.

5. Заключение

В ходе работы были выполнены все поставленные задачи:

1. Проведен обзор литературы.
2. Разработана модель передачи сигналов с OFDM модуляцией и каналом передачи с доплеровским смещением.
3. Проведено численное моделирование, приведены его результаты.

Исследование показало, что доплеровский сдвиг приводит к частотному рассогласованию поднесущих (при смещении частоты порядка 1% от расстояния между поднесущими), как следствие к существенному снижению SNR. Так как моделирование проходило без использования пилотных сигналов, а это должно сильно сказаться на статистических характеристиках системы передачи данных, необходимо провести дополнительные исследования.

Для повышения надежности передачи данных в условиях космической связи необходимо разрабатывать и внедрять специальные алгоритмы обработки сигналов и аппаратные решения, которые будут учитывать влияние эффекта Доплера. Это может включать адаптивные методы подстройки параметров, методы оценки и компенсации частотного сдвига, внедрение устойчивых к доплеровскому сдвигу видов модуляции (OFTS, Ortogonal Time Frequency Space, GFDM, Generalized Frequency Division Multyplexing), использование когерентных приемников с фазовой автоподстройкой, а также использование нейросетей для компенсации искажений.

В дальнейшем планируется проведение моделирования канала передачи OFDM сигналов с учетом доплеровского расширения и рассеяния спектра, а также влияние этих эффектов на разновидности OFDM. Так как влияние расширения спектра на широкополосный сигнал сложнее компенсировать, в отличие от обычного сдвига, данный эффект необходимо исследовать.

6. Список литературы

1. Степунин А.Н., Николаев А.Д. Мобильная связь на пути к 6G. – Москва: Инфра-Инженерия, 2021, 384 с.
2. Erik Dahlman, Stefan Parkvall, Johan Skold. 4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Boadband. © 2011 Elsevier, Ltd. ISBN: 987-0-12-385489-6, p. 43.
3. Stefana Sesia, Matthew Baker, Issam Toufic. LTE-the UMTS long term evolution: from theory to practice. © 2009 John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-470-69716-0, p. 142.
4. Майков Д.Ю., Вершинин А.С. // Молодой ученый. 2014. № 21(80). с.175.
5. Панько С.П., Поляк М.Г. // Космические аппараты и технологии. 2018. Т. 2, № 2. с. 105.