**Лекция 15**

**ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ КОСМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ**

Принцип работы спутниковой системы связи и теле- радиовещания достаточно прост. С помощью ракеты-носителя на заданную орбиту вокруг Земли запускается искусственный спутник (ИСЗ), на борту которого размещается приёмо-передающее оборудование, играющее роль радиоретранслятора. На Земле устанавливаются земные станции (ЗС) с параболическими антеннами и с опорно-поворотными устройствами для постоянного наведения их на ИСЗ.



**Солнечные**

**батареи**

**Приёмо-передающие**

**антенны**

 

Передающая земная станция

**Приёмная**

**земная станция**

 Рисунок 1. - Схема спутниковой связи

Радиосвязь до настоящего времени остаётся одной из основных областей их практического применения наряду с глобальной навигацией и разнообразными исследованиями Земли из космоса: от военной разведки до прогноза погоды и мониторинга природных ресурсов. Без сомнения, названия серий спутников «Космос», «Горизонт», «Молния» всем известны. Сегодня число таких названий составляет несколько десятков, и основные из них, относящиеся к связи, мы постараемся кратко охарактеризовать.

Спутниковые каналы, в отличие от наземных линий связи, принято нормировать следующим образом:

- нормы на параметры канала ТЧ или групповых трактов, зависящие от длины канала, соответствуют нормам на параметры канала наземной линии длиной 5000 км;

- по качественным показателям, зависящим от длины, каналы ЗВ и ЗС ТВ приравниваются каналу наземной линии длиной 2500 км;

- спутниковый канал изображения по отношению сигнал/визометрический шум эквивалентен каналу наземной линии длиной 5000 км, а по остальным показателям - каналу наземной линии длиной 2500 км. Отсюда, например, нормы отношения сигнал /визометрический шум для спутникового канала можно определить следующим образом:

 20lg 0,7*B*/*Uшвиз* = 57+10lg 2500/5000 = 54 дБ (1,0%)

Дать определение визометрического шума

Нормы, принятые для приёмных установок 1 класса – 53…55 дБ, 2 класса – 48 дБ.

Спутниковая связь может качественно изменить всю индустрию телекоммуникаций и оказать влияние на привычный уклад жизни. Она будет обычной и откроет новые возможности для образования, науки и предпринимательства.

**Широкому использованию ИСЗ для целей связи и передачи данных способствуют такие** **преимущества спутниковой связи, как:**

* **высокая "связность" - возможность быстрого соединения между собой десятков и сотен ЗС, удалённых на значительные расстояния;**
* **гибкость сети по отношению к изменениям её конфигурации и трафика отдельных ЗС;**
* **независимость в широких пределах затрат на канал от расстояния между абонентами;**
* **незначительное влияние атмосферы и географических особенностей окружающей местности на устойчивость связи;**
* **небольшие затраты энергии на поддержание ИСЗ на орбите.**

За последние годы создано большое число систем спутниковой связи (ССС), различных по назначению, обслуживаемой территории, составу, числу и пропускной способности каналов. Для передачи информации между ИСЗ могут организовываться линии межспутниковой связи, повышающие гибкость спутниковых систем. По охвату территорий, размещению и принадлежности ЗС, структуре управления спутниковые системы связи подразделяют на глобальные, международные, государственные, региональные, а также на ведомственные системы*.*

В последние годы всё активнее внедряются современные виды и средства связи. Но если, например, сотовый радиотелефон стал уже достаточно привычным, то аппарат персональной спутниковой связи (спутниковый терминал) пока ещё редкость.

Анализ развития подобных средств связи показывает, что она пригодна для повседневного применения систем персональной спутниковой связи (СПСС). Близится время объединения наземных и спутниковых систем в глобальную систему связи. Персональная связь станет возможной в глобальном масштабе, т. е. будет обеспечена досягаемость абонента в любой точке мира путём набора его телефонного номера, не зависящего от местонахождения абонента. Но прежде, чем это станет реальностью, системы спутниковой связи должны будут успешно выдержать испытания, подтвердить заявленные технические характеристики и экономические показатели в процессе коммерческой эксплуатации. Потребителям для правильного выбора средств связи надо хорошо ориентироваться во множестве предложений.

Деление на службы связи, введённое Регламентом Радиосвязи, сохраняется до настоящего времени, хотя в силу ряда причин (как технических, так и исторических) оно уже не соответствует реальной структуре современных ССС. Процесс персонализации (т. е. максимального приближения средств связи к конечному пользователю) привёл к тому, что границы между традиционными службами ФСС и ПСС или ФСС и РСС постепенно начали стираться. Например, персональные наземные станции удалённых пользователей, работающие в Ku- или Ka-диапазонах, формально относятся к классу ФСС (работа в полосах частот, выделенных для ФСС), но по своему назначению и выполняемым функциям они ближе всего к ПСС. Поэтому следует отдельно рассматривать системы, предоставляющие услуги персональной и широкополосной связи.

Состав систем спутниковой связи и вещания. В состав любой спутниковой системы связи входят следующие составляющие:

* ***Космический сегмент*, состоящий из нескольких спутников-ретрансляторов;**
* ***Наземный сегмент*, состоящий из центра управления системой, центра запуска КА, командно-измерительных станций, центра управления связью и шлюзовых станций;**
* ***Пользовательский* (*абонентский*) *сегмент*, осуществляющий связь при помощи персональных спутниковых терминалов;**
* ***Наземные сети связи*, с которыми через интерфейс связи сопрягают шлюзовые станции космической связи.**

### 1 Классификация и основные показатели ССС

### Предлагается следующая классификация ССС, ориентированная на предоставление услуг радиотелефонной связи и передачи данных, в основу которой положены следующие признаки.

**Тип используемых орбит.** По этому признаку все ССС делятся на два класса - системы с космическими аппаратами (КА) на геостационарной орбите (GEO) и на негеостационарной орбите. В свою очередь, негеостационарные орбиты подразделяются на низкоорбитальные (LEO), средневысотные (MEO) и эллиптические (HEO).

**Принадлежность системы к службе.** В соответствии с Регламентом радиосвязи различаются три основные службы - фиксированная спутниковая служба (ФСС), подвижная спутниковая служба (ПСС) и радиовещательная спутниковая служба (РСС).

**Статус системы** зависит от назначения системы, степени охвата обслуживаемой территории, размещения и принадлежности наземных станций. В зависимости от статуса ССС можно разделить на международные (глобальные и региональные), национальные (государственные) и ведомственные системы.

Эффективность любой системы связи определяется набором услуг, которые она предоставляет пользователю, и её тарифами. Причём высокие технико-экономические показатели системы обуславливаются гарантированной пропускной способностью, используемым частотным ресурсом, структурой и параметрами космического и наземного сегментов.

**Спутниковая связь существенно отличается от наземных видов радиосвязи - радиорелейной, тропосферной, ионосферной, сотовой или транкинговой.**

Так, в системах радиорелейной связи протяжённость линии в значительной степени зависит от наличия прямой видимости между абонентами и типа трассы (открытая, полуоткрытая, закрытая). В системах загоризонтной связи расстояние между станциями определяется состоянием тропосферы или ионосферы, поскольку действие этих систем основано на эффекте рассеяния на неоднородностях или отражения радиоволн в среде распространения (тропосфере, ионосфере).

Размеры зоны обслуживания сотовых и транкинговых систем зависят от высоты подъёма антенны базовой станции. **В системах спутниковой связи (ССС) основными показателями, определяющими размеры такой зоны, качество обслуживания и энергетику радиолиний, являются тип орбиты и её характеристики.**

Быстрое развитие спутниковых систем связи потребовало разработки и принятия ряда международных нормативных документов и соглашений. Технические вопросы, связанные с использованием частот и расположением спутников-ретрансляторов на орбитах, обеспечивающих отсутствие взаимных помех друг другу, решаются в рамках Международной консультативной комиссии по радио (МККР) и Международного комитета по регистрации частот (МКРЧ).

#### **Фиксированная служба связи. *Системы фиксированной службы связи (ФСС) предназначены для обеспечения связи между стационарными пользователями. Первоначально они разворачивались исключительно для организации магистралей большой протяжённости и региональной (зоновой) связи. Такие системы на базе терминалов типа VSAT используются в сетях электронной коммерции, обмена банковской информацией, оптовых баз, торговых складов и др.*** Кроме того, в системах ФСС всё чаще применяется оборудование персональной связи и интерактивного обмена информацией (в том числе через Internet). Для систем ФСС выделены следующие диапазоны частот: C (4/6 ГГц), Ku (11/14 ГГц) и Ka (20/30 ГГц).

Для спутниковых систем выделены полосы частот, представленные в таблице 1.

Таблица 1. - Диапазоны частот спутниковых систем связи

|  |  |
| --- | --- |
| Наименование диапазона | Полоса частот, ГГц |
| L | 1,452 ÷ 1,500 и 1,61 ÷ 1,71 |
| S | 1,93 ÷ 2,70 |
| **С** | 3,40 ÷ 5,25 и 5,725 ÷ 7,075 |
| **Ku** | 10,70 ÷ 12,75 и 12,75 ÷ 14,80 |
| **Ка** | 14,40 ÷ 26,50 и 27,00 ÷ 50,20 |
| **К** | 84,00 ÷ 86,00 |

К разряду ФСС относят также связь по фидерным линиям, которые формируют высокоскоростные каналы между земными центральными станциями и станциями сопряжения. Эти каналы работают в тех же диапазонах частот.

**Услуги ФСС предоставляют пять крупных международных организаций и около 50 региональных и национальных компаний. К наиболее значительным коммерческим системам фиксированной связи относятся Горизонт, Экспресс, Intelsat, Intersputnik, Eutelsat, Arabsat и AsiaSat.**

Среди них бесспорным лидером является международная система Intelsat, орбитальная группировка которой охватывает четыре основных региона обслуживания — Атлантический (AOR), Индийский (IOR), Азиатско-Тихоокеанский (ATR) и Тихоокеанский (POR). За время существования системы Intelsat создано 8 поколений спутников, из которых каждое последующее существенно превосходит предыдущее.

В настоящее время услуги Intelsat обеспечивают спутники четырёх последних поколений (серий Intelsat-5, -6, -7/7A, -8). Пропускная способность этих КА составляет от 12 до 35 тыс. телефонных каналов, т. е. через 25 спутников системы Intelsat передаются примерно 2/3 международного телефонного трафика. Наземный сегмент включает в себя около 800 крупных станций, размещённых в 170 странах мира.

Международная организация Intersputnik в настоящее время использует российский космический сегмент (он состоит из КА типа "Горизонт" и "Экспресс"), арендуя около 30 ретрансляторов на 8 КА. Космический аппарат нового поколения -LMI - Lockheed Martin Intersputnik ведёт обслуживание Евро-Азиатского, Американского, Евро-Африканского и Азиатско-Тихоокеанского регионов.

Серьёзную конкуренцию системам Intelsat и Intersputnik составляют международные коммерческие спутниковые системы PanAmSat и Orion, которые обеспечивают непрерывное покрытие основных регионов земного шара. К наиболее крупным региональным системам относятся Eutelsat (Европа и Северная Африка), Apstar, Asiasat, Optus, Palapa (Aзиатско-Тихоокеанский регион) и Arabsat (Арабские страны).

#### **Подвижная служба связи. *Системы ПСС появились в середине 70-х годов прошлого века. Первая глобальная система мобильной радиотелефонной связи и геостационарный КА Marisat разработаны компанией Comsat. Причинами отставания ПСС от ФСС были низкая энерговооружённость подвижных объектов и более сложные условия их эксплуатации (влияние рельефа местности, ограничения по размерам антенн и др.).***

Обычные стационарные наземные станции обеспечивают устойчивую связь при рабочих углах радиовидимости даже 50, а надёжную связь для подвижных абонентов можно гарантировать лишь при значительно более высоких значениях. Большие углы радиовидимости КА позволяют снизить энергетический запас радиолинии, предназначенный для компенсации потерь, которые обуславливаются замиранием при распространении радиоволн в ближней зоне со сложным рельефом местности.

Первоначально мобильные наземные станции разрабатывались как системы специального назначения (морские, воздушные, автомобильные и железнодорожные) и были ориентированы на ограниченное число пользователей. Мобильные ССС первого поколения строились с использованием геостационарных КА с прямыми (прозрачными) ретрансляторами и имели низкую пропускную способность. Для передачи информации применялись аналоговые методы модуляции.

Подсистемы ПСС создавались в основном для сетей, имеющих радиальную или радиально-узловую структуру, большие центральную и базовые станции, которые обеспечивают работу с подвижными наземными станциями. Потоки в сетях с предоставлением каналов по требованию были невелики, поэтому в них применялись преимущественно одно- или малоканальные наземные станции. Обычно такие сети предназначались для создания ведомственных и корпоративных сетей связи с удалёнными и подвижными объектами (судами, самолётами, автомобилями и т. д.), для организации связи в государственных структурах, в районах бедствия и при чрезвычайных ситуациях.

Качественный скачок в развитии ПСС произошёл не только в связи с внедрением цифровых методов передачи речи и данных, но и благодаря появлению первых проектов спутниковых систем на базе КА на негеостационарных орбитах. Орбиты таких спутников близки к поверхности Земли, что даёт возможность использовать вместо традиционных наземных станций дешёвые малогабаритные терминалы и небольшие антенны. Применение низко- и среднеорбитальных группировок не только позволяет решить проблему перегруженности геостационарных орбит, но и существенно расширяет сферу телекоммуникационных услуг спутниковых сетей, обеспечивая пользователей глобальной персональной связью с помощью терминала «телефонная трубка».

Сейчас в мире насчитывается более 30 национальных и международных проектов, использующих КА на низких орбитах. Наиболее известны Globalstar, Iridium, Orbcomm (США), а также российский «Гонец».

Однако переход на низкоорбитальные системы нельзя считать генеральной тенденцией развития мобильной спутниковой связи. Столь же важным фактором в эволюции соответствующих систем станет освоение средних высот. И здесь особо интересны планы развёртывания систем связи на средних (ICO) и эллиптических (Ellipso) орбитах. Правда, традиционные системы, использующие КА на геостационарных орбитах, не собираются сдавать свои позиции. Об этом говорят последние разработки, например, для Thuraya.

Отличительными особенностями систем ПСС второго поколения являются:

- применение цифровых технологий для передачи речи и данных, повышения качества и надёжности связи, расширения спектра услуг;

- интеграция с наземными системами подвижной связи (в первую очередь - с цифровыми сотовыми);

- совместимость и взаимодействие сетей подвижной спутниковой радиосвязи с телефонной сетью общего пользования на любом иерархическом уровне (местном, внутризоновом, междугороднем);

- многообразие типов абонентских терминалов различных категорий - стационарные, портативные, мобильные, необслуживаемые, приёмные и т.д.

Регламентом радиосвязи для систем ПСС выделены диапазоны частот до 1 ГГц, а также полосы частот в диапазонах L (1,5/1,6 ГГц) и S (1,9/2,2 и 2,4/ 2,5 ГГц). В перспективе разработчики систем ПСС намерены использовать более высокочастотные диапазоны Ka (20/30 ГГц) и EHF (40 ÷ 50 ГГц).

В настоящее время сохраняется деление систем ПСС по видам передаваемой информации на сети радиотелефонной связи (Inmarsat-A, -B и -M, AMSC, MSAT, Optus, AceS) и системы передачи данных (Inmarsat-C, Omnitracs, Euteltracs, Prodat).

Изо всех систем ПСС наиболее мощная орбитальная группировка принадлежит международной системе Inmarsat, которая охватывает четыре региона - Атлантический восточный (AOR-E), Атлантический западный (AOR-W), Индийский (IOR) и Тихоокеанский (POR). Каждый из них обслуживается одним действующим КА и имеет по 1-2 резервных спутника. Сеть Inmarsat обеспечивает покрытие практически всей поверхности Земли, за исключением приполярных районов.

На первых этапах создания Inmarsat связь организовывалась через арендуемые у других организаций спутники Маrisat, Marecs и Intelsat-5MSC. Сейчас орбитальная группировка Inmarsat состоит из шести собственных спутников Inmarsat (четыре КА типа Inmarsat-2, два - типа Inmarsat-3) и нескольких спутников старого поколения (типа Маrisat и Intelsat-5MCS).

Определённую конкуренцию Inmarsat составляют системы радиотелефонной связи AMSC и MSAT (предоставляют свои услуги в Северо-Американском регионе), ACeS и Optus (Азиатско-Тихоокеанский регион).

Особое место в системах передачи данных занимают сети на базе спутников, называемых littleLEO, которые предназначены для передачи данных со скоростью от 1,2 до 9,6 кбит/с. Их отличительными особенностями являются используемый диапазон частот (до 1 ГГц) и лёгкие КА (50 ÷ 250 кг). Кроме того, к бортовой аппаратуре little LEO не предъявляются жёсткие требования по времени доставки сообщений.

Чтобы осуществить передачу данных, достаточно одного спутника с электронным "почтовым ящиком" на борту. С каждым следующим витком он будет появляться над новым районом Земного шара, обеспечивая глобальное покрытие. Однако качество такого обслуживания будет определяться количеством КА в системе: для передачи данных в режиме электронной почты необходимы от 6 до 48 КА.

Системы этого класса имеют следующие особенности:

* данные передаются в пакетном режиме (короткие сообщения) с предоставлением каналов по требованию или в режиме группового опроса;
* возможно применение лёгких и портативных терминалов с ненаправленными антеннами;
* возможен групповой вывод КА на орбиту за счёт их малого веса;
* низкие тарифы по сравнению с другими системами передачи данных.

Системы группы littleLEO ориентированы на глобальный мониторинг перевозки грузов со сквозным контролем от пункта загрузки до пункта назначения. Они могут определять географические координаты подвижных объектов (долгота, широта, универсальное время, UTС), осуществлять сбор данных об окружающей среде, а также обеспечивать связь с подвижными объектами (судно, автомобиль, поезд, самолёт), в том числе двусторонний обмен данными.

В настоящее время развёрнуты орбитальные группировки двух таких систем - Orbcomm (США) и «Гонец-Д1» (Россия).

**Радиовещательная спутниковая служба** предназначена для приёма телевизионных и радиовещательных программ и является главной службой систем непосредственного телевизионного вещания (НТВ), спутникового телевизионного вещания и спутникового непосредственного радиовещания.

В настоящее время все системы телерадиовещания строятся на базе спутников, размещаемых на геостационарной орбите. В этой области телекоммуникаций, где основное требование к системе - сплошное покрытие обслуживаемых территорий, преимущества ССС перед другими средствами связи проявляются в наибольшей степени.

Одним из важных направлений развития телерадиовещания является интерактивное телевидение, которое позволяет удовлетворить индивидуальные запросы пользователей путём трансляции по спутниковым каналам заказных телепрограмм, а также предоставления возможностей интерактивного обмена в процессе телепередач. В таком случае пользователь из пассивного потребителя вещательной информации превращается в активного участника программы.

Хотелось бы лишний раз подчеркнуть темпы развития ССС. Три российские компании (МТРК «Мир», «Демос» и «Классика») объявили о создании NetStar - новой спутниковой системы высокоскоростного доступа в Internet, базирующейся на спутниках IntelSat- 604 (600 в. д.).

Ещё одно перспективное направление - прямое спутниковое вещание на компьютеры (служба Direct PC), позволяющее передавать по радиоканалам телевизионные изображения со скоростью до 30 Мбит/с и информацию Internet со скоростью до 400 кбит/с.

**Персональная и широкополосная связь** обеспечивается многими ССС - как геостационарными, так и с КА на более низких орбитах.

Системы bigLEO ориентированы на предоставление персональной радиотелефонной и пейджинговой связи в глобальном масштабе. Общей тенденцией развития таких систем является объединение в общую сеть радиотелефонных спутниковых и сотовых сетей различных стандартов (GSM, AMPS, CDMA и др.), а также предоставление максимально возможного набора услуг (передача данных, телексов, коротких факсимильных сообщений, определение местоположения и пр.).

Обслуживание абонентов этих сетей осуществляется в масштабе реального времени, что достигается за счёт применения корректируемых орбитальных группировок из 48…66 спутников. Для связи с абонентами используются L- и S-диапазоны частот. Масса спутников составляет 300…700 кг. Реальная пропускная способность стволов КА, как правило, не превышает 1200 эквивалентных телефонных каналов на КА (пропускная способность эквивалентного телефонного канала - 2,4 кбит/с). К системам bigLEO относятся сети Iridium и Globalstar.

Системы с КА на средневысотных орбитах (MEO) являются одним из основных конкурентов сетей класса bigLEO. Они ориентированы на один и тот же рынок услуг - глобальную радиотелефонную и пейджинговую связь. Однако если для обеспечения глобальной связи в системах bigLEO без межспутниковых линий требуются 150…210 наземных станций сопряжения (Globalstar), то в системах MEO достаточно 10…12 станций. Пропускная способность систем данного класса эквивалентна 3…4,5 тыс. телефонных каналов со скоростью передачи 2,4 кбит/с, что выше, чем в известных низкоорбитальных системах.

Пока реально не создано ни одной такой системы. Первый проект, который почти «готов к старту», - это ICO. За ним должны последовать SpaceWay и «Ростелесат».

Системы широкополосной связи, использующие LEO-, MEO- и GEO-орбиты, предназначены для передачи высококачественной речи, высокоскоростных потоков данных, мультимедийной информации, для доступа в Internet, а также предоставления других видов услуг, пока недоступных абонентам систем ПСС. Список возглавляют GEO- и MEO-системы сети SpaceWay, LEO-система Teledesic. За ними, вероятно, будут развёртываться Skybrige (LEO) и Astrolink (GEO).

Главная услуга широкополосных сетей - обмен данными в интерактивном режиме. Полагается, что в ближайшем будущем рынок средств широкополосной связи будет столь же масштабным, что и существующий рынок средств узкополосной связи. Более того, судя по анонсированным характеристикам намеченных к внедрению ССС, они смогут удовлетворить 20…30% потребностей этого рынка. Однако реально действующие ССС не обладают пропускной способностью, которая может обеспечить хотя бы минимальные потребности рынка.

Сегодня для систем широкополосной связи наиболее характерны два вида обслуживания - персональная связь и организация широкополосных магистралей в сетях различного назначения (в том числе транкинговых или сотовых). Первый тип услуг обеспечивает связь в режиме реального времени с предоставлением каналов по требованию (bandwidth-on-demand) и скоростью передачи информации до 2…10 Мбит/с.

Ко второму виду услуг относится передача высокоскоростных потоков информации (155,52 Мбит/с), характерных для сетей синхронной цифровой иерархии (SDN). Конечно, речь идёт не о замене волоконно-оптических каналов, а лишь о расширении их возможностей для связи с удалёнными пользователями или для разрешения проблемы «последней мили», особенно в труднодоступных районах. Высокоскоростную передачу данных предполагается реализовать в системах, использующих КА как на геостационарной орбите, так и на средневысотных (например, Spaceway) или низких орбитах (в частности, Teledesic, Skybridge).

Анализ тенденций развития ретрансляционных комплексов КА показывает, что сегодня производители не отдают явного предпочтения ни одной из технологических схем и в равной мере применяют как прозрачные, так и регенеративные БРТК. Очевидно, что оба способа будут использоваться ещё достаточно длительное время. Этот вывод напрашивается и при ознакомлении с заявками ряда организаций на создание ССС 3-го поколения. Например, Европейское космическое агентство предполагает использовать в системах 3-го поколения, построенных на базе технологии W-CDMA, прозрачный ретранслятор, на базе которого создавались самые первые на Земле ССС.

## Организация связи и маршрутизация. В зависимости от вида предоставляемых услуг, требований различных групп пользователей к оперативности связи и от взаимного расположения абонентов организуются следующие варианты взаимосвязи между абонентами:

* связь в режиме реального времени, если абоненты находятся в зоне радиовидимости одного КА. При передаче речевых сигналов задержка определяется только временем распространения сигнала и обработки сообщения на КА и наземной станции сопряжения;
* ретрансляция через наземные станции сопряжения, расположенные в зоне радиовидимости двух КА одновременно;
* межспутниковая связь, если абоненты находятся в зоне радиовидимости разных КА;
* перенос информации на борту КА (электронный «почтовый ящик»), при котором образуется виртуальный канал между абонентами, расположенными в разных географических регионах.

Следует отметить, что для абонентов, удалённых друг от друга на большие расстояния, длина канала связи, образованного с помощью межспутниковых линий, существенно больше, чем в наземной сети, что влияет на задержку сигнала.

**Расчёт необходимого числа ИСЗ в орбитальных группировках**

        В **глобальных спутниковых системах** взаимное расположение ИСЗ детерминировано. Поддерживаются заданные угловые расстояния как между орбитальными плоскостями, так и между ИСЗ в одной плоскости. В глобальных системах связи часто используется понятие связность в глобальном масштабе. Это понятие определяет возможность соединения абонентов, расположенных в общей или разных зонах обслуживания. Связность означает, что между абонентами теоретически существует (не обязательно используется) непрерывный или квазинепрерывный канал связи. Поэтому абоненты должны находиться в зоне, в которой виден, по меньшей мере, один ИСЗ.

        Связность в глобальном масштабе поддерживается, когда число ИСЗ в орбитальной группировке

  (1)
        где - число орбитальных плоскостей;  - число ИСЗ в одной плоскости.
        Формула (1) позволяет определить примерное число ИСЗ, без учёта особенностей структуры сети применительно к географическим районам Земли. При однократном покрытии поверхности Земли в орбитальной группировке на низкой орбите высотой Hleo = 1000 км должно быть не менее 60 ИСЗ. Покрытие считается двукратным, если в течение 90 ... 95 % времени видны одновременно два ИСЗ. На средневысотных орбитах (Hmeo = 1000 км) для двукратного покрытия нужно 10 ... 12 ИСЗ.

Выбор проектных характеристик космических радиолиний является сложной инженерной задачей и требует учета большого числа различных факторов, влияющих на энергетику радиолиний и качество передачи информации на требуемые дальности. Рассмотрим выражение, определяющее зависимость максимальной дальности связи *d* max от параметров космической радиолинии,



где *Р* - мощность передатчика; *Sб*, *Sз* - эффективные площади бортовой и наземной антенн; *η*Σ - коэффициент, определяемый суммарными потерями энергии сигнала в элементах антенно-фидерных трактов и при распространении в окружающей среде; *λ* - длина радиоволны; *k* = 1,38\*10-23 Дж/К - постоянная Больцмана; *Tэфф* - эффективная температура шума на входе приемной системы; Δ*f* - ширина полосы пропускания приёмника до детектора; *qп* - пороговое отношение мощности сигнала к мощности шума на входе приемного устройства, при котором обеспечивается заданное качество принимаемого сообщения.

### Основные характеристики негеостационарной орбитальной группировки

Хотя большинство известных негеостационарных систем строятся по принципу «колец», каждая из них имеет собственные баллистические параметры и уникальную орбитальную структуру. Орбитальная плоскость («кольцо») включает в себя несколько спутников, движущихся на низких околоземных орбитах, которые образуют на поверхности Земли пояс связи. Спутники одной орбитальной плоскости обычно размещаются равномерно вдоль орбиты.

Структура характеристик орбитальной группировки (ОГ) — параметры орбиты, типы орбитальных плоскостей, характеристики зон обслуживания и вероятностно-временные показатели) — приведена на рис. 2.

**Характеристики орбитальной группировки**

**Вероятностно –**

**временные**

**характеристики: время сеанса,**

**время ожидания,**

**время доставки**

**Структура**

**орбитальных**

**плоскостей: Число плоскостей и ИСЗ в них**

**Параметры**

**орбиты:**

**круговая,**

**наклон,**

**эксцентриситет**

**Зона**

**обслуживания:**

**глобальная,**

**региональная**

Рис. 2 - Параметры ОГ

Параметры орбитальной группировки — это тип орбиты (LEO, MEO, GEO, HEO), число орбитальных плоскостей КА, размещенных в каждой плоскости, а также высота и наклонение орбит. Взаимосвязь между этими и другими показателями ОГ определяется на основе геометрических соотношений, которые характеризуют положение КА относительно наземной станции, расположенной на границе зоны обслуживания.

Расстояние от наземной станции до КА в процессе его полёта — величина переменная, поскольку спутник проходит через зону радиовидимости наземной станции под различными углами. Наклонная дальность *d* зависит от угла дальности *γ*, который отсчитывается от центра Земли между направлениями на КА и границу зоны обслуживания (рис. 3).



Рис. 3. Основные геометрические характеристики КА: *H* — высота орбиты, *Rз* — радиус Земли, *θ* — угол видимости наземной станции на границе зоны обслуживания, *d* — наклонная дальность, *γ* — угол (отсчитываемый от центра Земли) между направлениями на КА и границу зоны обслуживания, *A* — граница зоны обслуживания

В общем случае наклонная дальность изменяется от максимального до минимального значений по достаточно сложному закону, который учитывает взаимное расположение наземной станции и КА на каждом витке. График зависимости наклонной дальности *d* от угла радиовидимости θ приведен на рис. 4.



Рис. 4 – Зависимость наклонной дальности *d* от угла радиовидимости (*h* – высота орбиты, км)

Важной характеристикой является и период обращения КА, с которым связана продолжительность сеансов связи и перерывов в обслуживании (табл. 2).

Таблица 2. - Основные параметры круговых орбит

|  |  |
| --- | --- |
| **Показатель** | **Значения параметра** |
| Высота орбиты *h*, км  | 800  | 1500  | 2000  | 6500 | 10 400  | 20 000 | 36 000 |
| Период обращения *T*, мин | 100  | 114  | 127  | 240 | 360  | 720  | 1400 |
| Число витков в сутки *N* | 14  | 12,6  | 11,3  | 6  | 4  | 2  | 1 |

Основной критерий эффективности радиотелефонных систем на базе негеостационарных ОГ — обеспечение связности в глобальном масштабе. В данном случае «связность» означает возможность соединения абонентов, расположенных в одной или разных зонах обслуживания, и поддержки между ними непрерывного (либо квазинепрерывного) канала связи. Непрерывная связность обеспечивается, если в зоне радиовидимости обоих абонентов находится как минимум один спутник.



Рис. 5. Зависимость числа КА в составе ОГ от высоты орбиты (*n* - кратность покрытия зоны видимости)

Очевидно: чем выше высота орбиты, тем меньше спутников требуется для глобального покрытия земной поверхности. Здесь следует определить понятие «кратность покрытия». Это величина, равная количеству спутников, одновременно находящихся в зоне радиовидимости. Чем выше кратность, тем надежнее связь.

Взаимосвязь между числом КА, высотой орбиты и углом радиовидимости наземной станции (без оптимизации структуры применительно к разным географическим регионам) показана на рис. 5. Так, для однократного покрытия поверхности Земли радиосигналом от КА на орбитах высотой 700÷1500 км необходимы как минимум 40÷70 спутников. Многократная связность обеспечивается, если в зоне радиовидимости абонентов в течение заданного времени находятся одновременно несколько КА. Вероятность наличия в зоне радиовидимости одновременно n спутников определяется как (1 - *δT*/*T*), где *δT/T* - доля периода обращения, в течение которой КА в среднем находится в зоне радиовидимости наземной станции. Например, в течение 90÷95% времени обслуживания покрытие поверхности считается двукратным, если в зоне наземной станции находятся, по крайней мере, два КА. Для систем со спутниками на средних высотах это условие выполняется уже при наличии 10÷12 КА. Площадь покрытия поверхности Земли одним КА тоже зависит от угла радиовидимости. Практический интерес представляет отношение площади зоны покрытия одного КА к общей площади поверхности Земли (рис. 6).



Рис. 6. Площадь зоны покрытия поверхности Земли одним КА в зависимости от высоты орбиты при различных углах радиовидимости *u*

В системах с КА на негеостационарной орбите, в которых положение спутников не является неизменным, качество обслуживания определяется вероятностно-временными параметрами. Среди них основные — средняя продолжительность сеанса связи, среднее время ожидания (или продолжительность перерывов в обслуживании) и время доставки информации или задержка обслуживания.

Время пребывания КА в зоне радиовидимости наземной станции зависит от угла радиовидимости и параметров орбит. Чем выше орбита, тем больше время пребывания КА в пределах прямой видимости станции. Расчет вероятностных показателей обычно проводится путем математического моделирования, что обусловлено сложностью получения соответствующих аналитических выражений. Они могут быть даны лишь для отдельных частных случаев.

Для одиночного КА на низких экваториальных орбитах период обращения T изменяется в пределах от 90 до 127 мин. Соответственно, максимальная продолжительность сеанса связи на экваторе составляет от 9 до 31 мин при высотах от 270 до 2 тыс. км. Что же касается полярных орбит, то максимальная продолжительность сеансов на широтах 50—600 составляет от 8 до 15 мин для высот от 800 до 1500 км.

В качестве примера рассмотрим параметры сеансов связи системы Orbcomm (табл. 3). Если до широты 500 средняя продолжительность сеанса связи составляет около 10 мин, а среднее время ожидания 3÷4 мин, то с увеличением широты перерывы между сеансами связи тоже растут - наиболее длительное ожидание сеанса (81,9 мин) наблюдается на широте 650. Дело в том, что на данных широтах наземные станции не попадают в оптимальную зону радиовидимости. Чтобы снять это ограничение, разработчики системы Orbcomm пересмотрели первоначальную концепцию построения системы относительно числа спутников: намечено увеличить его с 28 до 48.

Таблица 3. - Параметры сеансов связи системы Orbcomm (ОГ из 28 КА)

|  |  |
| --- | --- |
| **Показатель** | **Значение параметра** |
| Широта, 0 | 45  | 50  | 55  | 60  | 65 |
| Число сеансов в сутки  | 1143  | 993  | 726  | 392  | 129 |
| Средняя длина сеанса, мин  | 10,8  | 9,4  | 7,9  | 5,9  | 8,1 |
| Суммарное время радиовидимости, %  | 79,4  | 69  | 50,4  | 27,2  | 9 |
| Число перерывов в сутки  | 297  | 447  | 714  | 1048  | 1311 |
| Продолжительность перерывов, мин  | 2,8  | 4,2  | 7,8  | 15,9  | 81,9 |
| Суммарное время перерывов, %  | 20,6  | 31  | 49,6  | 72,8  | 91 |
| Глобальная доступность, %  | 81  | 70  | 53  | 32  | 17 |

Что же касается задержек обслуживания, то в отличие от сетей радиотелефонной связи, где задержка обычно не превышает 250—300 мс, для сетей пакетной передачи данных характерны большие величины. Обычно их оценивают как время доставки, т.е. время, за которое обеспечивается доведение сообщения до конечного пользователя. Время доставки зависит от следующих составляющих:

* времени ожидания сеанса связи;
* времени передачи сообщения на спутник (т. е. затраченного на процедуру установления связи);
* времени задержки в бортовом ретрансляторе (в случае обработки или переноса данных на борту спутника);
* времени передачи сообщения со спутника на Землю;
* времени задержки в наземных линиях связи.

Если оба пользователя находятся в общей зоне радиовидимости КА, задержка обычно невелика и определяется сетевыми протоколами и параметрами коммутационного оборудования. При переносе сообщений на борту КА (режим «почтового ящика») время доставки зависит от взаимного расположения абонентов и может составлять несколько часов.

Структура орбитальных плоскостей определяет баллистические параметры многоспутниковой системы, которые существенно зависят от взаимного расположения КА в орбитальной группировке. В настоящее время в ССС используются два типа ОГ — некорректируемая и корректируемая.

Для некорректируемой ОГ баллистические параметры орбит выбираются так, чтобы заданное время ожидания сеанса связи обеспечивалось без коррекции элементов орбиты. Увеличение числа КА в некорректируемой ОГ незначительно сокращает время ожидания. Для таких ОГ характерны малая масса КА, низкое энергопотребление, более низкие требования к точности ориентации. Все эти особенности некорректируемой ОГ играют решающую роль при создании легких и недорогих КА. Некорректируемая ОГ используется преимущественно в системах, рассчитанных на передачу коротких пакетов («Гонец-Д1», Orbcomm, Starsys и др.).

Корректируемая орбитальная группировка обычно применяется при необходимости глобального равномерного покрытия земной поверхности. Ее динамическая устойчивость поддерживается с помощью специальной установки для коррекции орбиты. Для обеспечения минимального времени ожидания сеанса связи плоскости орбит должны быть разнесены по долготе восходящего узла, а спутники равномерно распределены вдоль орбиты в каждой плоскости. Основное преимущество корректируемой ОГ — реализация заданных временных характеристик при минимальном числе спутников в системе, что особенно важно для глобальных сетей радиотелефонной связи. Точность поддержания взаимного размещения КА на орбите в течение всего срока эксплуатации должна быть очень высокой, поскольку смещения КА друг относительно друга приводят к появлению необслуживаемых участков в зонах покрытия.

Для определения параметров движения в начальный период полета и поддержания КА на орбите с заданной точностью необходим радиоконтроль орбиты. На первых этапах развертывания системы он осуществляется с помощью сети наземных контрольно-измерительных станций, обеспечивающих слежение за КА. Существующие баллистические модели движения (они основаны на учете возмущения от внешних воздействий, определяющих деградацию орбиты) позволяют достаточно точно спрогнозировать параметры движения КА.

Во всех системах, использующих корректируемую ОГ, на борту КА установлена навигационная аппаратура для определения параметров орбиты по сигналам спутников GPS/«Глонасс». Это позволяет контролировать параметры ОГ автономно, т. е. пользоваться услугами наземных станций слежения за КА лишь в нештатных ситуациях. Интенсивность коррекции зависит от точности, с которой требуется удерживать КА на орбите. Наиболее жесткие требования к точности контроля за параметрами орбит — в системах с межспутниковыми линиями связи (Iridium, Teledesic), где смещение спутников может привести к нарушению правильности функционирования всей системы.

В глобальных ССС необходимо также обеспечить равномерный охват всей поверхности Земли и отсутствие «мертвых зон», для чего требуется удерживать КА в расчетной точке с максимальной возможной точностью (±0,20). Достоверных сведений о том, как часто необходимо производить коррекцию орбиты, пока нет, поскольку не накоплено достаточного количества опытных данных. Однако, как показывают расчеты, коррекция в таких системах, как Iridium, будет необходима не чаще 1 раза в 0,5—1,5 мес., что означает следующее: если срок активного существования КА составит 7 лет, то двигатели будут включаться примерно 100 раз.

Зоны обслуживания наземных станций, расположенных в произвольных точках Земли, зависят от угла радиовидимости КА, который существенно влияет на качество соединения с абонентом. При малом угле радиовидимости сигналы от спутника к Земле проходят через большее число слоев земной атмосферы, чем при больших углах, а следовательно, имеют большие потери энергии (затухание сигнала). Кроме того, при увеличении угла радиовидимости ухудшение качества сигнала, связанное с наличием препятствий на поверхности Земли (строений, гор, растительности), не столь велико, как при малых углах. На связь хорошего качества следует рассчитывать при минимальных углах видимости (от 15 до 200), а на очень хорошую — при углах от 400. При угле радиовидимости 50 и менее устойчивая связь почти невозможна.

Глобальное обслуживание можно обеспечить, если осуществить вывод КА на полярную орбиту с наклонением 900. Для передачи коротких пакетов данных достаточно одного спутника с электронным «почтовым ящиком» на борту: с каждым новым витком он будет появляться над новым районом Земного шара, поддерживая глобальное обслуживание. Между тем использование нескольких полярных орбитальных плоскостей сопряжено с опасностью столкновения спутников.

Чтобы предотвратить столкновение КА на полюсах, необходим угловой разнос между орбитальными плоскостями, образующий минимальную дистанцию «промаха». Это ведёт к дополнительным сложностям формирования ОГ, поэтому сегодня реально используются околополярные орбиты с наклонением 80—860.

Что касается равномерности покрытия, то спутниковые системы, базирующиеся на КА с наклонными орбитами, наиболее эффективны. Однако следует помнить, что районы с высокими широтами могут обслуживаться только спутниками с относительно низкими углами радиовидимости.

### Критерии оптимизации и сравнение орбитальных структур

Для оптимизации орбитальных структур используют разные критерии: максимальное время пребывания КА в зоне радиовидимости заданного географического региона, минимальное время ожидания одиночного КА, затраты на создание орбитальной группировки с учетом веса КА, высоты орбиты и средств вывода КА на орбиту, а также ряд других. Однако, как показывает практика, невозможно построить орбитальную структуру, которая удовлетворяла бы всем требованиям одновременно.

Задача сравнения систем является многокритериальной и достаточно сложной. В отечественной практике часто используется упрощенная методика, предложенная А. И. Аболицем. Пример определения суммарного времени пребывания КА в зоне видимости наземной станции в зависимости от высоты орбиты (рис. 7) показывает, что на средних широтах наиболее выгодны орбиты с малым углом наклонения. Такое наклонение орбит выбрано в системе ECCO (H=2000 км) и Ellipso (субгруппировка Concordia, H=8040 км).

Оптимизация по критерию максимального времени пребывания КА в зоне прямой видимости наземного абонента показывает, что средневысотные ОГ (Odyssey, ICO) обеспечивают высокие показатели обслуживания практически на всех широтах.

Вообще, с увеличением широты местоположения абонента суммарное время пребывания КА в зоне прямой видимости наземной станции падает. Например, если станция находится на широте 600, в ее зону уже не попадают спутники с наклонением орбиты 00. Однако на этой широте увеличивается эффективность систем, использующих КА на наклонных и полярных орбитах.



Рис. 7. Зависимость суммарного времени *t* радиовидимости КА (усредненного по всем виткам за сутки) при нулевом угле радиовидимости для различных
наклонений орбиты (*i* = 0÷900). Данные приведены для широты 600

Так, система Globalstar (высота 1400 км, наклонение 520) рассчитана на обслуживание территорий в средних широтах (от 720 ю.ш. до 720 с.ш.), где она обеспечивает практически постоянное двукратное покрытие земной поверхности. По этому показателю Globalstar существенно отличается от конкурирующей сети Iridium - там структура космического сегмента оптимизирована для однократного покрытия территорий. Что же касается высокоширотных регионов, они системой Globalstar вообще не обслуживаются. В России вне зоны действия Globalstar остаются труднодоступные северные районы и трасса Северного морского пути.

Моделирование, проведенное для сети Iridium с целью определения кратности покрытия земной поверхности, показало, что при углах радиовидимости более 100 в приэкваторной зоне обслуживания (от 300 с.ш. до 300 ю.ш.) вероятность однократного покрытия с нулевым временем ожидания T будет равна 0,973÷0,974. Если время увеличивается до 2 мин, вероятность становится равной 1. Вся территория РФ обслуживается при однократном покрытии с вероятностью, равной 1, при T=0; двукратное покрытие обеспечивается на территориях севернее 700 с.ш. При углах радиовидимости более 200 (что ближе к реальным условиям эксплуатации) результаты существенно хуже: в приэкваторной зоне при T=0 вероятность двукратного покрытия составляет 0,5÷0,6, а при T=2÷3 мин 0,7÷0,91.

Чтобы решить проблему обеспечения устойчивой связи в высокоширотных районах, в состав орбитальной группировки таких систем, как Orbcomm, Gemnet и Faisat, включены по 1÷2 дополнительные плоскости с малым числом КА, но более высоким наклонением. Теоретически, эти орбитальные структуры должны перекрывать всю территорию Земного шара. Однако малое число КА в дополнительных плоскостях не позволяет обеспечить высокие вероятностно-временные характеристики обслуживания. Так, в Orbcomm среднее время ожидания (3÷4 мин) обеспечивается лишь для абонентов, расположенных на широтах до 500. На широтах от 600 могут возникнуть более длительные перерывы в обслуживании, а на широтах выше 650 связь в системе может быть организована только через четыре дополнительных КА.

Что же касается структуры систем на средневысотных орбитах (ICO, Spaceway, NGSO), то здесь разброс в характеристиках весьма незначителен. В этих системах космические аппараты выводятся практически на одну и ту же высоту, а различие в наклонении орбит весьма невелико. Системы со средневысотными КА обеспечивают лучшие характеристики обслуживания за счет увеличения углов радиовидимости и числа одновременно наблюдаемых КА. Так, радиовидимость двух спутников в системе ICO поддерживается в 95% суточного времени, при этом хотя бы один из них наблюдается под углом видимости более 300.

# Пересчёт координат

Спутниковые системы определяют координаты в общеземных системах: GPS - в **WGS-84**, ГЛОНАСС - в **ПЗ-90**. Используют же координаты в референцной, например в **СК-42**, или местной системе. Возникает необходимость пересчета координат из одной системы в другую. Общеземные геоцентрические координаты WGS-84 пересчитывают в геодезические широты B, долготы L и высоты H. Геодезические высоты трансформируют в ортометрические высоты Hg. По геодезическим широтам и долготам вычисляют плоские прямоугольные координаты, например, в проекции **UTM**. От вычисленных таким образом координат необходимо перейти к соответствующим координатам, применяемым в России. Переход может быть выполнен на любом этапе. Естественно в самом начале перейти от WGS-84 к ПЗ-90, затем на эллипсоид Красовского, вычислить геодезические координаты, нормальные высоты и плоские координаты Гаусса-Крюгера.

**Пересчёт геоцентрических координат** Взаимосвязь между WGS-84 и ПЗ-90 устанавливают при помощи формул Гельмерта:

***R****WGS* = *D****R***0 + (1+*m*)*W.Rпз*,

***R****WGS* = (*XWGS*, *YWGS*, *ZWGS*)*T*, *D****R***0 = (*DX*0, *DY*0, *DZ*0)T,

***R****пз* = (*Xпз*, Yпз, *Zпз*)T,

где ***R****WGS* и ***R****ПЗ* - векторы в соответствующих координатных системах, *D****R***0 - вектор
начала координатной системы ПЗ-90 в системе WGS-84; *m* - различие линейных масштабов в этих системах; W - матрица поворота координатных осей, зависит от трех малых углов *ωX*, *ωY*, *ωZ*. Обычно угловые параметры не превышают 1". Поэтому матрицу W, где ее элементы в радианах, представляют в виде:



Таким образом, для пересчёта координат надо знать семь параметров трансформирования: *DX*0, *DY*0, *DZ*0, *m*, *ω*X, *ω*Y, *ω*Z. Их появление обусловлено точностью установки общеземных геодезических систем отсчета. Эти параметры многократно уточнялись. Для примера несколько их числовых значений приведено в таблице 4 (см. также: Параметры Земли 1990).

Таблица 4. – Параметры систем координат

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Параметры | ПЗ-90WGS-84 | ПЗ-90WGS-84 | СК-42ПЗ-90 | СК-42ПЗ-90 |
| *DX*0, м | -0,3 | 0 | +26,6 | +25,00 |
| *DY*0, м | +2,2 | 0 | -134,8 | -141,00 |
| *DZ*0, м | +1,0 | +1 | -77,3 | -80,00 |
| *m*.106  | -0,06 | 0 | -0,06 | 0,00 |
| *ωX*'' | -0,05 | 0 | -0,17 | 0,00 |
| *ωY*'' | -0,01 | 0 | -0,39 | -0,35 |
| *ωZ*'' | -0,07 | -0,2 | -0,83 | -0,66 |

Формулу Гельмерта, учитывая, что **W**-1 = **W***T*, перепишем так, чтобы она была удобной для перехода от WGS-84 к ПЗ-90:

***Rпз***= (1- *m*)**W***T*(***RWGS*** – *D****R***0) » (1- *m*)**W***T****RWGS*** – *D****R***0 .

       Если координаты не трансформировать, то возникнет погрешность:

|*d p*| < (*D X*02 + *D Y*02 + *D Z*02)1/2 + *Rз*(3*m*2 + 2(*ω X*2 + *ωY*2 + *ω* *Z*2))1/2,

где *Rз* - радиус Земли, а *ωX*, *ωY*, *ωZ* выражены в радианах. В настоящее время, как следует из данных табл. 4, эта погрешность может достигать 10 м.

**Пересчет геоцентрических координат в квазигеоцентрические.** Связь координат референцных и общеземных систем устанавливается формулой Гельмерта (Пеллинен, 1978):

***R*** = *D****R*** + (1+*m*)**W**.***r***,

***r***= (*X****r***, *Y****r***, *Z****r***)*T*, ***R***= (*XR*, *YR*, *ZR*)*T*, *D****R***= (*DX*0, *DY*0, *DZ*0)*T*,

где *r* и *R* - векторы соответственно в рефренцной и в общеземной системах координат, *D****R*** - вектор начала национальной системы в общеземной системе, *m* - разница в линейных масштабах систем; **W** - матрица поворота координатных осей от рефренцной системы к общеземной.

Ориентировочные значения всех семи параметров взаимосвязи рефренцной и общеземной систем приведены в таблице 4[[1]](#footnote-1) Несколько другие значения даны в (Параметры Земли 1990).

С целью пересчета координат из общеземной в рефренцную систему уравнения связи должны быть записаны в виде:

**r** = (1- m)**W**T(**R** - D**R**) .

        Предположим, определены координаты двух пунктов: **R**A пункта A и **R**В пункта B. Тогда уравнение связи для разности координат принимает следующий вид:

**r**B - **r**A = (1-m) **W**T(**R**B - **R**A) .

        В этой формуле нет линейных параметров D**R** . Вместе с ними исчезли и их погрешности. Поэтому в относительных определениях имеет смысл трансформировать не координаты, а измеренные с базовой станции приращения координат.

**Пересчет координат в местную систему.** Если с помощью спутниковой системы позиционирования определены координаты трех - четырех опорных пунктов, то появляется возможность пересчитать координаты текущих точек в координатную систему окружающих пунктов. Пересчет тем точнее, чем меньше площадь объекта работ.
         Для каждой опорной точки с известными GPS прямоугольными геоцентрическими координатами R в общеземной системе и вычисленными по геодезическим широтам, долготам и высотам координатам r в местной системе, используя преобразованные формулы трансформирования, можно составить следующие уравнения поправок vi:

*vX*= *DX*0 -*Zr wY* + *Yr wZ*+ *Xr m* - (*XR - Xr*),

*vY* = *DY*0 + *Zr wX*- *Xr wZ*+ *Yr m* - (*YR - Yr*),

*vZ* = *DZ*0 - *Yr wX*+ *Xr wY*+ *Zr m* - (*ZR - Zr*).

В уравнениях 7 неизвестных параметров, образующих вектор:

***t*** = (*DX*0, *DY*0, *DZ*0, *wX, wY, wZ, m*)*T*.

        Чтобы его найти, нужны координаты в 2 системах минимум для 3 пунктов. Тогда будем иметь матричное уравнение поправок:

***v =* A *t - L,***

где в матрицу **A** собраны коэффициенты, стоящие в уравнениях поправок *vi* перед искомыми параметрами трансформирования, а в вектор *L* - разности координат в общеземной и местной системах. Пусть P весовая матрица поправок v. Решая задачу по MНК находим параметры:

**t = (ATPA)-1. ATPL.**

        Задачу можно упростить, исключив вектор D**R**. Для этого координаты некоторого опорного пункта А следует вычесть из соответствующих координат других опорных пунктов и составить следующего вида уравнения поправок:

*vXi = -*(*Zri - ZrA*)*wY +* (*Yri- YrA*)*wZ +* (*Xri- XrA*)*m -* [(*XRi - Xr i*)*-* (*XRA - XrA*)],

*vYi = +*(*Zri - ZrA*)*wX -* (*Xri - XrA*)*wZ +* (*Yri - YrA*)*m -* [(*YRi - Yri*) *-* (*YRA- YrA*)],

*vZi = -* (*Yri - YrA*)*wX +* (*Xri- XrA*)*wY +* (*Zri - ZrA*)*m -* [(*ZRi - Zri*) *-* (*ZRA - ZrA*)].

Решив эти уравнения по МНК, определим вектор искомых параметров
 ***e*** = (*wX*, *wY*, *wZ*, *m*)*T*

       В России создана новая Государственная геодезическая сеть. На смену координатам СК-42 могут быть введены новые координаты на эллипсоиде Красовского СК-95. Чтобы перейти от общеземной к новой референцной системе достаточно будет к геоцентрическим координатам прибавить поправки (Базлов и др., 1996):

   *D X* = -25,90 м,     *D Y* = +130,94 м,      *D Z* = +81,76 м.

**Пересчёт геодезических координат.** Геодезические широту *B*, долготу *L* и высоту *H* легко вычислить по трансформированным пространственным прямоугольным координатам *X, Y, Z* и по формулам раздела 2. Однако, чтобы найти X, Y, Z, надо иметь надежные параметры трансформирования. Кроме того, для отдельных регионов модель Гельмерта с 7 параметрами трансформирования может оказаться недостаточно точной. Поэтому применяют и более сложные модели трансформирования, например, полиномиальные:



*Br, Lr* и *BW, LW* - широты и долготы, отнесенные соответственно к референц-эллипсоиду и общеземному эллипсоиду, BWO, LWO - средние для данного региона значения координат *BW, LW, au, bv* - коэффициенты пропорциональности, выбирают произвольно, но так, чтобы U и V стали небольшими величинами, *ast*, *bst* - эмпирические коэффициенты. Их общее число равно (*n*+1)(*n*+2). Для их определения, надо иметь не менее (*n*+1)(*n*+2)/2 точек, для которых известны и *Br, Lr* и *BW, LW*. Полиномиальные модели эффективно исключают разного рода систематические, свойственные только для данного региона, искажения, которые не возможно учесть иными, более простыми методами ( Featherstone, 1997).

**Пересчёт геодезических координат по дифференциальным формулам.** В географической практике иногда GPS измеряют геодезические координаты B, L, H. Их следует пересчитать из WGS-84 в СК-42. Это можно выполнить по дифференциальным формулам, учитывающим различия в размерах эллипсоидов, а также смещение начал и разворот осей координатных систем (Герасимов и др., 1993). В формулах геодезические координаты WGS-84 даны без индексов, а в СК-42 - с индексами r; в формулах размерности и знаки параметров трансформирования изменены так, чтобы они соответствовали данным табл. 4. Формулы имеют вид:

Br = B + [e2N sinB cosB da/a + (1+N2/a2)N sinB cosB de2/2 +

+ (DXo cosL + DYo sinL) sinB - DZo cosB]/(M+H) +

+ (1 + e2 cos2B)(wX sinL - wY cosL)/r" +

+ me2 sinB cosB;

Lr = L + (DXo sinL - DYo cosL)/(N+H) cosB -

- (1 - e2) tgB (wX cosL + wY sinL)/r" + wZ/r";

Hr = H - a.da/N + N sin2B de2/2 -

- (DXo cosL + DYo sinL) cosB - DZo sinB +

+ e2N sinB cosB (wX sinL - wY cosL)/r" -

- (N + H - e2N sin2B)m;

da = ar - a; de2 = er2 - e2, r" - число угловых секунд в радиане.

**Пересчет плоских прямоугольных координат.** Поясним суть решения задачи на примере пересчета плоских прямоугольных UTM координат, найденных при помощи GPS, в произвольную локальную систему.

Между двумя плоскими прямоугольными координатными системами существует следующая связь:



        В формулах локальные координаты даны без штрихов, а координаты UTM - со штрихами.
Необходимо найти 6 неизвестных параметров трансформирования: xO, yO, xO', yO' -
координаты точки, относительно которой координатные оси развернуты на угол g, m различие линейных масштабов. Пусть для n > 1 пунктов координаты известны в обеих системах. Примем

xI’= [x']/n , yI’= [y']/n .

        Квадратными скобками обозначены по Гауссу суммы заключенных в них величин. Иными словами, в качестве xO' принимается среднее из абсцисс, а в качестве yO' - среднее из ординат опорных точек. Применяя МНК, получаем:

xI = [x]/n , yI = [y]/n ,

C = m cosg = [Dx Dx' + Dy Dy']/[( Dx'2 + Dy'2)],

S = m sing = [Dx Dy' - Dx' Dy]/[( Dx'2 + Dy'2)],

m = (C2 + S2)1/2, tgg = S/C ,

где для i-ой опорной точки

Dxi' = xi’- xI’, Dyi' = yi'- yI’, Dxi = xi- xI, Dyi = yi - yI.

        Этот метод можно использовать для пересчета прямоугольных координат UTM в координаты Гаусса-Крюгера. При этом для точек в пределах листа топографической карты, например масштаба 1:100 000, погрешности трансформирования останутся в пределах графической точности масштаба.

**Пересчёт высот.** По координатам X,Y,Z определяют геодезические высоты H. В повседневной практике в России пользуются не геодезическими, а нормальными Hg . При этом

Hg = H - z ,

где z - высота квазигеоида. Таким образом, для вычисления нормальных высот по геодезическим высотам нужны карты высот квазигеоида или гравиметрические определения. Другим путем решения задачи являются измерения спутниковой системой на ряде пунктов, нормальные высоты которых уже известны. Тогда можно образовать разности из высот для двух пунктов:

D Hg = D H - D z .

         Как видно, разность нормальных высот отличается от разности геодезических высот на величину Dz. Неучет величин Dz приведет к погрешностям в передаче нормальных высот. Погрешности тем больше, чем больше расстояния между пунктами. Приближенно можно полагать, что с каждым километром разности Dz изменяется на 1- 2 см. При расстояниях между пунктами 50 км эти погрешности могут превысить 1 м. Для учета изменений высот квазигеоида применяют методы интерполяции, например, по формуле (Непоклонов и др., 1996):

D z = Ax + By + Cxy + D,

где x, y - плоские прямоугольные координаты, A, B, C, D - коэффициенты. Чтобы их вычислить, надо знать высоты H и Hg для 5 или большего числа пунктов. Достаточно прост способ среднего весового, восходящий к Гауссу. Пусть для ряда пунктов известны высоты HGPS в местной системе и геодезические высоты HGPS. Алгоритм пересчета следующий
1. Определяем веса измерений Pi = (1/Si)q, где Si   - расстояние от текущей точки до i-го
пункта с известными высотами в двух системах, *q* > 0 (подбирается экспериментально).
2. Находим преобразованную высоту текущего пункта по формуле

 HЛОК = HGPS + a Pi.( HЛОК - HGPS)i / aPi.

**Сводка основных формул раздела**

Нормы отношения сигнал /визометрический шум для спутникового канала:

 20lg 0,7*B*/*Uшвиз* = 57+10lg 2500/5000 = 54 дБ (1,0%).

        Связность в глобальном масштабе поддерживается, когда число ИСЗ в орбитальной группировке 

где - число орбитальных плоскостей;  - число ИСЗ в одной плоскости.

Максимальная дальность связи *d* max от параметров космической радиолинии,



где *Р* - мощность передатчика; *Sб*, *Sз* - эффективные площади бортовой и наземной антенн; *η*Σ - коэффициент, определяемый суммарными потерями энергии сигнала в элементах антенно-фидерных трактов и при распространении в окружающей среде; *λ* - длина радиоволны; *k* = 1,38\*10-23 Дж/К - постоянная Больцмана; *Tэфф* - эффективная температура шума на входе приемной системы; Δ*f* - ширина полосы пропускания приёмника до детектора; *qп* - пороговое отношение мощности сигнала к мощности шума на входе приемного устройства, при котором обеспечивается заданное качество принимаемого сообщения.

1. Базлов и Бовшин и др., 1995; Бойков и др., 1993; Пеллинен, 1992. [↑](#footnote-ref-1)