

# О НАЗЕМНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЕ ГЛОБАЛЬНОЙ ЛАЗЕРНОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ ИЗ КОСМОСА

М.Е. Прохоров, А.И. Захаров, А.В. Миронов

## Введение

Каждое следующее поколение космических аппаратов (КА) исследующих космос, околоземное космическое пространство, а также Землю из космоса, получают все большие объемы информации. Обработка этой информации на борту космического аппарата с необходимым качеством чаще всего невозможна, поэтому ее необходимо передавать на Землю. Однако современные средства радиосвязи накладывают на ширину передающих каналов в радиодиапазоне достаточно жесткие ограничения. Актуальным становится переход на более скоростную систему передачи информации - лазерную. В данной работе рассматриваются вопросы выбора мест для размещения пунктов приема лазерной информации на поверхности Земли и связанные с этим проблемы.

## Оценки потоков информации передаваемых с орбиты на Землю

Рассмотрим несколько различных примеров наблюдений, проводимых с бортов КА, и приведем оценки порождаемых при этом потоков информации.

## Метеорология.

Метеорология одно из наиболее известных и затребованных направлений дистанционного зондирования Земли из космоса. Примером "серьезного" метеорологического спутника может служить КА "Электро-Л", выведенный на орбиту в начале 2011 г. КА расположен на геостационарной орбите, он совершает один виток вокруг Земли за сутки. Таким образом, Земля не смещается относительно КА и он наблюдает всегда одну и ту же область поверхности. Для наземного наблюдателя геостационарный спутник не меняет свою высоту над горизонтом и азимут со временем.

"Электро-Л" ведет наблюдения Земли в 10 полосах оптического и инфракрасного диапазонов. Разрешение получаемых изображений составляет 1 км в оптике и 4 км для инфракрасных изображений. Для геостационарной орбиты это соответствует изображениям 12000x12000 и 3000x3000 пикселей, соответственно. Объем одного сеанса наблюдений (во всех спектральных диапазонах) составляет примерно 1 Гбайт. В штатном режиме фотографии Земли будут производиться 2 раза в час, в ускоренном режиме - 6 раз в час. Таким образом, средний поток информации от спутника "Электро-Л" будет составлять 4,4 Мбит/с в штатном и 13,2 Мбит/с в ускоренном режимах. Подобные скорости передачи вполне доступны современным системам космической связи в радиодиапазоне.

Метеорологический спутник следующего поколения будет фотографировать Землю в тех же диапазонах с разрешением в 100 м на поверхности и частотой кадров 1 раз в 20-30 с. В этом случае поток информации будет составлять уже 300-400 Мбит/с. Такой поток информации превосходит возможности обычной космической радиосвязи примерно на порядок.

## Обзоры неба. Контроль околоземного космического пространства. Астероидно-кометная опасность.

Здесь перечислены несколько задач фундаментального и прикладного характера решение которых сводится к сплошному обзору всей небесной сферы с регистрацией всех обнаруживаемых объектов: звезд, галактик, квазаров, астероидов, искусственных спутников Земли и космического мусора. Помимо этого необходимо определять координаты объектов, их блеск, а при необходимости и некоторые другие характеристики.

Наиболее жесткой из названных задач является контроль околоземной спутниковой группировки, в которой за фиксированное время, не превышающее нескольких часов, обнаруживать появление, исчезновение и изменение орбит спутников Земли. Если время обзора всей небесной сферы составляет 3 часа, а разрешение получаемых изображений - 1 угловую секунду (такое разрешение требуется для высокоточного определения координат объектов), то поток получаемой информации будет составлять около 800 Мбит/с.

## Ретрансляция и сбор информации.

Большие потоки информации также образуются при ретрансляции информации по маршруту Земля-ретранслятор(ы)-Земля или спутник-ретранслятор-Земля.

## Орбиты спутников и передача информации

Для получения изображений поверхности Земли с очень высоким разрешением спутники запускают на

низкие орбиты - на небольшой высоте над поверхностью Земли. Однако, для таких аппаратов существует определенная проблема с передачей информации. Выработка информации происходит непрерывно, а передача ее возможна только когда спутник находится в прямой видимости наземной приемной антенны. Для низкоорбитальных спутников длительность периода прямой видимости составляет всего несколько минут при 1,5-часовой длительности витка. Для непрерывной передачи информации с низкоорбитального спутника необходима сеть приемных станций с шагом не более 1000 км по всей поверхности Земли. Построение подобной сети на суше - очень дорого, а построение глобальной сети невозможно из-за океанов.

Существуют два типа орбит спутников, у которых таких проблем нет: геостационарные или геосинхронные и высокоэллиптические. Геостационарной называется круговая орбита с высотой около 36000 км над поверхностью Земли, лежащая в плоскости экватора. Виток на этой орбите равен звездным суткам. Для наблюдателя на поверхности Земли геостационарный спутник выглядит неподвижным. Геостационарный спутник идеально подходит для длительной высокоскоростной передачи информации с орбиты. Области расположения геостационарных спутников над Землей - так называемые "места стояния" - очень дефицитный ресурс, который распределяется специальной международной организацией.

Следующий тип орбиты - геосинхронная. Период обращения на этой орбите также, как и у геостационарной, равен суткам. Но она не является круговой или/и не лежит в плоскости экватора. Для наземного наблюдателя геосинхронный спутник с периодом в сутки описывает на небе фигуру похожую на восьмерку. Если размеры "восьмерки" не слишком велики, то по возможностям передачи информации геосинхронный спутник практически не уступает геостационарному. Разрешения для запуска геосинхронных спутников пока не требуются.

Высокоэллиптические орбиты - орбиты с эксцентриситетом выше 0,6-0,7 и периодами обращения от 12 часов до 7 суток. На подобной орбите спутник большую часть времени проводит вблизи апогея - на максимально удалении от Земли. После этого спутник снижается, быстро пролетает над Землей и возвращается в к апогею. В области апогея скорость перемещения спутника невелика, что позволяет передавать оттуда большие объемы информации. Поскольку рабочий участок траектории у спутников на высокоэллиптических орбитах лежит именно в области апогея, возможны передача информации в ходе всего сеанса наблюдений.

Наиболее интересным решением для высокоскоростной и практически непрерывной передачи информации со спутников на орбитах других типов является ретрансляция сигнала через геостационарный или геосинхронный спутник-ретранслятор. Трех ретрансляторов, разнесенных по геостационарной орбите на 120 градусов, достаточно для обслуживания любых спутников околоземной группировки.

#### **Частотные диапазоны для передачи данных**

Сегодня для передачи сигнала на орбиту и обратно стандартным диапазоном являются сантиметровые радиоволны. Пропускная способность подобных каналов сегодня составляет десятки Мбит/с, но в принципе может быть повышена до 100 Мбит/с.

Большие возможности для передачи информации предоставляет так называемый К-диапазон: интервал частот от 11 до 40 ГГц (длины волн от 3 до 0,75 мм). Скорость передачи в этом диапазоне достигает 1 Гбит/с, но частоты в нем (для передачи с высоких орбит на Землю) распределяются в международном порядке и в основном уже заняты каналами спутникового телевидения.

#### **Лазерные системы передачи информации**

Для освоения еще более высоких скоростей передачи информации необходимо переходить от радио к лазерным системам передачи информации.

Лазерные космические системы связи больше всего похожи на атмосферные оптические линии связи (АОЛС), или, в английском варианте, Free Space Optics - "оптика свободного пространства". АОЛС - вид связи, получивший свое развитие и коммерческое применение в конце 90-х годов в результате объединения лазерных и телекоммуникационных технологий. Современное широкое распространение АОЛС во началось в 1998 году, когда были созданы недорогие полупроводниковые лазеры мощностью в 100 мВт и более, а применение цифровой обработки сигнала позволило избежать ненормированного затухания сигнала и выполнять повторную передачу пакета информации при обнаружении ошибок.

Лазерные системы передачи данных работают в близком инфракрасном диапазоне спектра. Типичные рабочие длины волн, в зависимости от модели оборудования, входящего в АОЛС, составляют 810-910 нм.

В первые годы эксплуатации АОЛС наблюдалось некое недоверие к данным системам из-за особенности среды распространения - атмосферы. Подвергалась сомнению доступность канала связи при различных атмосферных условиях, например, осадках, имеющих существенное влияние на инфракрасный спектр. Но, как показывает практика, такие атмосферные явления, как дождь, снег, туман, не нарушают работу АОЛС полностью. При правильном подходе и соблюдении всех требований к эксплуатации современные АОЛС обеспечивают уровень доступности 99,9%, а показатели ошибок составляют 10-12. АОЛС работают в условиях прямой видимости. Типичная дистанция для них составляет несколько километров. В городах, при установке передатчиков на высоких зданиях она достигает десятков километров, а в горах доходит до сотни километров.

Космическая линия связи включает в себя то же оборудование - интерфейсный модуль, модулятор, лазер, оптическая система передатчика, оптическая система приемника, демодулятор и интерфейсный модуль приемника. Передатчик представляет собой излучатель на основе импульсного полупроводникового лазерного диода. Приемник в большинстве случаев имеет в своей основе скоростной pin-фотодиод или лавинный фотодиод. Между ней и АОЛС существуют два основных отличия: 1) вертикальное направление луча и 2) существенно большее расстояние между приемником и передатчиком. Луч космической системы связи пересекает атмосферу в вертикальном направлении, основное влияние на его распространение оказывают наиболее плотные нижние слои атмосферы, толщина которых составляет несколько километров. Таким образом, влияние атмосферы в космических системах оказывается даже менее существенным, чем в АОЛС, у которых луч распространяется горизонтально, через наиболее возмущенные приземные слои воздуха.

У этой картины есть единственное и очень серьезное отличие - инфракрасное излучение поглощается плотными кучевыми облаками. Поскольку нижняя граница таких облаков располагается на высотах не менее 800 м, то на АОЛС они влияния не оказывают. Одни из способов решения этой проблемы - вынос приемника излучения выше облачного слоя, т.е. на высоту в 5-6 км. Такие эксперименты ставились в США и в Европе - приемник лазерного излучения устанавливался на самолете или воздушном шаре. На землю же сигнал передавался по высокоскоростной радиолинии. К сожалению, использование привязных аэростатов при такой высоте подъема невозможно, а свободные аэростаты и самолеты необходимо регулярно сменять: аэростаты сносит ветер, а у самолетов заканчивается горючее. Далее ряда опытов это направление не пошло, т.к. полномасштабная система получалась бы очень дорогой.

Мы предлагаем другой подход к решению этой проблемы, который будет описан ниже.

Второе отличие - большое расстояние между приемником и передатчиком. Для аппарата на геостационарной орбите это расстояние меняется от 36 до 41 тыс. км (типичная дистанция для АОЛС - 5 км). На таких расстояниях начинает существенно сказываться расхождение лазерного пучка. Для уменьшения этого эффекта необходимо использовать в излучателе оптическую систему с апертурой 20-30 см, которая обеспечивает для длины волны 900 нм угол расхождения порядка 1 угловой секунды. Размер светового пятна, создаваемого с геостационарной орбиты на поверхности Земли, при такой расходимости будет составлять примерно 200 м. Из-за этого излучение на поверхности Земли заметно ослабевает. Для устойчивого приема сигнала необходимо использовать приемную оптическую систему с диаметром апертуры в 60-80 см. Заметим, что если от оптической системы излучателя требуется дифракционное качество, то требования к качеству оптической системе приемника гораздо ниже, в ней можно использовать самые простые ("любительские") телескопы.

В настоящее время лазерные системы связи были испытаны в режиме спутник-Земля, спутник-самолет и спутник-спутник в США и Европе. В 2013 г. предполагается запуск Российского космического аппарата для испытания аналогичной системы отечественного производства.

### **Решение проблемы облачности наземными способами**

Если мы отказываемся от выноса приемника излучения выше облачного слоя, то существует другой способ решения проблемы плотной облачности. На поверхности Земли выбираются несколько пунктов, которые должны удовлетворять следующим условиям:

1. Большое число ясных дней и ночей в каждом из пунктов или, что приблизительно эквивалентно, низкий процент облачного покрытия.
2. Удаленность пунктов не менее чем на 400-500 км друг от друга, чтобы локальные погодные условия в этих местах не коррелировали друг с другом.
3. Близость или возможность подключения к высокоскоростным наземным оптическим каналам передачи информации.

В этом случае, если над одним из пунктов приема информации собирается плотная облачность, передатчики на спутниках перенацеливаются на тот пункт приема, над которым облаков нет.

На рисунке 1 показано среднегодовое распределение облачности на территории СССР по данным метеонаблюдений за 1937-1983 гг.

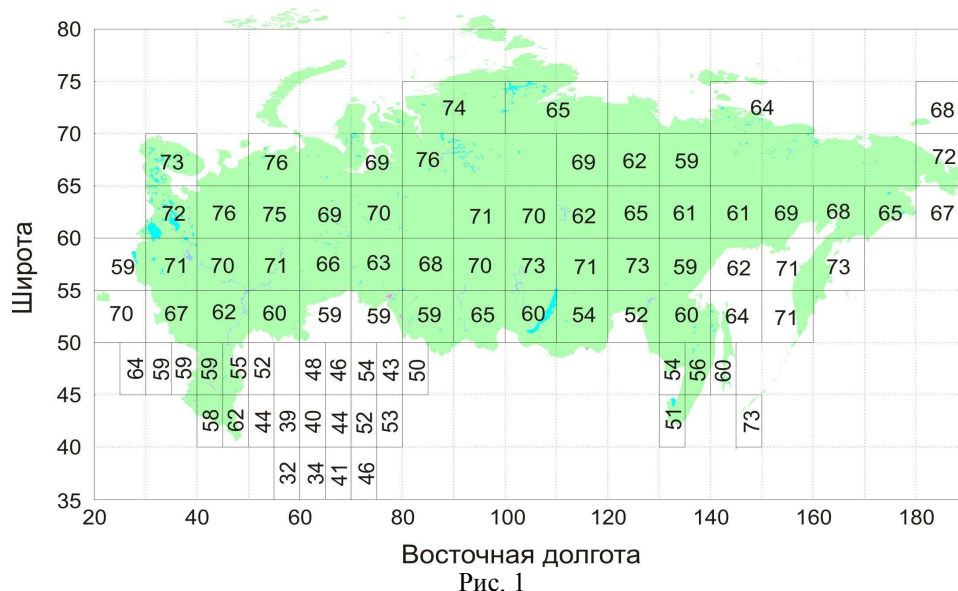


Рис. 1

Цифры в клетках показывают средний процент облачности в данном месте в течение года. Из карты видно, что на территории России этот процент не опускается ниже 60%. Однако на территории среднеазиатских республик бывшего СССР процент облачности снижается до 40% и даже ниже.

Необходимое число наземных пунктов можно оценить исходя из вероятности успешной передачи информации. Например, для обеспечения вероятности удачной передачи информации в 99% необходимо иметь 5 приемных пунктов со средним процентом облачности 40%.

Для реального выбора мест расположения подобных пунктов, конечно, требуется более тщательное исследование.

Заметим, что каждый наземный пункт приема информации является легко масштабируемой структурой. При появлении нового космического аппарата, с которого необходимо принимать информацию, достаточно добавить в каждом пункте одно приемное устройство, состоящего из оптической системы (телескопа), приемника излучения и интерфейсного модуля, и подключить его к информационному каналу передачи данных.