

Связь через любительские ИСЗ

На ИСЗ может быть установлена самая разнообразная любительская аппаратура. Это может быть аппаратура для передачи на Землю картинок с изображениями видимой из космоса земной поверхности, или аппаратура для экспериментов с высокоскоростной цифровой связью, или аппаратура для ретранслирования полученных с Земли сигналов снова на Землю, но на другой частоте, или аппаратура для передачи на Землю данных о температуре в различных отсеках ИСЗ и данных о напряжении электрических батарей. Короче говоря, аппаратура может быть самой разнообразной. На мой взгляд, самой большой популярностью пользуются ИСЗ, на борту которых установлены ретрансляторы. Примером таких ИСЗ являются RS-12 и RS-13, которые вот уже много лет доставляют радиолюбителям возможность проводить между собой радиосвязи через аппаратуру этих спутников.

Что такое ретранслятор

Ретранслятор представляет собой приемопередающий радиоаппарат, который принимает с Земли информационные сигналы на определенном диапазоне частот, и тут же передает эти сигналы на Землю, но уже на другой частоте. Этими сигналами могут быть и тональные телеграфные посылки, и посылки каких-то видов цифровой связи, и передачи человеческим голосом. При этом все передаваемые сигналы содержат тот же набор звуковых частот, которые были в сигнале принятом. Поэтому мы говорим, что ретрансляторы относятся к разряду аналоговой радиоаппаратуры, в отличие от радиоаппаратуры цифровой, которая принимает и передает сигналы только с определенными звуковыми частотами, либо просто посылки немодулированной несущей частоты.

Каким должен быть ретранслятор

Написанный мною цикл статей о ИСЗ с аппаратурой для любительской радиосвязи на борту, предназначен, в основном, для начинающих радиолюбителей, но и опытные также смогут по материалам этих статей освежить в памяти информацию, которую можно было прочесть в журналах много лет тому назад, в период начала эры освоения космического пространства.

Многих радиолюбителей может заинтересовать вопрос о максимальной дальности радиосвязи через ретранслятор. Постараемся разобраться с этим вопросом.

Дальность связи зависит от прямой радиовидимости ретранслятора с передающего и приемного пунктов связи. Схема связи через ретранслятор показана на рис. 1, где буквой **D** обозначена предельная дальность связи между радиостанциями 1 и 2 при высоте **H** расположения ретранслятора над Землей; **D_s** – предельная наклонная дальность связи каждой радиостанции до ретранслятора. Математические соотношения между этими величинами отображаются написанными ниже формулами.

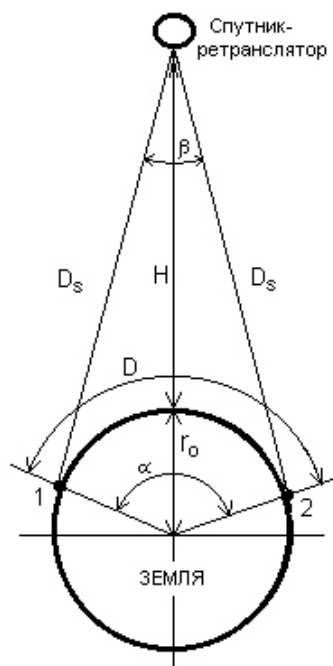


Рис. 1. Ретранслятор над Землей

$$= 2 \arcsin r_0 / (r_0 + H) ;$$

$$= 180^\circ - ;$$

$$D = (r_0 / 180^\circ) ;$$

$$D_s = \sqrt{H(H - 2r_0)} ;$$

По приведенным выше формулам можно рассчитать, что при расположении ретранслятора на высоте от 50 до 500 м (что соответствует высоте зданий, современных телевизионных башен и относительно небольших естественных возвышенностей) может быть обеспечена дальность связи до 50—150 км. При расположении ретранслятора на высоте 0,5—20,0 км (на горных вершинах или перевалах, летательных аппаратах – вертолетах, самолетах, аэростатах, дирижаблях, шарах зондов) дальность связи возрастает до 150—1000 км. Если же ретранслятор поместить на искусственном спутнике Земли (ИСЗ), то есть на высоте 500—5000 км, то дальность связи составит 5000—12000 км. При высоте орбиты ретрансляционного спутника около 50000 км (что реально для спутников на эллиптических орбитах) возможна связь между корреспондентами, находящимися в противоположных точках Земли на расстоянии примерно 18000 км. Дальнейшее, даже значительное увеличение высоты ретранслятора не может дать сколько-нибудь заметного увеличения радиовидимости.

В то же время наклонная дальность связи D_s , определяющая необходимый энергетический потенциал радиолинии, с увеличением высоты начинает расти: при $H = 500—5000$ км она составляет около половины возможной дальности связи, а на высотах около 1500 км обе величины D и D_s становятся примерно одинаковыми. Отсюда можно сделать вывод, что вывод ретрансляционного спутника на высоту более 1200—15000 км не может дать заметного увеличения дальности связи. Выигрыш в данном случае получается только в продолжительности сеанса связи.

Принципиальное различие между наземными стационарными любительскими ретрансляторами и установленными на летательных аппаратах или ИСЗ заключается в том, что первые могут обеспечить непрерывную круглосуточную связь, тогда как вторые (исключая спутники на стационарных орбитах) – только в периоды нахождения в зоне радиовидимости. Время одного сеанса связи и их количество в течение суток зависят от параметров орбиты и достаточно точно прогнозируются.

При относительно низкой орбите, 1000—1500 км, продолжительность сеансов связи равняется 15—20 мин, количество их может быть три-четыре и более (8—10) в сутки в зависимости от угла наклона орбиты и географического положения корреспондентов. При этом наибольшее расстояние между корреспондентами, ведущими связь, будет равняться примерно 6000—7000 км, а площадь прямой радиовидимости при такой орбите составит свыше 25 млн. кв. м. Количество одновременно работающих корреспондентов определяется шириной полосы передаваемых частот и энергетическим потенциалом ретранслятора.

При более высоких орбитах продолжительность сеансов связи увеличивается и может достигать нескольких часов (для спутников на эллиптических орбитах), но сокращается количество сеансов в течение суток.

Далее рассмотрим вопрос о мощности ретранслятора. Требуемая мощность передающего устройства определяется, в основном, потерями энергии электромагнитного излучения при распространении радиоволн.

Для расчетов этих потерь в [1] или иной литературе имеются специальные номограммы. Шкала частот такой номограммы охватывает УКВ диапазон от 28 до 6000 МГц с отметками участков диапазонов, специально выделенных для любительской радиосвязи. Для определения потерь энергии по номограмме находят точку пересечения шкалы потерь линией, соединяющей на шкалах частот и расстояний точки, соответствующие выбранным значениям.

По номограмме можно определить, например, что при работе ретранслятора на передачу в диапазоне 28,0—29,7 МГц и наклонной дальности связи 5000 км, что соответствует удалению ретранслятора от Земли на 2000 км и возможной дальности связи с корреспондентами до 9000 км, потери составят около 135 дБ. Если использовать приемники с полосой пропускания 1,0—3,0 кГц и чувствительностью 0,3—0,5 мкВ при соотношении сигнал/шум 10 дБ, а также направленную приемную антенну с коэффициентом усиления 6—8 дБ, то необходимая излучаемая мощность ретранслятора будет составлять десятки милливатт. При одновременной ретрансляции нескольких каналов связи мощность ретранслятора должна быть соответственно больше.

При увеличении высоты орбиты до 30000 км, что должно обеспечить практически предельную дальность связи (18 000 км), потери составят 150 дБ, это на 15 дБ больше, чем в рассмотренном нами примере. Однако это может быть компенсировано повышением чувствительности наземного приемного устройства (увеличением коэффициента усиления приемной антенны) или увеличением мощности (уменьшением количества одновременно транслируемых каналов) бортового ретранслятора (т.е. количеством одновременно работающих через ретранслятор радиостанций).

Ретранслятор на ИСЗ

Кратко рассмотрим некоторые основные моменты о движении Земли и главные параметры орбит ИСЗ.

Земля имеет форму, очень близкую к шару с средним радиусом 6370 км, и в действительности представляет собой сплюснутый эллипсоид вращения, меньшей осью которого является ось вращения Земли. Разность экваториального и полярного радиусов Земли составляет всего 20 км.

Земля, совершая один полный оборот с запада на восток в течение суток (23 ч 56 мин 04 с звездного времени), находится в постоянном поступательном движении вокруг Солнца по слегка эллиптической орбите с эксцентриситетом менее 2%, периодом обращения 365 суток 5 ч 59 мин. Ее земная ось имеет наклон к плоскости орбиты 23,5°. Средняя скорость движения Земли по орбите — 29,8 км/с.

Орбиты искусственных спутников Земли (их плоскости всегда проходят через центр Земли) разделяются на экваториальные, когда плоскость орбиты спутника лежит в плоскости экватора; полярные, когда плоскость орбиты спутника проходит перпендикулярно плоскости экватора; наклонные, когда плоскость орбиты спутника занимает любое промежуточное положение.

Если угол между плоскостью орбиты и экватором обозначить через i , то соответственно для экваториальной орбиты $i=90^\circ$, а наклонной $0^\circ < i < 90^\circ$, (наклонная орбита может иметь угол $i > 90^\circ$, если ИСЗ запускаются против направления вращения Земли).

Движение искусственного спутника Земли в околоземном космическом пространстве, в общем виде, в соответствии с уравнениями Кеплера, происходит по эллиптической орбите, в одном из

фокусов которого находится Земля. Частным случаем эллиптической орбиты является круговая (или достаточно близкая к круговой), фокусы эллипса которой совпадают с центром окружности. Ретрансляторы, работающие на круговых, близких к полярным орбитах, представляют особый интерес для любительских связей.

Преимущество орбиты, близкой к полярной, заключается в том, что при каждом витке ИСЗ проходит через все широты обеих полушарий, а в результате одновременного вращения Земли подспутниковая точка ИСЗ с каждым витком смещается к западу относительно земной поверхности. Периодичность, количество и длительность возможных сеансов связи в течение суток находятся в зависимости от частных параметров (основных элементов) орбиты и географического положения пунктов связи.

Какие же параметры относятся к основным элементам орбиты и определяют разрешающую способность ретранслятора?

Прежде всего – высота орбиты **H** над поверхностью Земли, которая определяет предельную дальность связи между корреспондентами. Если ориентироваться на высоту орбиты в пределах 1000—1500 км, то наибольшая радиовидимость ИСЗ от корреспондентов составит около 3500 км, а следовательно, предельно возможная дальность радиосвязи будет составлять 7000—8000 км. К основным параметрам орбиты следует отнести период обращения спутника **T** – время, за которое спутник делает один оборот вокруг Земли, и скорость его движения **v** по орбите. По формуле:

$$T(\text{мин}) = (2 / \sqrt{K}) (r_0 + H)^{3/2}$$

эти параметры можно с достаточной точностью можно рассчитать для круговых (точнее близких к круговым) орбит, имеющих высоты **H** = 700—1500 км. Для **H** = 1000 км период обращения **T** = 105 мин, скорость движения по орбите **v** = 7,3 км/с. В этих расчетах **K** (произведение гравитационной постоянной на массу Земли) принято равным $3,98 \cdot 10^5 \text{ км}^3/\text{с}^2$, средний радиус Земли равен 6370 км.

Важным параметром орбиты является и угол наклона орбиты относительно экватора **i**.

Следует также запомнить два понятия – *восходящий и нисходящий узлы*. Восходящим узлом называется точка проекции спутника на поверхность Земли в момент перехода через экватор с юга на север, а нисходящая точка – при переходе спутником экватора во время движения с севера на юг. Каждый узел характеризуется временем и долготой.

Приведенных трех параметров (**H**, **T**, **i**) достаточно для общей характеристики орбиты. Но для определения местонахождения (координат) ИСЗ в любой момент времени, возможности прогнозирования времени и продолжительности сеанса связи необходимы данные, обеспечивающие пространственно-временную привязку.

Таковыми данными, после запуска спутника и уточнения общих элементов (параметров) орбиты, является информация о времени прохождения ИСЗ восходящего узла орбиты t_0 и долготе восходящего узла.

Располагая такой информацией, становится возможным по несложной методике определить координаты спутника для любого времени и возможность ведения радиосвязи из любого пункта.

Сказанное можно проиллюстрировать на примере круговой полярной орбиты

H = 1000 км, **T** = 103 мин, **i** = 90°.

В течение одного оборота Земли ИСЗ совершит по орбите около 14 оборотов, проходя за каждый оборот над Северным и Южным полюсами и дважды пересекая экватор (один раз в восточном и второй раз в западном полушариях).

При одновременном движении спутника по орбите и вращения Земли долгота восходящего узла орбиты за каждый виток ИСЗ будет смещаться к западу по экватору на $\Delta \lambda_0 = 360^\circ / 14 = 25,7^\circ$ (примерно на 3000 км). В то же время орбита каждый раз будет проходить через полюса.

Это позволяет в приполярных областях работать на каждом обороте спутника, то есть в течение суток иметь 14 сеансов связи. Дальность и длительность этих сеансов связи будут находиться в зависимости от местоположения наземной радиостанции.

При расположении радиостанции в непосредственной близости от полюсов, каждый из сеансов может обеспечить предельное расстояние связи (до 7000 км) и предельную продолжительность.

По мере удаления местоположения корреспондентов от полюсов к экватору число сеансов, длительность связи начнут уменьшаться, так как ряд орбит выйдет за пределы радиовидимости.

На экваторе, где расстояние между орбитами является предельным — $\Delta \lambda_0 = 25^\circ$ (составляет около 3000 км), радиосвязь будет возможна в пределах двух-трех орбит восходящих (в течение первых полусуток), двух-трех нисходящих (в течение вторых полусуток).

Продолжительность сеансов связи зависит от того, насколько близко проходит орбита к зениту местоположения пункта связи.

Орбиты ИСЗ и их положения в пространстве с течением времени подвержены отклонениям от первоначальных. Такие отклонения возникают под влиянием ряда факторов. Так, при относительно низких орбитах на спутник основное влияние оказывает недостаточная разреженность атмосферы. Испытывая торможение в атмосфере, спутник с каждым оборотом теряет высоту, снижается, входит в плотные слои атмосферы и сгорает.

При $H = 800$ км можно считать, что влияние этого фактора на первоначальные параметры орбиты спутника исключительно мало.

При высотах $H = 600$ км и более существенным фактором, влияющим на положение орбиты в пространстве, является возмущение земного тяготения, связанное с отклонением формы Земли от сферической. Спутник дважды за виток, пересекая экватор, испытывает гравитационное возмущение, в результате которого происходит некоторое смещение орбиты в пространстве, прецессия орбиты вокруг земной оси. Величина прецессии тем меньше, чем ближе орбита к полярной. При $i = 90^\circ$ (орбита под прямым углом пересекает экватор) прецессия отсутствует.

Имеет место и ряд других факторов, оказывающих возмущающее влияние на орбиту (силы притяжения Солнца, Луны, других планет, аэродинамические и электромагнитные силы, световое давление и т. д.).

Далее рассмотрим еще один момент, играющий важную роль для устойчивой радиосвязи. Дело в том, что практически на всех спутниках радиоаппаратура питается от аккумуляторных батарей, подзаряжаемых солнечными батареями. Естественно, что подзарядка аккумуляторов происходит только при достаточном освещении солнечным светом всей поверхности солнечной батареи в течение как можно более длительного периода времени.

О расчете элементов орбит

Выполнить точный расчет всех элементов орбит ИСЗ поможет вам разработанная мною программа ОРБИТА_2, которую можно взять в Интернете по адресу: <http://users.kaluga.ru/ra3xb/>

Кроме основных параметров, которыми обладают большинство программ, имеющихся в Интернете, эта программа позволяет определить состояние освещенности спутника солнечным светом и оценить возможность проведения связи при использовании имеющейся у вас аппаратуры.

Состояние освещенности определяется при выполнении прогноз – расчета (в меню следует выбрать пункт **Р**). В выполненном тексте прогноз – расчета предпоследний столбец, озаглавленный **Солн**, содержит сведения об освещенности спутника солнечным светом. Буквосочетание **ОСВ** для каждого из расчетных времен соответствует абсолютному освещению всего спутника, **ОСЧ** соответствует частичной освещенности, **НЕТ** соответствует нахождению спутника в абсолютной тени, **ЧАС** соответствует частичному затемнению спутника.

Оценить возможность приема информации от спутника с использованием вашей аппаратуры позволяют данные, расположенные в столбце **Угол** текста прогноз – расчета. Чтобы выполнить эту задачу, автор программы в инициализационном файле вводит в программу оптимальные (на мой взгляд) параметры приемного устройства и вашей антенны. Программа анализирует эти введенные данные, а также полученные расчетом данные о удалении спутника от вашей станции и расположение спутника по отношению к горизонту (угол места), после чего выдает величину угла диаграммы направленности антенны, которая способна обеспечить устойчивый прием для данного варианта. Если просмотреть полученные расчетом данные, то видно, что для приема информации со спутника, пролетающего над головой, достаточный угол переднего лепестка диаграммы направленности антенны будет порядка 70° , а для работы со спутником, имеющим эллиптическую орбиту, необходима антенна с углом переднего лепестка порядка 10° .

Разумеется, параметры вашего приемника и вашей антенны не будут полностью соответствовать установленным автором параметрам. Поэтому, чтобы эффективно пользоваться этими расчетными данными, следует в инициализационный файл ввести фактические данные вашей аппаратуры и антенны.

=====

Литература:

В. Доброжанский «Ретранслятор: каким он должен быть», статья в журнале «Радио» №5 за 1976 год.