

Обзор инженерного расчёта зон покрытия спутниковой системы Iridium и оценка её плотности покрытия.

Паневин В.П.

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, e-mail: true.harrison@mail.ru

Компания Iridium Communications Inc. (ранее Iridium Satellite LLC.) - всемирный оператор спутниковой телефонной связи, работающий на базе орбитальной группировки Iridium Satellite из 66 низкоорбитальных спутников (не считая резервных). Владельцем группировки спутников является Iridium Communications Inc., она же занимается производством клиентского оборудования. Зона охвата Иридиум составляет 100% нашей планеты, это единственная телекоммуникационная компания, которая охватывает каждый квадратный сантиметр поверхности Земли, от полюса до полюса, без провалов и зазоров. Во время одной из лекций по СпТ СМС, о спутниковых системах находящихся в эксплуатации в данный момент. И вот когда речь зашла о компании Iridium, прозвучало «Зона покрытия этой низкоорбитальной спутниковой системы составляет 100% поверхности земли», можно задуматься, а реально ли покрыть всю планету, имея в наличии всего 69 спутников?

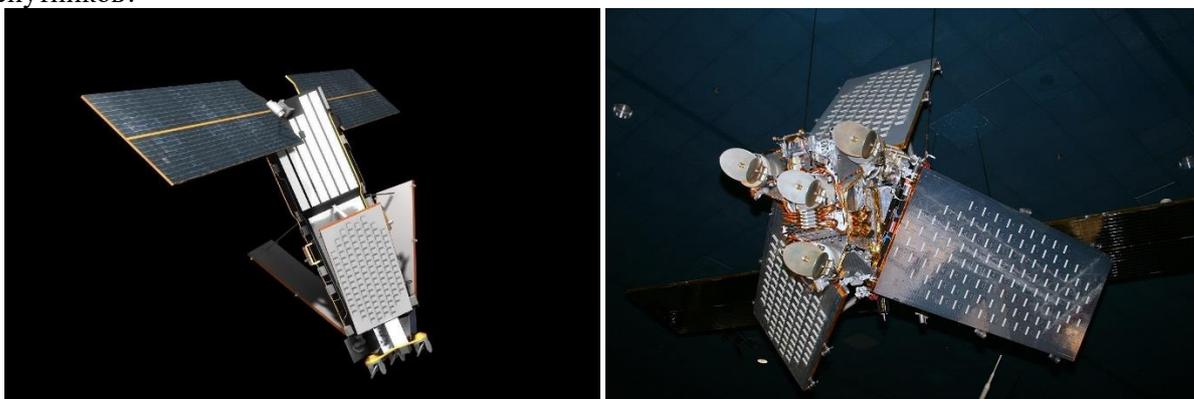


Рис. 1: Слева 3D модель юнита Iridium; Справа фотография юнита перед запуском.

Каждый спутник содержит в себе семь процессоров Motorola/Freescale PowerPC 603E с частотой примерно 200 МГц^[2], подключённых к оригинальной внутренней сети. По одному процессору выделено на обеспечение каждой из четырех антенн («HVARC»), два процессора («SVARC») осуществляют общее управление спутником и один процессор находится в резерве. Есть планы использовать резервный процессор («SAC») для управления ресурсами спутника и обработки телефонных звонков.

Фазированная антенная решётка имеет 48 лепестков формирующих 16 лучей в трех секторах^[3]. Четыре межспутниковые антенны обеспечивают пропускную способность 10 Мбит/с для каждого аппарата.

Каждый спутник может поддерживать до 1100 телефонных соединений и весит около 680 кг

Основные технические характеристики:

количество спутников на орбите	61 основных и 8 резервных
количество орбитальных плоскостей	6 (11 спутников в каждой плоскости)
высота обрты	780 км
наклонение орбитальной плоскости	86,4 град
период обращения спутника	100 мин. 28 сек.
масса спутника	689 кг
количество лучей, формируемых одним спутником	48
диаметр луча	около 50 км
срок службы спутника	10-15 лет

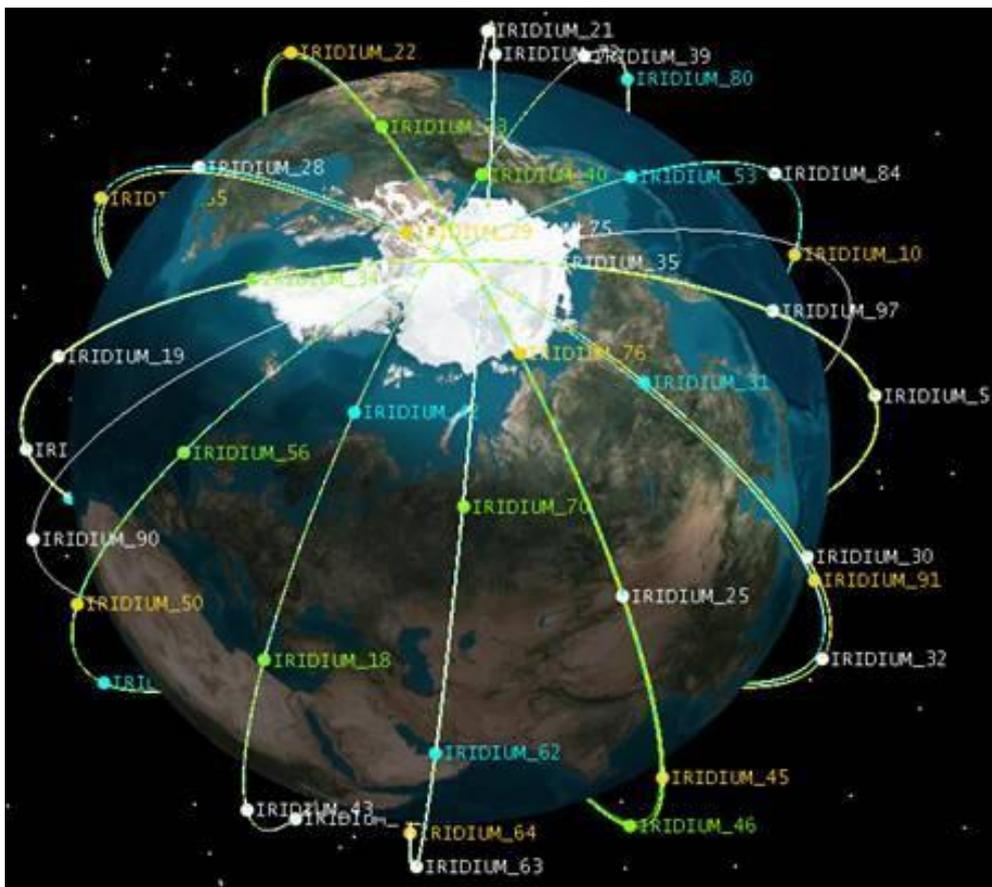


Рисунок 2. Орбита юнитов спутниковой системы Iridium.

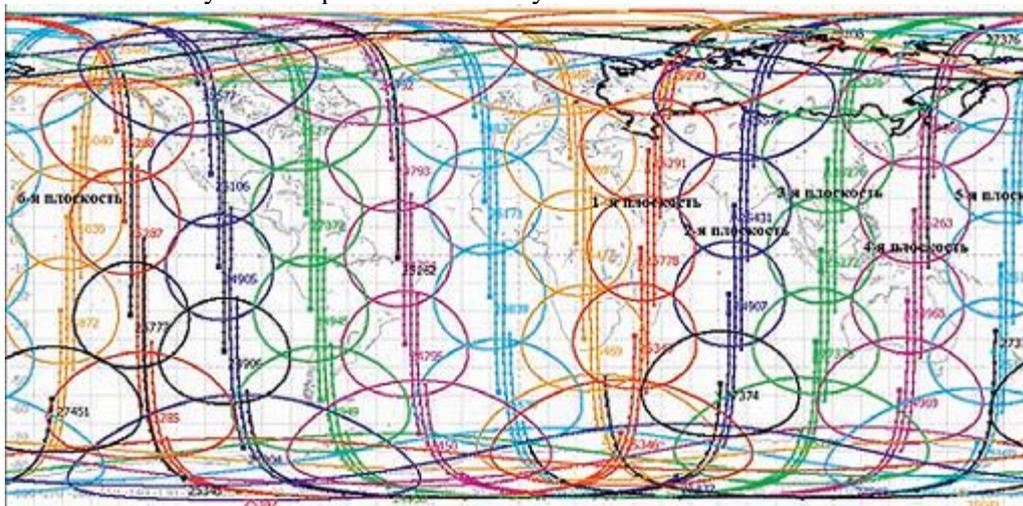


Рис. 2. Номинальная зона покрытия ОГ «Iridium» на 2016 год

В орбитальной группировке (ОГ) системы Iridium используются МЛС, поэтому зона обслуживания системы определяется только космическим сегментом. По данным Международного справочного регистра частот (МСРЧ) Бюро радиосвязи (БР) Международного союза электросвязи (МСЭ), система Iridium (сеть «НIVLEO-2») должна иметь следующие параметры космического сегмента: структура ОГ: 6x11 (6-ть плоскостей по 11 КА в каждой); мощность (число КА) ОГ: 66 КА; высота орбиты 780 км; наклонение орбиты 86.4 град. Расстановка плоскостей: на дуге 180 град. Фазовый угол между КА смежных плоскостей: 16.364 град. Спутники имеют систему коррекции орбиты.

Мгновенная зона обслуживания при ограничении на минимальный угол места в 10 град представлена на рис. 2а. Максимальное время наблюдения абонентом одного КА, при угле места 10 град., составляет 11 мин.

Как видно из Рисунка 1, что система обеспечивает глобальную зону обслуживания. И только в очень малом проценте времени в приэкваториальной полосе Земли могут быть отказы в обслуживании.

Рассмотрим методику расчета границ областей совместного покрытия спутниковой системы. Поверхность земли представлена эллипсоидом. Совокупность лучей спутника представлена конусом. Элемент поверхности эллипсоида, который ограничен кривой пересечения конуса и эллипсоида, определяет область покрытия спутником поверхности земли. Кривая пересечения является границей области покрытия. Границы областей покрытия спутников пересекаются при наложении областей. Между двумя точками пересечения образуется сегмент границы области покрытия спутника. Область совместного покрытия — это элемент поверхности эллипсоида, ограниченный сегментами границ областей покрытия спутников. С помощью предложенной методики определяется набор сегментов для каждой области совместного покрытия, который определяет границы области совместного покрытия. На основе рассчитанных областей оценивается соотношение площадей областей с разным количеством видимых спутников, непрерывность покрытия спутниковой системы, частота одновременной видимости заданного количества спутников.

Совокупность лучшей спутника представлена конусом с вершиной в точке с координатами спутника, осью, направленной к центру Земли, и половиной угла раскрытия равной максимальному углу зенита спутника. Граница области покрытия спутника — это линия пересечения конуса и эллипсоида.

Для расчёта линии пересечения используется параметрическое уравнение конуса в каноническом для конуса базисе и уравнение эллипсоида в том же базисе. Поэтому сначала определяем канонический базис конуса и матрицу преобразования из базиса системы ECEF в каноническом базисе конуса. Затем на основе матрицы преобразования исходное уравнение эллипсоида в канонической форме в системе ECEF преобразуем в общее уравнение эллипсоида в базисе конуса

$$Ax^2 + By^2 + Cz^2 + 2Dxy + 2Eyz + 2Fzx + 2Ex + 2Hy + 2Jz + K$$

Параметрическое уравнение конуса:

$$\begin{cases} x = v \cos(\theta) \cos(u) \\ y = v \cos(\theta) \sin(u) \\ z = v \sin(\theta) \end{cases}, (2)$$

где $v \in (-\infty; +\infty)$, $u \in [0; 2\pi]$, $\theta \in (0; \pi)$ — максимальный угол зенита спутника.

Подставляем уравнение (2) в уравнение (1), группируем по степеням v . В результате получаем квадратное уравнение:

$$av^2 + bv + c = 0, (3)$$

Где:

$$\begin{aligned} a &= Aa_1^2b_1^2 + Ba_1^2b_1^2 + Ca_1^2 + 2Da_1^2b_1^2b_2 + 2Ea_1b_2b_2 + 2Fa_1b_1a_2 \\ b &= 2Ga_1b_1 + 2Ha_1b_2 + 2Ja_2 \\ c &= K \end{aligned}$$

где: $a_1 = \cos(\theta)$, $b_1 = \cos(u)$, $a_2 = \sin(\theta)$, $b_2 = \sin(u)$

Решением являются два корня, которые определяют зависимость $v(u, \theta)$. Подставляем поочередно в уравнения x, y, z $v(u, \theta)$ вместо v . Меняя параметр u в диапазоне $[0, 2\pi]$ при фиксированном значении θ , получаем точки двух линий пересечения конуса и эллипсоида.

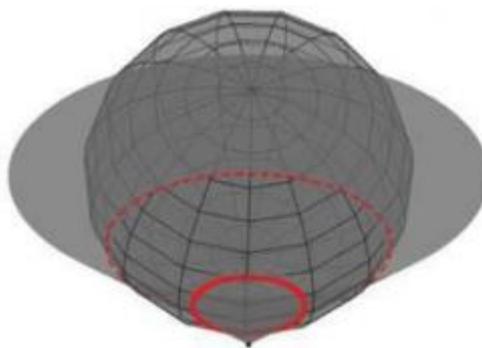


Рисунок 4. Пересечение линий конуса и эллипсоида

Определение точек пересечения границ областей покрытия двух спутников. Граница покрытия спутника является кривой линией, которая описывается уравнением четвёртого порядка. Аналитических методов определения точек пересечения линий четвёртого порядка не существует. Поэтому чтобы найти точки пересечения двух границ покрытия используется численный метод. Мы

должны отобрать точки пересечения зон покрытия спутников. Отбираем только те точки, что находятся внутри области покрытия обоих спутников. Находим пары ближайших из них. Если расстояние между ними удовлетворяет погрешности, то оставляем две выбранные точки. Если нет, то создаём новые точки в окрестности найденных и повторяем поиск. Таким образом вместо точки пересечения находим две ближайшие к ней точки из границы области покрытия каждого спутника. Для дальнейших расчётов сохраняем параметр u и найденных точек. Поиск точек пересечения проводится для всех спутников системы

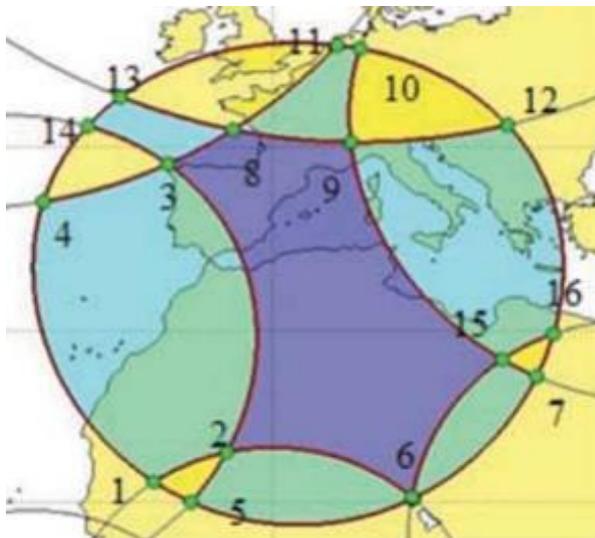


Рисунок 5. Точки пересечения

Из написанного выше мы видим каким именно образом производится расчёт зон покрытия каждого юнита спутниковой системы и пересечения их зон покрытия, что, так же мы видим, что зона покрытия спутниковой системы Iridium действительно является 100% процентов за исключением временных просадок в близ экваториальной зоне

Список литературы:

1. Система персональной спутниковой связи Iridium: 18 лет на орбите [Электронный ресурс]: sistema-personalnoy-sputnikovoy-svyazi-iridium-18-let-na-orbite.htm
2. Зоны обслуживания низкоорбитальных спутниковых систем [Электронный ресурс]: http://www.spacecenter.ru/Resurses/2013/Zon_Infosfera_60_2013.pdf
3. Iridium Википедия [Электронный ресурс]: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D1%80%D0%B8%D0%B4%D0%B8%D1%83%D0%BC>
4. Метод инженерного расчёта областей совместного покрытия спутниковой системы [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.ru/article/v/metod-inzhenernogo-rascheta-oblastey-sovmestnogo-pokrytiya-sputnikovoy-sistemy>