Миниатюрные спутники для космической связи CubeSats

Достижения в области современных технологий подтолкнули индустрию к разработке миниатюрных спутников (SmallSats). К этой категории относятся спутники, которые весят меньше 500 кг. Ключевыми участниками этой программы являются спутники CubeSats, которые при своих малых размерах (10x10x10 кубических сантиметров) весят всего 1.33 килограмма. Потенциал их использования побудил научное сообщество пересмотреть существующие технологии, используемые в космических аппаратах.

Под катом мы разберем устройства антенн для спутников такого типа и поговорим о технологиях, которые используются при запусках CubeSats. Welcome!

Введение. Расцвет CubeSats

В течение многих лет, малые размеры не были подходящим вариантом для спутниковой индустрии. Жесткие радиочастотные требования к спутникам для обеспечения желаемого качества обслуживания приводят к тому, что устройства для космической связи становятся очень сложными и обладают большой массой. Типичный срок разработки таких спутников составляет около 5 лет, а их стоимость может составлять от $100 миллионов до $2 миллиардов. Такие спутники работают в фиксированной полосе частот на мощностях, близких к 10 Вт, имеют антенны с большим усилением и очень точное позиционирование. И, хотя существующие спутниковые системы не могут быть до конца заменены малыми спутниками, видение и нужды будущих космических миссий начинают меняться. Вместе с распространением малых спутников, многие масштабные миссии становятся более дешевыми, благодаря чему космос становится более доступным.

Появление технологий цифровой обработки сигналов, очень больших интегральных схем, микроэлектромеханических систем, а также программируемых систем с низким энергопотреблением, привело к уменьшению размеров электронных устройств и их энергопотребления. По мере уменьшения бортовой электроники, размер спутников также уменьшается на порядок. И, как не сложно догадаться, уменьшение размеров и веса ведет к снижению стоимости запуска спутников.

Как отмечалось ранее, малые спутники делятся на несколько подклассов, самым интересным из которых является CubeSat. Ключевая идея, лежащая в основе разработки CubeSat, заключается в том чтобы уменьшить спутник до размера второстепенной полезной нагрузки, размещаемой на ракете-носителе. Это существенно снизит стоимость запуска, что позволит получить доступ в космос различным университетам, маленьких коммерческим компаниям, государственным организациям и даже простым любителям.

На рисунке 1 показано количество запусков CubeSats за последние 15 лет, и мы видим, что за последние 5 лет интерес к ним сильно возрос. Еще более интересно то, что военная промышленность, коммерческие предприятия и государственные учреждения тоже активно используют CubeSat.

[Изображение недоступно]

Антенные системы играют критическую роль в удаленном управлении и установлении канала связи между спутником и Землей. Корреляция между размерами и коэффициентом усиления антенны заставляет разработчиков идти на компромисс между качеством связи и размерами антенн, которые удовлетворяли бы стандартам CubeSat по весу. Соответствие этим требованиям и обеспечение хорошей производительности антенны является важной задачей для инженеров. С учетом того, что CubeSat рассматриваются для полетов как на околоземные орбиты, так и в дальний космос, научное сообщество активно работает над созданием антенн, которые будут удовлетворять требованиям к скорости передачи данных и к физическим размерам.

Для CubeSat в основном используются частоты от УВЧ (400 МГц) до W-диапазона (110 ГГц), а также различные виды антенн, от миниатюрных патч-антенн, до массивных антенн с отражателями. На рисунке ниже показаны типы антенн, как использовавшиеся при предыдущих запусках CubeSat, так и рассматриваемые в качестве перспективных технологий для будущих миссий:

[Изображение недоступно]

Существующие стандарты малых спутников

Классификация различных типов малых спутников показана ниже:

[Изображение недоступно]

В основном, космические аппараты классифицируются по их массе. И хотя точная классификация и количество типов отличаются в зависимости от производителя, наименования MiniSat, MicroSat,

NanoSat и PicoSat стали общепринятыми в космической индустрии. Также, нет согласия касательно того, должна ли классификация основываться на массе спутника без топлива (сухая масса) или же с топливом. Значительная часть внимания научного сообщества была сосредоточена на размерах NanoSat и PicoSat, что и послужило причиной появления спутников CubeSat.

Ключевым вкладом CubeSat в широкое распространение малых спутников стало создание стандарта. Согласно этому стандарту к CubeSat может быть отнесен спутник размерами до 10x10x10 сантиметров, который весит до 1.33 килограмм. Такой спутник могут использовать все разработчики и исследователи. Стандартизация размера и веса спутников также поспособствовала разработке системы запуска CubeSat, названной Poly-Picosattelite Orbital Deployer (P-POD). Это означает, что исследователи по всему миру могут легко скооперироваться друг с другом, чтобы участвовать в космических миссиях, используя CubeSat. P-POD позволяет одновременно запускать три спутника размером 1U. Это открытие привело к разработке стандарта 3U, который идентичен сумме трёх 1U, с общим объемом 3000 кубических сантиметров. В настоящее время ведется разработка стандартов 6U, 12U и 27U (см. рисунок выше сверху).

Также, стандарт CubeSat свидетельствует о значительных достижениях в области машиностроения. Именно разработка передовых систем наведения и запуска сделала использование CubeSat возможным. Улучшенные системы наведения позволяют использовать антенны с большим усилением, так как ошибки наведения могут существенно снизить их эффективность. Текущая точность наведения, доступная космическим аппаратам, составляет ±0.007° (1-sigma) по трем осям.

Например, разработанный компанией Blue Canyon Technologies, путник XACT имеет габаритные размеры 0.5U, весит 0.85 кг и был классифицирован по уровню готовности технологий (TRL), как технология 6 уровня (прототип/модель, продемонстрированная в соответствующей среде). Его модель в космосе показана на рисунке ниже:

[Изображение недоступно]

Примеры миссий с использованием CubeSat

Экономическая доступность CubeSat позволила осуществить такие миссии, как GeneSat-1, в которой использовался 5-килограммовый кубический спутник для транспортировки бактерий. GeneSat-1 был первым полностью автоматизированным и автономным экспериментом NASA, использующим спутник такого размера. Целью этой миссии было изучение влияния космических полетов на человеческое тело. Бортовая микролаборатория GeneSat-1 была оснащена сенсорами и оптическими датчиками, которые могли обнаружить белки, которые являются продуктами специфической генной активности.

Похожим образом, CubeSat использовались для тестирования космической связи, при которой использование обычных спутников было бы слишком дорогим. Кубические спутники могут также сыграть значительную роль в увеличении оценки TRL различных материалов и электронных устройств, благодаря летным испытаниям с использованием CubeSat.

Множество миссий с использованием CubeSat связаны с удаленным мониторингом. Это объясняется возможностью запуска целого созвездия кубсатов для мониторинга какого-либо космического явления или объектов. Так, например, миссия под названием “Временной эксперимент для штормов и тропических систем” (более известная как TEMPEST) задействует созвездие из пяти спутников CubeSat, расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга на орбите. Это сделано для того, чтобы каждый спутник проходил над одной и той же точкой каждые 5-10 минут, позволяя наблюдать за облаками в течение коротких временных промежутков. Таким образом, наблюдение за облаками происходит с гораздо более короткими интервалами, чем с использованием обычных спутников, которые проходят над одной и той же точкой в лишь раз в несколько часов или даже дней. Также, развертывание созвездий малых спутников позволяет наблюдать за кратковременными явлениями, такими как вспышки молний.

На графике ниже показано количество наноспутников, запущенных с 1998 по 2016 гг.

[Изображение недоступно]

Потенциал CubeSat также был оценен и коммерческим сектором. Например:

- Серия AeroCube, разработанная Aerospace Corporation, была использована для улучшения навигации и стабилизации положения летательных аппаратов.
- Planet Labs Inc. активно работает над развертыванием флота из 150 отдельных спутников для получения актуальных детализированных изображений планеты.
- Сайт www.nanosats.eu задокументировал запуск более 1600 наноспутников, запущенных с 1998.

На рисунке 4 можно наблюдать интересную особенность - большинство запущенных CubeSat имело размер 3U, предположительно из-за активного использования системы P-POD.

Антенны для CubeSats

Одной из важнейших частей спутниковой системы коммуникаций являются антенны. В литературе приведено множество вариаций антенн, используемых в спутниковой связи. В этом разделе представлена полная коллекция различных работ по разработке антенн для кубических спутников.

Проволочные антенны

Под “проволочными антеннами” обычно понимают диполи, монополи, антенны Яги-Уда и спиральные антенны. Эти антенны обычно размещаются на внешней поверхности спутника, освобождая место для другой электроники. Во время полета антенны складываются и занимают внутренний объем спутника, а разворачиваются только после выхода на орбиту. Проволочные антенны часто находят применение на высоких (HF), очень высоких (VHF) и ультра высоких (UHF) частотах. Всенаправленность диполей делает их одним из кандидатов для организации межспутниковой связи.

Большинство кубических спутников, находящихся на орбите, используют проволочные антенны из-за их простоты. На рисунке ниже показан спутник HORYU-IV, особый интерес в котором представляет интеграция дипольной антенны со спутником. Здесь разработчики использовали решетку из четырех диполей в ОВЧ-диапазоне для измерения влажности почвы:

[Изображение недоступно]

Есть пример, в котором проволочные антенны также использовались для осевой стабилизации спутника. Таким примером может служить спутник HIT-SAT, который использовал дипольные решетки для связи и для стабилизации путем измерения колебаний полученной мощности в UHF/VHF-диапазонах. Спутник HIT-SAT с установленными диполями показан на рисунке ниже:

[Изображение недоступно]

Рефлекторные антенны

Разработка рефлекторных антенн с большим усилением для кубических спутников в настоящее время все больше привлекает внимание научного сообщества. Отражатели предлагают большое усиление, но являются сложными, с точки зрения производства, устройствами. Одним из первых применений рефлекторных антенн в CubeSat была миссия Эней (Aeneas). Эней оснащен зонтичной рефлекторной антенной S-диапазона, диаметром 0.5м и работающей на частоте 2.4ГГц. Разработанный для этой миссии отражатель показан на рисунке ниже:

[Изображение недоступно]

Еще есть пример для наземных миссий и исследований дальнего космоса. Так была разработана антенна Кассегрена (установленная на 6U-спутник для миссий в дальнем космосе) для Ka-диапазона. Концепт CubeSat с установленной антенной системой показан на рисунке ниже:

[Изображение недоступно]

В большинстве случаев, отражатель представляет из себя металлическую сетку, натянутую на параболические ребра, чтобы обеспечить большую поверхность при меньшем объеме. В качестве альтернативы рефлекторам с сетчатой поверхностью зеркала, предлагаются рефлекторы, в которых используются эластичные композиты с эффектом памяти, применяемые для антенн Ku и Ka-диапазонов.

Плоские отражательные антенны

Плоские отражательные антенны обеспечивают большой коэффициент усиления, при этом их легко установить на кубические спутники. Такие антенны состоят из набора плоских панелей, что позволяет складывать их и размещать внутри объема спутника. Также они могут быть интегрированы с солнечными панелями, которые устанавливаются на CubeSat. Такой подход применяется в рамках разработки системы ISARA (Отражательная антенна, интегрированная в солнечную панель) для Ka-диапазона. Структура такой системы показана на рисунке ниже:

[Изображение недоступно]

Такая конструкция отражательной антенны применялась для проекта Mars Cube One (MarCO), который является первым кубическим спутником, созданным для миссий на Марсе. Рабочая частота в этом устройстве составляет 8.425 ГГц с усилением 29.2 дБ.

Мембранные антенны

Мембранные антенны являются приемлемым вариантом, когда существует допуск на среднеквадратичную погрешность. Основная идея заключается в создании антенны из материала, похожего на ткань. Это позволит создать легкую складную антенну, которая без труда поместится в малом объеме внутри спутника. На рисунке ниже показана мембранная антенна для S-диапазона, которая может обеспечивать усиление в 30.5 дБ (Размер в сложенном состоянии - 2U).

[Изображение недоступно]

Стоит отметить, что есть вариант развертывания мембранной антенны по принципу надувного шара.. Наиболее интересно для разработчиков мембранных антенн то, что размер мембранных антенн в сложенном состоянии занимают 2U и меньше, - 0.6U (в случае использования надувной системы).

Планарные антенны

Планарные антенны, такие как патч- и щелевые антенны, привлекают большое внимание из-за своих размеров и относительной простоты изготовления. Пример интеграции патч-антенны в шасси CubeSat показан ниже:

[Изображение недоступно]

На данный момент реализованы самые различные варианты плоских антенн - для VHF, UHF и S-диапазонов. Встречаются даже сетчатые и прозрачные патч-антенны, патч-антенны S-диапазона для межспутниковой связи, плоская инвертированная F-антенна (IFA) для S-диапазона. А ниже показана щелевая антенна, которая может работать как многолучевая, всенаправленная или однонаправленная:

[Изображение недоступно]

Рупорные антенны и волноводные структуры

Рупорные антенны могут быть использованы в CubeSat на высоких частотах. Эти антенны обеспечивают хорошее усиление, а их разработка проста и хорошо изучена. Рупоры также часто используются в качестве облучателей для параболических и плоских рефлекторных антенн из-за низкой поперечной поляризации и слабовыраженных боковых лепестков.

[Изображение недоступно]

Заключение

Спутниковое и космическое научное сообщество нацелено на разработку малых, но мощных аппаратов CubeSats. В данной статье были рассмотрены существующие стандарты и классификации так называемых “малых спутников”, самыми популярными из которых являются кубические спутники - CubeSat. Вместе с потенциалом, который представляют кубические спутники для будущих миссий, появилась и необходимость разработать антенную систему, которая будет соответствовать размерам, указанным в стандартах. В зависимости от частоты и усиления, антенны варьируются от маленьких патч-антенн до больших рефлекторов.