**4 – GPS**

GPS широко используется для позиционирования БпЛА с точностью до нескольких метров, но потери или задержки сигнала затрудняют автономную посадку. А также, как показала СВО, владелец Глобальной Системы Позиционирования имеет возможность вносить корректировки в показание сигнала, либо его целиком заглушить для конкретной области.

**5 – Инфракрасные системы позиционирования**

Инфракрасные системы позиционирования используют оптический маяк с светодиодами, и приемник. Точность системы достигает 20 см, а инфракрасное излучение устойчиво к неблагоприятным погодным условиям, но требует прямой видимости. Такие системы перспективны для автономной посадки.

**6 – Визуальная навигация**

Визуальная навигация использует камеры, ориентиры и алгоритмы компьютерного зрения для определения местоположения. Ее преимущества — гибкость, точность, низкая стоимость и скорость. Надежность повышают фидуциальные маркеры, такие как ArUco и AprilTag. Для устойчивости к перекрытиям применяются фрактальные маркеры. Эта технология перспективна для автономной посадки благодаря своей точности и устойчивости.

**7 – Радиочастотные системы позиционирования**

Радиочастотные системы позиционирования используют радиоволны и мультилатерацию для определения местоположения. Якоря передают сигналы, а тэг их принимает. Wi-Fi и Bluetooth обеспечивают точность 3–5 м, тогда как UWB — до 20 см и устойчива к помехам. UWB перспективна благодаря высокой точности.

**8 – Ультразвуковая система позиционирования**

Ультразвуковая навигация измеряет время прохождения отраженного сигнала, обеспечивая точность до 3 см. Однако чувствительность к шумам и погодным условиям ограничивает ее применение во внешней среде, исключая использование для автономной посадки БпЛА.

**9 – Алгоритм трёхмерной мультилатерации**

Мультилатерация определяет местоположение по расстояниям до якорей, строя пересекающиеся сферы. В идеале пересечение — одна точка, но ошибки могут вызывать неопределенность. Для вычисления координат требуется минимум 4 якоря.

**10 – Инфракрасные маяки**

Определение местоположения по инфракрасным маякам основано на измерении интенсивности их излучения. Маяк включает две вертикальные и две горизонтальные пары излучателей, для которых выполняются аналогичные расчеты.

**11 – Модель пинхол камеры**

Модель пинхол-камеры описывает проецирование 3D-точек на плоскость изображения через небольшое отверстие без линз. Она формирует изображение с перспективным преобразованием, где каждая точка сцены соответствует пикселю, и применяется в компьютерном зрении.

**13 – Gazebo**

Gazebo — 3D-симулятор для моделирования и тестирования роботов. Он поддерживает сложные сценарии, интегрируется с ROS и включает сенсоры, такие как камеры, лидары и IMU, с возможностью расширения через плагины.

**14 – Robotic Operating System**

Robot Operating System (ROS) — платформа для разработки ПО роботов, включающая инструменты, библиотеки и механизмы обмена данными. Она упрощает создание сложных приложений, поддерживает аппаратную абстракцию и выпускается с открытым исходным кодом.

**15 – PX4 Autopilot**

PX4 Autopilot — полетный стек для управления БПЛА, поддерживающий ручной, вспомогательный и автономный режимы. Он интегрируется с Gazebo, использует MAVLink для связи и поддерживает ROS через MAVROS.

**16 – Библиотека ArUco**

Библиотека ArUco создает маркеры с настраиваемыми параметрами и включает алгоритмы детекции, оценки положения камеры и калибровки. Существует две версии: в OpenCV и авторская. Используется авторская, так как OpenCV не поддерживает фрактальные маркеры.

**17 – Создание модели**

В качестве платформы выбран робот Clearpath Husky UGV с посадочной площадкой, содержащей ArUco-маркер, UWB-тэги и инфракрасный маяк для точного позиционирования. Модели разработаны в Blender и экспортированы в Collada для совместимости с симуляторами.