

УДК 623.746.-519:621.67:53.082.7

Перспективные технологии облетных методов радиотехнических измерений

Старовойтов Е.И.^{1,*}, Руссанов В.И.¹

[*mail@vega.su](mailto:mail@vega.su)

¹АО "Концерн "Вега", Москва, Россия

Измерение диаграмм направленности антенных устройств и оценка электромагнитной обстановки, формируемой совокупностью близко расположенных радиопередающих объектов, являются распространенными задачами в практике радиотехнических измерений. Актуальной задачей является изыскание возможностей выполнения этих измерений в труднодоступных секторах пространства, где невозможно использование существующих средств. К настоящему времени широкие возможности предоставляет облетный метод измерений с использованием беспилотных летательных аппаратов, однако он обладает рядом серьезных недостатков. В работе определен облик перспективной системы облетных измерений характеристик антенн и электромагнитных полей, которая может применяться как для исследования крупноапертурных антенн, так и для анализа электромагнитной обстановки в условиях плотной городской или промышленной застройки. Для функционирования такой системы не требуются данные от спутниковых навигационных систем и радиолинии, по которым осуществляется обмен информацией с наземным пунктом управления. Базовыми носителями является беспилотные летательные аппараты самолетного типа и мультикоптеры.

Ключевые слова: антенные измерения, диаграмма направленности, электромагнитная обстановка, беспилотный летательный аппарат, облетный метод

Введение

Одной из основных характеристик антенного устройства является диаграмма направленности, отражающая распределение и свойства электромагнитного поля (ЭМП), излучаемого в пространство (для передающей антенны) или зависимость чувствительности от направления (для приемной антенны).

Измерение диаграмм направленности антенных устройств является важнейшей составляющей современных радиотехнических измерений. На практике часто возникает аналогичная задача – оценка электромагнитной обстановки (ЭМО), формируемой совокупностью близко расположенных радиопередающих устройств с учетом переотражения и интерференции от расположенных рядом зданий и сооружений.

В настоящее время актуальной является разработка методов измерений в труднодоступных секторах пространства, где невозможно использование других средств (вышек,

наземных мобильных измерительных пунктов). Эти средства должны позволять получить картину распределения ЭМП за короткий срок, в условиях сильных помех и мощности излучения, которая может быть опасной для персонала и нарушать функционирование систем радиолиний управления и передачи данных.

Цель работы состоит в определении облика перспективной системы облетных измерений характеристик антенн и ЭМП.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

1. Проанализировать актуальные задачи, для решения которых используются или могут быть использованы облетные методы измерений;
2. Выявить недостатки существующих средств проведения облетных измерений;
3. Сформулировать требования к бортовым навигационным датчикам для разных типов носителей;
4. Определить состав перспективной системы облетных измерений.

1. Проблема контроля электромагнитной обстановки

В настоящее время возрастает роль различных гражданских средств связи на базе беспроводных сетей и каналов связи, в том числе с различными подвижными объектами и транспортными средствами. Рост числа передающих радиотехнических объектов (ПРТО) связан с освоением и более плотным заполнением частотных диапазонов, увеличением числа каналов радио- и телевизионного вещания и других служб.

Урбанизация связана с развитием телекоммуникационных сетей, ростом количества передающих ПРТО, расположенных в непосредственной близости к жилым многоэтажным домам. Передающие антенны могут размещаться на антенно-мачтовых сооружениях и непосредственно на крышах жилых, общественных и промышленных зданий, дымовых трубах, опорах контактной сети городского электротранспорта.

Техногенные ЭМП различных частот оказывают влияние на здоровье человека, окружающую природную среду, а также могут приводить к сбоям в электронных системах управления транспортом, промышленными объектами и т.д. Это делает необходимым замеры фактических диаграмм направленности антенных устройств с учетом боковых лепестков для радиопередающих устройств, расположенных по соседству с жилыми зонами.

Анализ ЭМО является обязательным этапом при инженерно-экологических изысканиях под строительство, при аттестации рабочих мест, при составлении санитарно-гигиенических паспортов зданий по электромагнитной безопасности. Исследования проводят расчетными методами и путем измерения нормируемых параметров (напряженности электрической и магнитной составляющих ЭМП, магнитной индукции, плотности потока энергии).

Размещение и ввод в эксплуатацию ПРТО осуществляется в два этапа:

1. Определение уровней ЭМП расчетными методами;

2. Контрольные измерения интенсивности электромагнитных излучений, выполняемые после монтажа радиопередатчиков и проведения пуско-наладочных работ.

В условиях города имеет место несовпадение результатов натуральных наблюдений и расчетного прогнозирования ЭМП, выполненного с помощью программных комплексов анализа ЭМО, что обусловлено сложностью рельефа застройки, влиянием метеоусловий, реальными параметрами абонентской аппаратуры [1,2].

В этой связи необходимы замеры фактических диаграмм направленности антенных устройств с учетом боковых лепестков для ПРТО, расположенных по соседству с жилыми и промышленными зонами.

Оценка ЭМО в условиях городской застройки и в промышленных зонах усложняется близостью расположения ПРТО при наличии переотражения и интерференции от расположенных рядом зданий и сооружений.

Измерения ЭМП в ряде случаев необходимо выполнить внутри зданий и сооружений, а для некоторых промышленных объектов потребуется остановка технологических процессов, что не всегда возможно на практике.

Ситуация дополнительно усложняется неоднородностью ЭМП в трехмерном пространстве, а также их изменчивостью во времени. Например, особенностью ЭМП, формируемых при работе базовых станций (БС) сотовой связи, является зависимость мощности их излучения от количества обслуживаемых абонентов, максимум которой приходится между 11 и 16 часами, при значительном снижении загрузки в ночное время [3]. Это затрудняет формирование адекватной картины ЭМО вокруг интересующих объектов.

Не менее важной является проблема измерений диаграмм направленности при разработке и испытаниях сложных радиотехнических комплексов с большим количеством передающих и приемных антенн различных частотных диапазонов, работающих в разных режимах. Сложности возникают при измерениях диаграмм направленности бортовых антенн авиационной техники, морских и речных судов, протяженных инженерных сооружений, объектах транспортной инфраструктуры.

Еще одной актуальной проблемой является защита информации и данных о характеристиках специальных радиотехнических средств (радиолокации, связи) в местах их дислокации. Для решения этой задачи также требуются регулярные измерения ЭМО и контроль за ее динамикой во времени.

Эти измерения не должны быть затратными, затруднять функционирование ПРТО и их носителей. Для работы в труднодоступных зонах, а также для обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) с различными источниками большой мощности при измерениях нежелательно использовать радиолинию для обмена данными и аппаратуру спутниковой навигации (АСН).

При измерении диаграммы направленности различных передающих и приемных антенн в ряде случаев могут возникнуть следующие технические проблемы:

1. Введение ряда жестких ограничений, таких как: излучение только в выделенный сектор пространства, строго определенное время сеансов включения, необходимость разворота крупногабаритного и громоздкого носителя исследуемой антенны;
2. Ограничения работы других расположенных поблизости радиотехнических средств, способных создавать помехи при измерениях;
3. Необходимость постоянного использования АСН для определения координат средств измерений.

Применение АСН может быть затруднено в условиях сильных помех, при переотражении сигналов от близлежащих объектов и в случае экранирования созвездия навигационных спутников различными сооружениями.

Таким образом, актуальным является разработка оперативных методов измерения характеристик антенн и ЭМП, не требующих больших затрат и нарушения функционирования технических или жилых объектов, без использования громоздкой измерительной аппаратуры, которые могут быть многократно использованы за короткий промежуток времени и позволяют получить достоверную пространственно-временную структуру ЭМП, формируемых контролируруемыми ПРТО в условиях сложного рельефа местности, городской застройки или инженерных сооружений больших размеров.

2. Облетные методы контроля диаграмм направленности антенн

Исследование характеристик антенн с помощью пилотируемых летательных аппаратов (ЛА) и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) представляет собой облетный метод измерений (см. рис. 1). Пилотируемый ЛА или БПЛА с измерительной аппаратурой на борту совершает круговой облет исследуемой антенны с постоянными на каждом проходе высотой и радиусом.

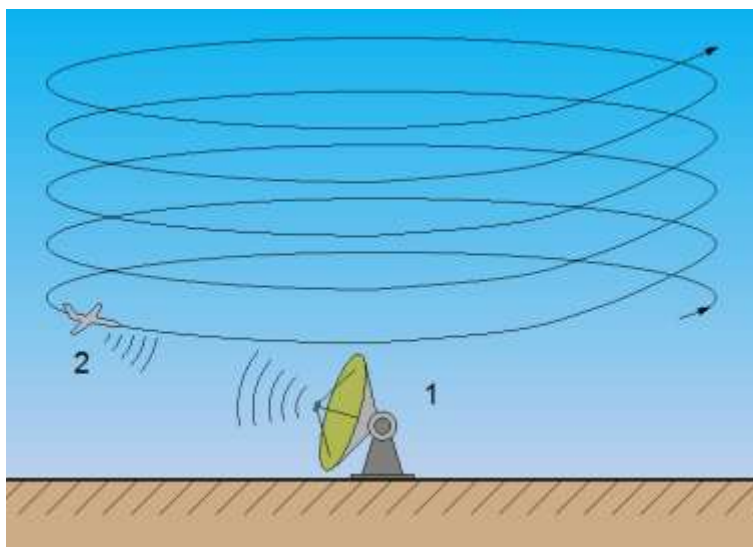


Рис. 1. Облетный метод измерений характеристик антенны: 1 – исследуемая антенна; 2 – пилотируемый ЛА или БПЛА с измерительной аппаратурой на борту

Недостатками известных методов облетных измерений с использованием пилотируемых ЛА [4,5] являются большие погрешности и низкая производительность при выполнении измерений. В целом, облетные методы с использованием пилотируемых ЛА относятся к технически сложным.

Применение БПЛА, управляемых дистанционно или выполняющих полет в полностью автоматическом режиме, позволяет:

1. Свести к минимуму риск для персонала;
2. Уменьшить экономические затраты;
3. Автоматизировать процесс измерений на всех этапах;
4. Снять эксплуатационные ограничения, относящиеся к пилотируемым ЛА.

Недостатки существующих методов облетных измерений с использованием БПЛА различных типов [6-12] заключаются в необходимости использования АСН, контрольно-корректирующей станции (ККС) и радиолинии, работа которых может быть нарушена при большой мощности излучения исследуемой антенны и других находящихся поблизости радиотехнических средств. В свою очередь, ошибки определения взаимной ориентации исследуемой антенны и измерительной антенны, а именно расположения оси, проходящей через фазовый центр измерительной антенны относительно фазового центра исследуемой антенны, приводят к неустранимым погрешностям.

Методы, позволяющие измерять диаграммы только приемных, или только передающих антенн, являются малоперспективными по следующей причине. Широкое применение в системах радиолокации и радиосвязи активных фазированных решеток (АФАР), которые относятся к невзаимным антеннам, потребует отдельных измерений диаграмм направленности на прием и на передачу.

Технология измерения диаграмм направленности антенн с использованием БПЛА имеет свою специфику [12], которую необходимо учитывать при использовании на практике.

Работы включают в себя этапы разработки полетных заданий, выполнение необходимого объема измерений и обработку полученных результатов. Для определения способа и оптимальной траектории облета используются геодезические координаты фазового центра антенны, требуемое разрешение по азимуту и углу места, а при измерениях на местности также учитываются параметры почвы и наличие помех.

Применение БПЛА для облетных измерений ограничено следующими основными факторами:

1. Мобильностью наземного сегмента;
2. Необходимостью получения разрешения на проведение полетов;
3. Метеорологическими условиями.

Облетный метод может быть реализован с использованием БПЛА как самолетного типа, так и мультикоптеров [8]. В зависимости от типа БПЛА различаются и технологии выполнения измерений.

Основные характеристики двух типов базовых БПЛА [8] представлены в таблице 1.

Таблица 1. Основные характеристики двух типов базовых БПЛА

Характеристика	Тип БПЛА	
	Самолетный	Мультикоптер
Габаритные размеры	~ 4,0×3,0×1,0 м	~ 1,5×1,5×1,0 м
Погрешность позиционирования (с использованием АСН) по географическим координатам по высоте	± 2,0 м (± 10 см*) ± 3,0 м (± 20 см*)	± 1,5 м (± 2 см*) ± 0,5 м (± 2 см*)
Диапазон рабочих температур	-35...45 °С	-10...40 °С
Возможность зависания в одной точке	Нет	Да
Взлетно-посадочная полоса	Требуется	Не требуется
Максимальные значения эксплуатационных параметров		
Взлетный вес, кг	50,0	15,5
Масса полезной нагрузки, кг	25	5
Скорость, км/ч	140	70
Продолжительность полета	12 ч	25 мин
Потолок, км	5,0	4,5
* В режиме дифференциальных поправок с использованием данных от ККС		

Из сравнения характеристик обоих носителей следует вывод, что они могут быть использованы для измерений параметров разных типов антенных комплексов.

БПЛА самолетного типа могут быть использованы для полных облетов антенн с расстоянием дальней зоны (зоны Фраунгофера) более 1 км.

Мультикоптеры позволяют провести секторные измерения диаграммы направленности крупноапертурных антенн в пределах главного луча и нескольких боковых лепестков, а также в измерениях объемной диаграммы направленности в верхней полусфере при радиусе облета менее 1 км.

Преимущества мультикоптеров в наибольшей степени проявляются в городской среде, а также в условиях плотной застройки, так как им не требуется взлетно-посадочная полоса.

Возможности применения мультикоптеров может быть расширены путем группового использования – технологии «роя». Применение «роя» мультикоптеров для антенных измерений может позволить значительно сократить время облета. Для БПЛА самолетного типа построение «роя» затрудняется большими значениями погрешностей при определении их координат [8].

В тоже время, для реализации «роя» необходима межбортовая связь на базе помехозащищенных каналов с высокой пропускной способностью и бортовые навигационные датчики с низкими погрешностями определения координат, использование которых приведет к кратному увеличению стоимости отдельных БПЛА.

Таким образом, по экономическим причинам, для антенных измерений предпочтительно использовать одиночный БПЛА.

Применимые для антенных измерений БПЛА самолетного типа имеют силовую установку на базе двигателя внутреннего сгорания. В мультикоптерах используются электродвигатели с питанием от бортовых аккумуляторных батарей.

Перспективная система облетных измерений, лишенная недостатков существующих технических решений, должна отвечать следующим требованиям:

1. Отсутствие наземного сегмента или его компактность и мобильность;
2. Измерения диаграмм направленности передающих и приемных антенн;
3. Навигация БПЛА без использования АСН;
4. Управление без использования командной радиолинии;
5. Минимальное участие человека при подготовке и выполнении измерений.

Для применения в городе БПЛА должны соответствовать требованиям безопасности. При полностью автоматическом управлении БПЛА обеспечение безопасности является функцией бортового программного обеспечения [13].

Система управления БПЛА должна обеспечивать безопасное завершение полета в случае отказов и наступления внештатных ситуаций.

Повышение безопасности полетов может быть достигнуто в первую очередь путем следующих конструктивных решений:

1. Защиты винтов для исключения контакта с ними;
2. Защитных воздушных подушек и парашютов, срабатывающих в случае неконтролируемого падения;
3. Источника резервного электропитания оборудования, обеспечивающего безопасность полета.

При построении измерительной системы на базе БПЛА, выполняющего полет в дальней зоне исследуемой антенны, необходимо обеспечить наведение измерительной антенны с допустимой погрешностью. Для этой цели может быть использована гиростабилизированная платформа, включающая в себя конструкцию из рамы, на которую крепится стабилизируемая антенна-зонд, и электроприводы.

Такая специальная гиростабилизированная платформа должна удовлетворять следующим требованиям [14]:

1. Электронные узлы платформы (контроллер системы управления, датчики и линии связи) должны быть экранированы от внешних излучений;
2. Обработка навигационных данных и корректировка работы основного контроллера выполняется отдельным микроконтроллером;
3. Текущее положение измерительной антенны и ее наведение выполняется с использованием энкодеров;
4. Конструкция рамы имеет малую массу и минимизирует влияние воздушных потоков от пропеллеров мультикоптера.

3. Навигация БПЛА при облетных измерениях

Использование БПЛА самолетного типа и мультикоптеров для антенных измерений разных видов предполагает различные требования к их навигационному обеспечению.

При облете крупноапертурных антенн БПЛА самолетного типа его бортовые навигационные датчики должны определять координаты с погрешностью, позволяющей восстановить форму диаграммы направленности шириной в десятые доли градуса.

Для получения пространственной диаграммы направленности антенны выполняются измерения напряженности поля в дальней зоне, расстояние до которой удовлетворяет условию [15]

$$r_{\min} = \frac{2D_A^2}{\lambda}, \quad (1)$$

где D_A – максимальный размер излучающей апертуры антенны; λ – длина волны излучения.

Требования, предъявляемые к радиусу облета исследуемой антенны [8], и способы их технической реализации перечислены в таблице 2.

Таблица 2. Требования к радиусу облета исследуемой антенны и их реализация

№ п/п	Требования	Техническая реализация
1	БПЛА находится в дальней зоне исследуемой антенны	Выполняется условие $r_{\text{обл}} \geq r_{\min}$
2	Облет занимает минимально возможное время	Облет выполняется по минимально допустимому радиусу с учетом п.п. 3 и 5
3	Обеспечивается приемлемая погрешность определения координат БПЛА	По возможности используется АСН в режиме дифференциальных поправок, в ином случае применяются подходящие по своим характеристикам датчики автономной навигации
4	Чувствительность бортового приемника позволяет регистрировать излучение исследуемой антенны / мощность бортового передатчика позволяет регистрировать его сигнал исследуемой антенной	Обеспечивается регулировкой мощности бортового передатчика, подбором бортовой антенны и использованием аттенюаторов*
5	Излучение исследуемой антенны не оказывает влияние на функционирование бортовых систем БПЛА	Производится экранирование электронных блоков бортовых систем БПЛА, навигация и выполнение измерений осуществляются в автономном режиме без использования радиолинии для обмена информацией с наземным пунктом управления
* На БПЛА могут устанавливаться бортовые антенны и передатчики из комплекта, входящего в аппаратное обеспечение комплекса (системы) [11], куда входят образцы для разных частотных диапазонов и мощностей		

Для выполнения измерений бортовые навигационные датчики должны обеспечить с приемлемой погрешностью измерение радиуса облета и положения измерительной антенны относительно оси диаграммы направленности исследуемой антенны.

При малой ширине луча (главного лепестка) поперечное сечение диаграммы направленности антенны на этой дальности будет равно

$$l = \frac{2D_A^2 \cdot \mathcal{G}}{\lambda}, \quad (2)$$

где \mathcal{G} – ширина диаграммы направленности антенны.

Как показывает практика, для описания главного лепестка диаграммы направленности антенны требуется выполнить измерения не менее чем в 10 точках, при этом погрешность определения угловых координат БПЛА относительно фазового центра исследуемой антенны не должна быть больше одного шага между измерениями [8].

Длина шага (отрезка) между двумя точками измерений составит

$$\Delta l = \frac{D_A^2 \cdot \mathcal{G}}{5\lambda}, \quad (3)$$

При небольшом радиусе облета погрешность определения координат БПЛА может превышать значение, полученное по выражению (3). В этом случае радиус облета $r_{обл}$ должен удовлетворять следующим неравенствам

$$\Delta_{\max} = \frac{r_{обл} \cdot \mathcal{G}}{10}, \quad (4)$$

$$r_{\min} < r_{обл} \leq r_{\max}, \quad (5)$$

где Δ_{\max} – максимальная погрешность определения координат; r_{\max} – максимальный радиус облета.

Если для навигации БПЛА используется бесплатформенная инерциальная навигационная система (БИНС), то накопление ошибок (уход) за время прохода главного лепестка в азимутальной плоскости приведет к погрешности

$$\Delta = \frac{2D_A^2 \cdot \mathcal{G} \cdot \Delta_{БИНС}}{\lambda \cdot v}, \quad (6)$$

где $\Delta_{БИНС}$ – уход БИНС; v – скорость БПЛА.

Принимая, что предельная погрешность должна удовлетворять условию

$$\Delta_{\max} \leq \Delta l, \quad (7)$$

получаем

$$\frac{\Delta_{БИНС}}{v} \leq 0,2. \quad (8)$$

Следует помнить, что БИНС практически всех типов обладают большой погрешностью в вертикальном канале, что затрудняет определение небольших изменений высоты. Поэтому, выражение (6) может быть применимо только при измерениях в азимутальной плоскости. Для измерений в угломестной плоскости необходимы данные от датчиков другого типа – например, лазерного или барометрического высотомера.

Допустимую погрешность определения дальности до исследуемой антенны можно определить следующим образом.

Мощность принимаемого радиосигнала определяется известным выражением [16]

$$P_{\text{ПРМ}} = \frac{P_{\text{ПРД}} \cdot G_{\text{ПРД}} \cdot S_A \cdot \eta}{4\pi \cdot R^2}, \quad (9)$$

где $P_{\text{ПРД}}$ – мощность передатчика; $G_{\text{ПРД}}$ – коэффициент усиления передающей антенны; R – дальность между передатчиком и приемником (наклонная дальность до исследуемой антенны); S_A – эффективная площадь приемной антенны; η – коэффициент потерь на трассе распространения радиосигнала.

Ослабление при распространении радиосигнала составляет

$$L_0 = 20 \log \left(\frac{4\pi \cdot R}{\lambda} \right). \quad (10)$$

Выражение (10) можно представить в виде

$$L_0 = 32,44 + 20 \log f + 20 \log R, \quad (11)$$

где f – рабочая частота.

Отсюда следует, что погрешность определения дальности между передатчиком и приемником ΔR будет приводить к изменениям ослабления радиосигнала

$$\Delta L_0 = 20 \log \left(\frac{R + \Delta R}{R} \right), \quad (12)$$

Соответственно

$$\Delta R = R \cdot \left(10^{\frac{\Delta L_0}{20}} - 1 \right). \quad (13)$$

Вклад составляющих погрешности по координатам на плоскости и по высоте определяется выражением

$$\Delta R = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}. \quad (14)$$

При этом

$$\Delta R = \sqrt{\left(\sqrt{(x + \Delta x)^2 + y^2 + z^2} - R \right)^2 + \left(\sqrt{x^2 + (y + \Delta y)^2 + z^2} - R \right)^2 + \left(\sqrt{x^2 + y^2 + (z + \Delta z)^2} - R \right)^2} \quad (15)$$

Так как

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad (16)$$

то принимаем

$$\Delta r = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}, \quad (17)$$

$$\Delta z = \Delta h, \quad (18)$$

где Δr – погрешность определения радиуса облета; Δh – погрешность определения высоты облета.

В этом случае, выражение (14) принимает вид

$$\Delta R = \sqrt{\Delta r^2 + \left(\sqrt{r^2 + (h + \Delta h)^2} - \sqrt{r^2 + h^2} \right)^2}. \quad (19)$$

Очевидно, что влияние Δh на ΔR будет возрастать с увеличением высоты облета.

На рис. 2 показана зависимость величины погрешности ΔR от длины радиуса R для допустимого ослабления радиосигнала $\Delta L_0 = 0,1$ дБ.

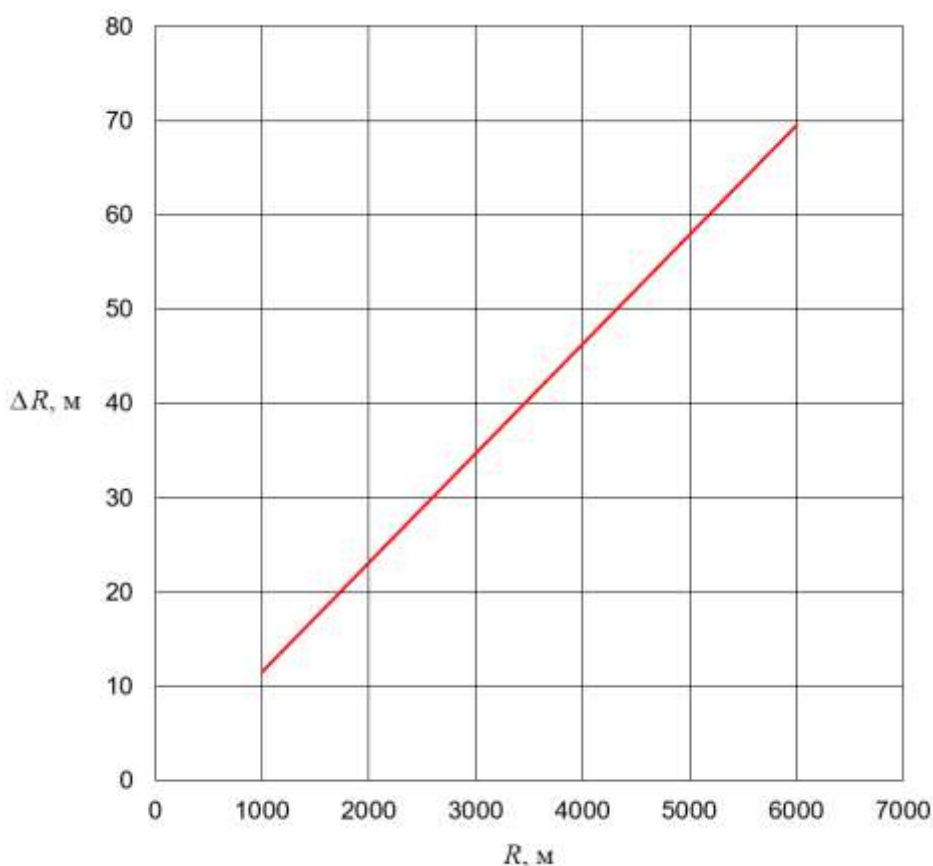


Рис. 2. Зависимость величины погрешности ΔR от длины радиуса R при $\Delta L_0 = 0,1$ дБ

Сравнение данных таблицы 1 и рисунка 2 показывает, что погрешность определения координат в плоскости сечения луча исследуемой антенны, должна быть на порядок меньше погрешности измерений дальности до ее фазового центра.

Мультикоптер может выполнять облет измеряемых антенн в условиях плотной городской или промышленной застройки. В этом случае на первый план выходят задачи обеспечения безопасности полетов. При выполнении измерений выполняется маневрирование в небольшом пространстве, ограниченном различными зданиями и сооружениями, растительностью, тонкими протяженными препятствиями (тросами, проводами, растяжками). Последние относятся к малозаметным для бортовых навигационных датчиков и могут представлять серьезную проблему для БПЛА.

Максимальную величину радиуса для каждого типа БПЛА можно определить следующим образом. Допустим, что погрешность наведения узкой диаграммы направленности исследуемой антенны по углу места не превышает тройной ширины ее главного лепестка. Как было указано выше, для исследования диаграммы требуется не менее 10 точек, таким образом потребуется 30 полных облетов по круговой траектории.

Далее примем, что взлетно-посадочная полоса или оборудованная площадка, необходимая для взлета и посадки БПЛА самолетного типа, находится на дальности не более двух радиусов облета от исследуемой антенны, а для маневров по высоте достаточно запаса, эквивалентного одному радиусу облета. Таким образом, всего потребуется около 31...32 полных облета.

Мультикоптер принципиально может взлетать и совершать посадку в точках, находящихся на траектории облета, поэтому число полных облетов составит 30...31.

Максимально возможный радиус облета можно примерно оценить по выражению

$$r_{\max} \approx \frac{v_{кр} \cdot t_{\max}}{N \cdot \pi}, \quad (20)$$

где $v_{кр}$ – крейсерская скорость БПЛА; t_{\max} – максимальная продолжительность полета БПЛА; $N = 64$ (для БПЛА самолетного типа) или $N = 61$ (для мультикоптеров).

Зная рабочую длину волны и максимальный радиус облета по выражению (20) можно определить максимальные размеры антенны. Минимальная длина волны излучения должна удовлетворять условию $\lambda \geq 4,0$ см, так как при с дальнейшим уменьшением длины волны возрастает поглощение радиосигнала в атмосферных осадках.

Облетный метод измерений может применяться при углах места до 50...60° [8]. Соответственно, при больших углах места выполняется неравенство

$$r_{обл} < R_{\min}. \quad (21)$$

Тогда траектории БПЛА в угломестной плоскости также будут пересекать диаграмму направленности антенны под углом, и выражение (3) для этого случая примет вид

$$\Delta l = \frac{D_A^2 \cdot \vartheta \cdot \cos \beta}{5\lambda}, \quad (22)$$

где β – угол места диаграммы направленности исследуемой антенны.

Для эквидистантной (с равным расстоянием между элементами) АФАР ширина диаграммы направленности равна [17]

$$\vartheta = \frac{0,886 \cdot \lambda}{D_A \cdot \cos \vartheta_0}, \quad (23)$$

где ϑ_0 – угол отклонения диаграммы направленности.

Определив таким образом ширину диаграммы направленности с помощью выражения (3) получаем допустимую погрешность определения координат БПЛА в азимутальной плоскости.

4. Требования к бортовым навигационным датчикам

В ходе дальнейшей оценки рассмотрим два основных типа антенн, для которых выполняются измерения, и параметры их облета рассматриваемыми БПЛА.

Крупноапертурные антенны используются в радиотелескопах, системах космической связи (зеркального типа) и средствах обнаружения ракетно-космических запусков (на базе АФАР). Для исследования диаграммы направленности крупноапертурных зеркаль-

ных антенн в основном используют радиоастрономический метод, а для оценки характеристик АФАР может применяться облетный метод [8].

В городской и промышленной застройке, где для облетных измерений могут использоваться мультикоптеры, наиболее заметный вклад в формирование ЭМО вносят БС сотовой связи, в которых используется несколько секторных антенных решеток (АР), с диапазоном рабочих частот 900...2800 МГц. Угол раскрыва (ширина) главного лепестка АР в горизонтальной плоскости составляет 60...120° и 2...3° в вертикальной плоскости. При этом, главный лепесток направлен в сторону от сооружений, на которых находятся АР, и выше окружающей застройки [3].

При определении высоты полета необходимо принимать во внимание следующие факторы.

Высота большинства жилых зданий редко превышает 50 м, а промышленные и производственные сооружения могут достигать 500 м, откуда определяется максимальная высота облета городской и промышленной застройки мультикоптером.

С дальнейшим увеличением высоты облета может возрасти погрешность навигации по изображению рельефа подстилающей поверхности. БПЛА самолетного типа может использовать оптические навигационные датчики на высоте до 3000 м [18].

В таблице 3 указаны параметры облета двух типов антенн. Погрешности навигации определены для минимального радиуса облета r_{\min} . Для АФАР эти погрешности соответствуют допустимой точности восстановления диаграммы направленности в азимутальной и угломестной плоскостях, с использованием выражений (3) и (22). У секторной АР в первую очередь оценивается точность восстановления диаграммы направленности в угломестной плоскости, связанная с погрешностью измерений высоты, а погрешность измерений координат в азимутальной плоскости определяется допустимым ослаблением радиосигнала (0,3 дБ) по выражению (13).

Таблица 3. Параметры облета основных типов антенн

Характеристика	Тип антенны	
	Крупноапертурная АФАР	Секторная АР
Рабочая частота / длина волны	7500 МГц 4 см	2800 МГц 10,7 см
Габариты	10,0×10,0 м	2,0×0,4 м
Диаграмма направленности	0,2°×0,2°	60,0°×3,1°
Угол места диаграммы направленности	30,0°	-3,8°
Тип БПЛА	Самолетный	Мультикоптер
Крейсерская скорость облета	100 км/ч	50 км/ч
Минимальный радиус облета	4,33 км	37,3 м
Максимальный радиус облета	5,97 км	108,71 м
Погрешность навигации координаты в азимутальной плоскости высота	± 1,75 м ± 1,51 м	± 1,31 м ± 0,40 м

Как видно из данных таблицы, допустимая погрешность навигации находится между значениями, которые обеспечивает АСН в автономном режиме и с использованием ККС (в режиме дифференциальных поправок).

При отсутствии достаточного количества объектов, являющихся характерными ориентирами, для навигации могут быть использованы специальные элементы (маяки, маркеры и мишени – наземные реперы), установленные вблизи исследуемой антенны, площадок для взлета и посадки, опасных препятствий. Задачей этих элементов является снижение погрешности навигации БПЛА до величины, приемлемой для антенных измерений и безопасного выполнения полета.

Дополнительные требования к навигационным датчикам для БПЛА обоих типов представлены в таблице 4.

Таблица 4. Дополнительные требования к навигационным датчикам для двух типов базовых БПЛА

Характеристика	Тип БПЛА	
	Самолетный	Мультикоптер
Работа в ограниченном пространстве	–	+
Количество характерных ориентиров	Минимальное	Достаточное
Использование мишеней для навигации	Мишени могут быть установлены только вблизи исследуемой антенны	Установка мишеней возможна по всему маршруту облета
Обнаружение тонких протяженных препятствий	–	+
Переотражение радиосигнала	–	+
Вероятность наличия магнитных аномалий	Низкая	Высокая

Использование гиросtabilизированной платформы позволяет путем изменения угла крена измерительной антенны в полете управлять ее поляризацией. При этом для БПЛА самолетного типа габариты антенны на гиросtabilизированном подвесе ограничены размерами и формой аэродинамического обтекателя [8].

Для мультикоптеров в ряде случаев целесообразно использование всенаправленной в азимутальной плоскости антенны. При измерениях с вертикальной поляризацией устанавливается вертикальный вибратор, а для горизонтальной поляризации – кольцевая антенная решетка [11].

Для автономной навигации в общем случае используется БИНС с классом точности, соответствующим характеристикам носителя.

БИНС высокой и средней точности ($\Delta_{\text{БИНС}} = 0,01 \dots 1,00$ м/с) на базе лазерных гироскопов, обладают большой массой и габаритами, а также имеют высокую стоимость. Для навигации БПЛА самолетного типа, производящего антенные измерения, возможно использование БИНС средней и низкой точности ($\Delta_{\text{БИНС}} = 1,00 \dots 2,78$ м/с) на базе волоконно-оптических (ВОГ) гироскопов.

Навигация мультикоптеров обычно выполняется с помощью миниатюрных БИНС низкого класса точности ($\Delta_{\text{БИНС}} = 1 \dots 10$ м/с) на базе микроэлектромеханических (МЭМС) гироскопов. БИНС на базе МЭМС-гироскопов нуждаются в постоянной коррекции от АСН. При отсутствии информации от АСН коррекцию возможно осуществлять по данным лазерных локационных систем (ЛЛС или т.н. «лидаров» – англ. lidar) [19].

Автономная навигация и коррекция БИНС могут выполняться путем сопоставления изображений подстилающей поверхности, полученных бортовой телекамерой, установленной на гиростабилизированной платформе, с топографическими картами, снимками из космоса, или с последовательностью ранее полученных изображений [18,20].

Для навигации БПЛА широко применяется метод одновременной локализации и построения карты (SLAM) по рельефу местности, с использованием данных от телекамер или от ЛЛС. В отличие от телекамер, ЛЛС обеспечивают получение данных независимо от условий освещенности, при этом их массогабаритные характеристики и потребляемая мощность определяются дальностью измерений и, соответственно, типом БПЛА-носителя.

Недостатками перечисленных методов являются требования к неоднородности рельефа подстилающей поверхности, а при использовании телекамер и ЛЛС – ограничения по высоте и метеоусловиям при выполнении облета. Эти ограничения становятся существенными при облетных измерениях крупноапертурных антенн, что обусловлено расположением подобных объектов в малонаселенных и труднодоступных районах, где однообразный ландшафт (лес, тундра, водная поверхность) и отсутствие характерных объектов на местности могут затруднять навигацию по рельефу подстилающей поверхности.

Навигация по магнитному курсу в условиях города или промышленной зоны будет затруднена большим количеством аномалий магнитного поля, вызванных искусственными объектами, поэтому установка цифрового компаса на мультикоптер нецелесообразна.

Основные характеристики навигационных датчиков [18,20,21], которые могут быть использованы при облетных измерениях двумя типами БПЛА, указаны в таблице 5.

Таблица 5. Основные характеристики навигационных датчиков

Тип датчика	Измеряемая величина	Погрешность измерений	Зависимость от метеоусловий	Работа в ночное время	Примечания	Тип БПЛА	
						Самолетный	Мультикоптер
АСН	Координаты	0,5...5,0 м	–	+	Должна обеспечиваться видимость навигационных спутников, в режиме дифференциальных поправок погрешность может быть снижена на порядок	+	+
БИНС на базе ВОГ и МЭМС	Координаты	1,67...2,78 м/с	–	+	Накопление ошибок со временем	+	+
Аппаратура для навигации по изображениям подстилающей поверхности	Координаты	2...100 м	+	+	Не работает при полете над однородной поверхностью	+	+
Радиовысотомер	Высота	0,02·h м	–	+	Может создавать помехи при приеме радиосигнала от исследуемой антенны	+	+
Лазерный высотомер	Высота	0,2...0,3 м	–	+	Недопустимы загрязнения и повреждения оптических поверхностей	+	+
Барометрический высотомер	Высота	0,1...0,5 м	+	+	Диапазон измерений 0...9000 м полностью перекрывает все высоты облета	+	+
Цифровой компас	Магнитный курс	1,0...2,5°	–	+	Чувствительность к аномалиям магнитного поля	+	–

Использование навигационных датчиков и аппаратуры связи, излучающих в радиодиапазоне, может создавать помехи при антенных измерениях. Частотные диапазоны основных типов излучающих радиотехнических средств, используемых на БПЛА [22], перечислены в таблице 6.

Таблица 6. Частотные диапазоны основных типов излучающих радиотехнических средств, используемых на БПЛА

№ п/п	Радиолиния	Диапазон частот	Примечания	Ширина канала	Мощность передатчика	Дальность			
1	Связь с наземным пунктом управления [22]	220...400 МГц	УКВ	25 кГц	15...25 Вт	15...75 км**			
		443 МГц	RC433						
		725...770 МГц	4G						
		790...830 МГц							
		850...894 МГц	4G, CDMA						
		868...916 МГц	RC868						
		890...915 МГц	GSM900						
		935...960 МГц							
		1,4...1,85 ГГц	L-диапазон				300...700 кГц*	5...15 Вт	15...75 км**
		1,71...1,88 ГГц	GSM1800						
2,11...2,17 ГГц	3G								
2,2...2,5 ГГц	S-диапазон	300...700 кГц*	5...15 Вт	15...75 км**					
2,4...2,5 ГГц	Wi-Fi	22 МГц	0,1...1,0 Вт						
2,5...2,7 ГГц	4G								
4,4...5,85 ГГц	C-диапазон	300...700 кГц*	5...15 Вт	15...75 км**					
4,9...5,5 ГГц	Wi-Fi	22 МГц	0,1...1,0 Вт						
5,5...6,1 ГГц									
14,4...14,83 / 15,15...15,35 ГГц	Ku-диапазон	300...700 кГц*	5...15 Вт	15...75 км**					
2	Радиовысотомеры [23,24]	4,2...4,4 ГГц	-	-	100 мВт	0...1500,0 м			
		24,0...24,2 ГГц			316 мВт	0,1...50,0 м			

* 0,7...28 МГц в режиме широкополосного сигнала

** В зависимости от использования направленных или ненаправленных антенн на борту БПЛА и на наземном пункте управления

Как видно из табличных данных, очень плотное распределение частот может затруднять проведение антенных измерений в соседних диапазонах (с учетом внеполосных излучений, каналов побочного приема и гармонических излучений радиопередатчиков). Антенны размещаются на фюзеляже БПЛА, имеющем небольшие размеры, изготовленном с широким использованием композиционных материалов, которые обладают непроводящей поверхностью и являются «полупрозрачными» для электромагнитных волн метрового и дециметрового диапазонов [25].

Обеспечение ЭМС бортовой аппаратуры БПЛА является непростой задачей и дополнительно усложняется необходимостью функционирования в створе излучения мощных исследуемых антенн.

Для надежного автономного управления движением БПЛА и точной привязки результатов измерений могут быть использованы оптические методы измерения, позволяющие снизить влияние радиопомех. На БПЛА самолетного типа и мультикоптерах успешно эксплуатируются лазерно-оптические приборы, предназначенные для топографической съемки местности и безопасного выполнения посадки [26-28].

Также представляет интерес применение разработанных для космической техники принципов определения координат и ориентации взаимодействующих космических объектов при стыковке по их оптическим изображениям [29].

При управлении сближением и стыковкой взаимодействующих объектов в космосе применяются ЛЛС, обеспечивающие измерение дальности и углов ориентации. В качестве ответной части используются уголкового отражатели (трипель-призмы), размещенные в определенной конфигурации («созвездии») на корпусе объекта.

Для межбортовой связи космических объектов и передачи информации на наземные пункты разработаны системы лазерной связи, обеспечивающие обнаружение корреспондента и измерение дальности до него, а затем последующий обмен информацией по каналу с широкой полосой пропускания, который не подвержен влиянию радиопомех.

Основные характеристики лазерно-оптической аппаратуры для космической техники и БПЛА [26-30] представлены в таблице 7.

Таблица 7. Основные характеристики лазерно-оптической аппаратуры для космической техники и БПЛА

Аппаратура	Максимальная дальность измерений	Погрешность измерений дальности, м	Погрешность определения углов ориентации	Потребляемая мощность, Вт	Масса, кг
ЛЛС космического исполнения	5 км (300 м*)	0,01...0,50	0,10...0,01°	75	15,0**
ЛЛС для БПЛА	500 м	0,015	–	18	1,6
Аппаратура лазерной связи космического исполнения***	300 м... 51 000 км	0,1	–	175	44,0
Лазерный высотомер для БПЛА самолетного типа	120...1000 м	0,2...0,3	–	1,8	3,0
Лазерный высотомер для мультикоптера	0,2...200,0 м	0,1	–	0,5	0,03
Лазерные маяки	40 000 км	–	–	75...150	6,0
* Для углов ориентации при базе между двумя уголковыми отражателями 2 м					
** Масса ответной части – блоков уголковых отражателей составляет 0,5...2,0 кг					
*** Включает в себя лазерные маяки					

Из табличных данных видно, что применение ЛЛС, аналогичных используемым в космической технике, для антенных измерений затрудняется небольшой дальностью измерений углов ориентации и их большой массой. В системах лазерной связи наведение оптических систем должно выполняться с погрешностью не более нескольких угловых секунд, а погодные условия на атмосферной трассе не должны препятствовать распространению сигнала, что также трудно реализуемо на практике.

Для ориентации по азимуту возможно использование лазерных маяков с узкой диаграммой направленности излучения прямоугольной формы, которая привязана к строительным осям конструкции и к фазовому центру исследуемой антенны (см. рис. 3). Для обнаружения излучения маяка могут быть использованы различные оптические датчики, в том числе штатно установленные на борту телекамеры.

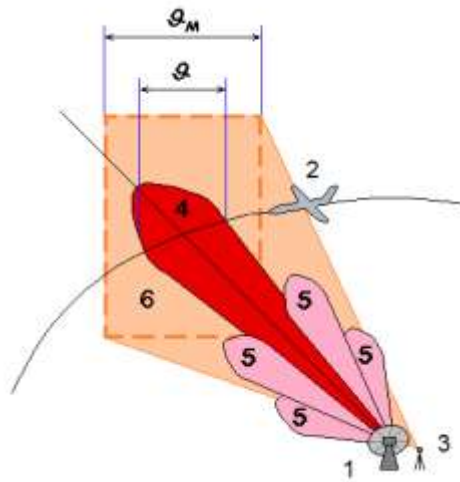


Рис. 3. Использование лазерного маяка для ориентации БПЛА при облете: 1 – исследуемая антенна; 2 – БПЛА; 3 – лазерный маяк; 4 – главный лепесток диаграммы направленности исследуемой антенны; 5 – боковые лепестки диаграммы направленности исследуемой антенны; 6 – диаграмма направленности лазерного маяка; g – ширина диаграммы направленности исследуемой антенны в азимутальной плоскости; g_M – ширина диаграммы направленности лазерного маяка в азимутальной плоскости

Привязка к исследуемой антенне в азимутальной плоскости осуществляется с использованием следующего соотношения

$$Az = \frac{t \cdot r_{обл}}{v}, \quad (24)$$

где t – временной интервал, соответствующий приему сигнала от лазерного маяка; v – скорость БПЛА.

В отсутствие данных от АСН измерение скорости БПЛА может осуществлять БИНС. Погрешность измерения угла в азимутальной плоскости с учетом всех составляющих равна

$$\Delta Az = \frac{t \cdot \Delta v \cdot (r_{обл} + \Delta r_{обл}) + t \cdot v \cdot \Delta r_{обл} + \Delta t \cdot v \cdot (r_{обл} + \Delta r_{обл})}{2\pi \cdot r_{обл} \cdot (r_{обл} + \Delta r_{обл})} + \Delta g_M + \Delta g'_M, \quad (25)$$

где Δv – погрешность измерения скорости; $\Delta r_{обл}$ – погрешность измерения радиуса облета; Δt – погрешность привязки ко времени; Δg_M – погрешность привязки диаграммы излучения (створа) маяка; $\Delta g'_M$ – погрешность измерения ширины диаграммы излучения (створа) маяка. в азимутальной плоскости

Оценка для лазерного маяка с шириной диаграммы излучения $g_M = 0,4^\circ$ показывает, что при $\Delta r_{обл} = 200$ м, $\Delta v = 5$ м/с, $\Delta t = 10^{-3}$ с, привязка к исследуемой антенне может осуществляться с допуском $\Delta g_M + \Delta g'_M = 0,026^\circ$.

Установка измерительной антенны с широкой диаграммой направленности на гиросtabilизированную по трем осям платформу позволяет частично снизить требования к навигационным датчикам БПЛА. В этом случае величина погрешности при определении

углов крена, тангажа и курса должна быть допустимой для выполнения безопасного полета по заданному маршруту.

На основе данных по существующим аналогам [8,21,26-28], определен примерный состав бортовой измерительной аппаратуры и навигационных датчиков для обоих типов БПЛА (см. таблицу 8).

Таблица 8. Состав бортовой измерительной аппаратуры и навигационных датчиков БПЛА с указанием весов и потребляемой мощности

Аппаратура	Тип БПЛА			
	Самолетный		Мультикоптер	
	Вес, кг	Потреб. мощн., Вт	Вес, кг	Потреб. мощн., Вт
Передатчик эталонного сигнала	0,17	3,6	0,05	0,5
Измерительный приемник	0,30	7,5	0,10	2,0
Антенна на гиросtabilизированной платформе	0,60	0,5	0,60*	0,5
Накопитель данных	0,50	20	0,50	20
АСН	0,30	3,0	0,05	1,5
БИНС	3,40	14,0	0,10	1,2
Вычислитель	0,50	15,0	0,50	15,0
Телекамера на гиросtabilизированной платформе	0,80	5,0	0,50	3,0
Телекамера	0,10	2,5	0,10	2,5
ЛЛС	1,60	18,0	1,60	18,0
Лазерный высотомер	3,00	1,8	0,03	0,5
Барометрический высотомер	0,05	0,01	0,05	0,01
Цифровой компас	0,10	0,5	–	–
Итого	11,42	91,41	4,18	64,71
* Могут быть установлены ненаправленные антенны с весом не более 0,2 кг, не потребляющие мощность от бортовой сети				

Массовая сводка показывает, что если полезная нагрузка БПЛА самолетного типа составляет около 25 кг, то имеется резерв около 13,5 кг для установки электромагнитных экранов, позволяющих защитить системы и оборудование БПЛА от воздействия ЭМП, формируемого мощными ПРТО.

Для мультикоптера, выполняющего облеты в черте населенного пункта или промышленной зоне, этот резерв составляет всего 0,8 кг. Однако, в указанных зонах размещаются ПРТО, на которые распространяются требования по ограничению излучения в целях обеспечения ЭМС с другими техническими средствами, а также безопасности рабочего персонала и населения. Таким образом, даже с учетом превышения заданных уровней ЭМП, оказываемое ими электромагнитное воздействие будет ниже на несколько порядков в сравнении с воздействием от мощных источников, для облета которых используются БПЛА самолетного типа (например, мощных РЛС).

Перед началом облета осуществляется выставка БИНС и гиросtabilизированных платформ. Выставка может производиться как по данным от внешних датчиков, так и авто-

номно. В последнем случае углы крена и тангажа определяются акселерометрами БИНС и платформ. Курс определяется с помощью внешнего датчика, или БПЛА с заранее ориентированными платформами выставляется на стоянке по заранее определенным ориентирам, а курс вводится вручную оператором.

В качестве внешних датчиков могут быть использованы наземная помехозащищенная АСН, БИНС с коррекцией (например от одометра) и др.

При облете крупноапертурных антенн ситуация облегчается тем, что для подобных объектов, как правило, еще на этапе постройки осуществляется геодезическая привязка. Кроме того могут быть в наличии данные аэрофотосъемки или спутниковые снимки местности, пригодные для навигации при условии выраженного рельефа поверхности с достаточным количеством характерных объектов.

5. Перспективная система облетных измерений

Результаты выполненного в работе анализа позволяют сформулировать требования к перспективной системе облетных измерений, которая может быть использована как для исследования крупноапертурных антенн, так и для анализа ЭМО в условиях плотной застройки.

Эта система должна иметь следующий состав:

1. Летный сегмент, включающий в себя

- БПЛА самолетного типа;
- БПЛА типа мультикоптер;

2. Наземный сегмент, включающий в себя

- станцию управления;
- стартовое устройство;
- реперы для ориентации БПЛА;
- навигационные датчики для предполетной выставки БИНС и гиросtabilизированной платформы БПЛА;
- программно-аппаратный комплекс для обработки результатов измерений;
- средства обеспечения (диагностики, технического обслуживания и транспортировки);

БПЛА самолетного типа эксплуатируется с подготовленных площадок 100×20 м, при необходимости взлет может осуществляться посредством катапульты, а посадка – с использованием парашюта.

Облет и измерения штатно выполняются в автономном режиме, без участия оператора БПЛА, основная задача которого заключается в подготовке БПЛА к запуску и снятии зарегистрированных данных. При этом в составе системы предусмотрены радиолинии для дистанционного управления и передачи данных с борта БПЛА с установленной АСН, которая также в благоприятных условиях может обеспечивать бортовой комплекс управления носителя навигационной информацией.

Обеспечивается оперативная обработка полученных данных непосредственно на месте измерений.

Состав системы представлен в таблице 9.

Таблица 9. Состав перспективной системы облетных измерений

№ п/п	Наименование	Кол-во, шт.	Вес, кг
1	БПЛА самолетного типа	1	50,0
2	БПЛА типа мультикоптер	1	15,5
3	Пневматическая катапульта для запуска БПЛА самолетного типа (с компрессором)	1	150,0
4	Средства наземного обеспечения в составе		
	- метеорологическая станция;	1	4,0
	- подвижный агрегат электропитания;	1	100,0
	- топливозаправочная станция;	1	100,0
	- КПА.	4	30,0
5	Наземная антенна для управления и телеметрии на штативе	1	25,0
6	Наземная станция управления	1	15,0
7	Бензогенератор (дизельгенератор)	2	2×20,0
8	Зарядное устройство для аккумуляторных батарей БПЛА типа мультикоптер	1	2,0
9	Резервные аккумуляторные батареи для БПЛА типа мультикоптер	4	4×2,0
10	Набор целевых нагрузок (бортовых передатчиков, приемников, антенн)	1	20,0
11	Набор наземных реперов для ориентации БПЛА	1	20,0
12	Теодолит (тахеомер)	1	8,0
13	Лазерный дальномер	1	2,0
14	Защищенный ноутбук для обработки данных	1	5,0
15	Средства визуального наблюдения		
	- бинокль;	1	1,0
	- прибор ночного видения.	1	1,0
16	Анализатор спектра с антенной, аттенюаторами и кабелями	1	15,0
17	Помехозащищенная навигационная аппаратура (АСН + БИНС + одомер + магнитометр)	1	16,0
18	Комплект инструмента для обслуживания	1	15,0
19	Комплект эксплуатационной документации	1	1,0
	Итого		643,5

Система в представленном составе размещается на автомобильном или гученичном шасси повышенной проходимости. Расчет составляет три человека: командир, оператор БПЛА, водитель.

Алгоритм выполнения антенных измерений представлен на рис. 4.

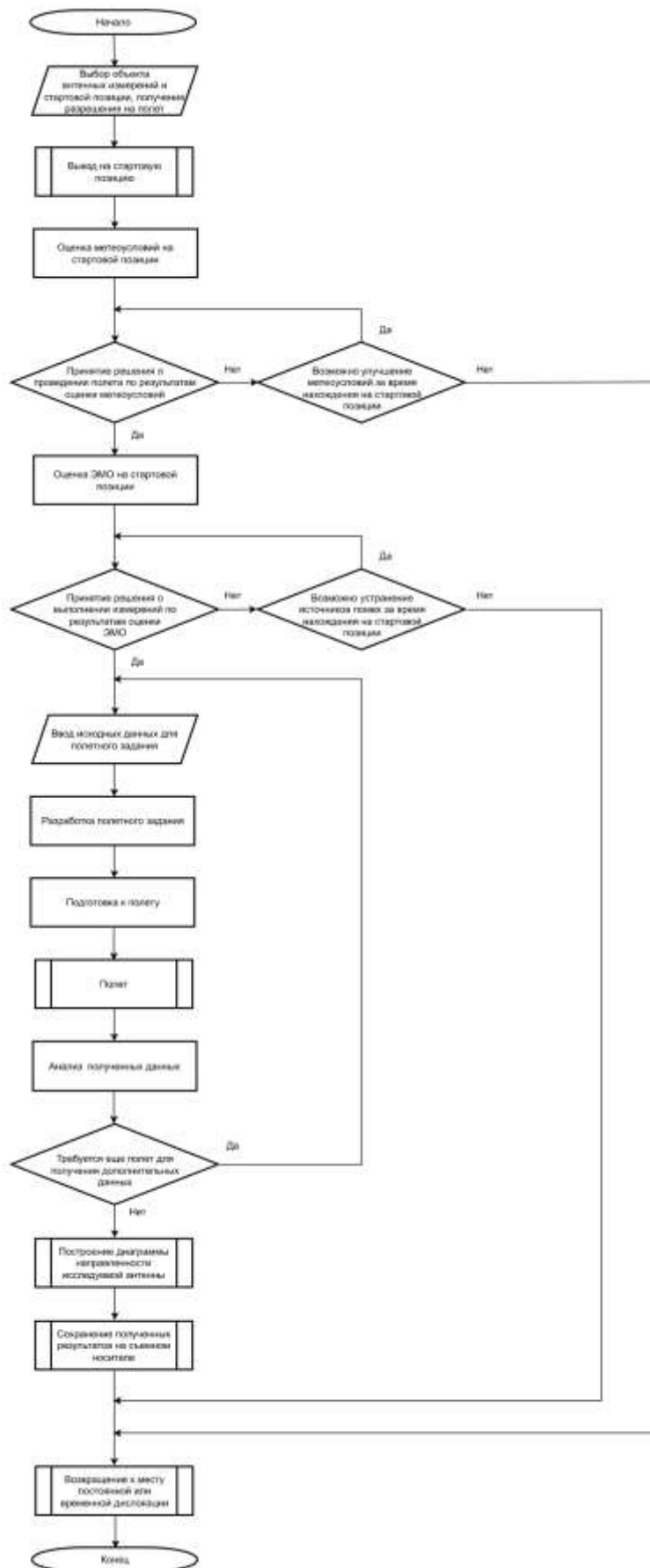


Рис. 4. Алгоритм исследования антенны с использованием перспективной системы облетных измерений

Заключение

Анализ современного состояния техники облетных измерений и смежных областей показал, что:

- бортовые средства измерений должны обеспечивать работу на прием и на передачу радиосигнала, что необходимо при облетных измерениях радиотехнических систем на базе АФАР;
- облетные измерения могут быть выполнены без использования данных от бортовой АСН и командной радиолинии для связи с наземным пунктом;
- погрешности определения координат в плоскости сечения луча исследуемой антенны, должны быть на порядок меньше погрешностей измерений дальности до ее фазового центра;
- для автономного управления движением БПЛА и привязки результатов измерений возможно применение лазерно-оптической аппаратуры, соответствующей требованиям по дальности измерений, массе и габаритам.

Получены следующие результаты, представляющие практический интерес:

- требования к бортовым навигационным датчикам БПЛА самолетного типа и мультикоптера;
- примерный состав бортовой измерительной аппаратуры и навигационных датчиков для обоих типов БПЛА;
- состав перспективной мобильной системы облетных измерений, использующей оба типа БПЛА;
- алгоритм исследования антенны с использованием предложенной перспективной системы облетных измерений.

Список литературы

1. Агеева А.А. Исследование электромагнитной обстановки от передающих объектов в г. Владивостоке с использованием геоинформационных систем // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2011. № 9 (122). С. 244-246.
2. Стаценко Л.Г., Агеева А.А. Электромагнитная обстановка при формировании городской застройки // Вестник инженерной школы ДВФУ. 2018. № 4 (37). С.119-127.
3. Моисеенко О.А., Чернецкая Л.А., Касьянова О.В., Денисов Д.Н. Электромагнитная обстановка в местах размещения объектов подвижной радиосвязи // Здоровье. Медицинская экология. Наука. 2010. № 1-2 (41-42). С.90-91.
4. Страхов А.Ф., Бондаренко В.М., Страхов О.А. Способ измерения диаграммы направленности приемной антенны: а.с. SU 1778714A1.
5. Попов Е.С., Минабудинов К.А. Способ измерения диаграммы направленности диапазонной антенны: Патент СССР SU 1804627 А3.

6. Классен В.И., Просвиркин И.А., Левитан Б.А., Топчев С.А. Измерение параметров излучения крупноапертурных антенн с помощью беспилотного летательного аппарата // Технологии и средства связи. 2014. № 1. С.60-65.
7. Классен В.И., Левитан Б.А., Просвиркин И.А., Топчев С.А. Способ измерения параметров направленности антенны с помощью БПЛА методом облета: пат. № 2626561 Российская Федерация. 2017. Бюл. № 22. 9 с.
8. Просвиркин И.А. Облетный метод измерения диаграмм направленности крупноапертурных антенн с использованием беспилотного летательного аппарата и системы ГЛОНАСС. Дисс....канд. техн. наук. Казань. 2018. 157 с.
9. US Patent № 10067172, 04.09.2018 «Far-field antenna pattern characterization via Drone/UAS platform».
10. Гогоберидзе Ю.Т., Классен В.И., Левитан Б.А., Литновский В.Я., Просвиркин И.А., Топчев С.А. Способ автоматизированной ориентации бортовой антенны беспилотного комплекса для измерений параметров направленности антенн: пат. № 2704393 Российская Федерация. 2019. Бюл. № 31. 9 с.
11. Лучин Д.В., Минаева О.А., Сподобаев М.Ю., Трофимов А.П. Юдин В.В. ПАК на основе БПЛА для измерений характеристик направленности антенных решеток // Электросвязь. 2018. № 10. С.57-65.
12. Зубков М.П., Мухаметова А.А., Малков О.Б. Автоматизированная система управления процессом измерений характеристик антенн // Материалы X Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов, работников образования и промышленности. Информационные технологии и автоматизация управления. Омск. Омский государственный технический университет. 2019. С.114-122.
13. Герасимов П.К., Егоров Д.А. Аспекты безопасности управления автономными беспилотными летательными аппаратами в городской среде // Материалы Международной научно-технической конференции INTERMATIC-2014. Ч.5. М. МИРЭА. С.130-132.
14. Улыбин П.В., Белош В.В. Гиростабилизированная платформа для беспилотного летательного аппарата // Материалы конференции VIII Всероссийской конференции (с международным участием) «Теория и практика системной динамики». Кольский научный центр Российской академии наук. Апатиты. 2019. С.154-158.
15. Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Максимов В.М., Пономарев Л.И. Устройства СВЧ и антенны / Под ред. Д.И. Воскресенского. Изд. 2-е, перераб и доп. М. Радиотехника. 2006. 376 с.
16. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. 2-е изд., перераб. и доп. Пер. с англ. М. Издательский дом «Вильямс». 2003. 1104 с.
17. Хансен Р.С. Фазированные антенные решетки. 2-е изд. М. Техносфера. 2012. 560 с.
18. Танченко А.П., Федюлин А.М., Бикмаев Р.Р., Садеков Р.Н. Алгоритм автономной коррекции навигационной системы беспилотного летательного аппарата на основе распо-

- знавания дорожной и речной сети // Гироскопия и навигация. Т. 28. 2020. №3 (110). С.32-42.
19. Падерин Ф.Г. Комплексная обработка информации в бортовом навигационном комплексе БПЛА с использованием метода навигации и составления карты (SLAM) // Труды МИЭА. Навигация и управление летательными аппаратами. 2017. № 19. С.79-87.
 20. Залесский Б.А., Шувалов В.Б. Навигация БЛА с помощью бортовой видеокамеры: алгоритм и компьютерная модель // Научная визуализация. Т.9. 2017. № 2. С.13-25.
 21. Старовойтов Е.И. Навигационное обеспечение мониторинга подстилающей поверхности БПЛА с пассивным оптическим датчиком // Радиостроение. 2020. №5. С.13-41. DOI: 10.36027/rdeng.0520.0000183.
 22. Макаренко С.И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам. Монография. СПб. Наукоемкие технологии. 2020. 204 с.
 23. Оружие и технологии России: Энциклопедия XXI век. Т.10. Авиационное вооружение и авионика / Под общ. ред. С.Б. Иванова. М.: Оружие и технологии. 2005. 766 с.
 24. White paper on NRA24 millimeter wave radar. <http://en.nanoradar.cn/File/view/id/435.html>
 25. Веденькин Д.А., Латышев В.Е., Седельников Ю.Е. Оценка коэффициентов связи антенн для задач обеспечения ЭМС бортового РЭО перспективных беспилотных авиационных комплексов // «Журнал радиоэлектроники». 2014. № 12. С.1-16. <http://jre.cplire.ru/jre/dec14/3/text.html>.
 26. RIEGL - Unmanned Scanning. <http://www.riegl.com/products/unmanned-scanning/>.
 27. Рудь Е.Л. Импульсные высотомеры на основе твердотельных и полупроводниковых лазеров для контроля окружающей среды и характеристик объектов подстилающей поверхности. Дисс...канд. техн. наук. Казань. 2009. 152 с.
 28. SF30_D (200 m). <https://lightwarelidar.com/collections/frontpage/products/sf-30-d-200-m>.
 29. Старовойтов Е.И. Бортовые лазерные локационные системы космических аппаратов: Учебное пособие. Королев. ОАО «РКК «Энергия». 2015. 160 с.
 30. Катенин В.А., Коровайцева Е.В., Чубыкин А.А. Состояние и перспективы лазерной комической навигационно-связной системы // Метеорологический вестник. 2013. Т.5. № 2 (12). С.1-15.

Advanced Technologies of Fly-by Methods for Radio Engineering Measurements

E.I. Starovoitov^{1,*}, V.I. Russanov¹

[*mail@vega.su](mailto:mail@vega.su)

¹Radio Engineering Corporation "Vega", Moscow, Russia

Keywords: antenna measurement, radiation pattern, electromagnetic environment, unmanned aerial vehicle, fly-by method

Measuring the radiation patterns of antenna devices and assessing the electromagnetic environment formed by a set of closely spaced radio transmitting objects are common tasks in the practice of radio engineering measurements. Technogenic electromagnetic fields of various frequencies can have a negative impact on human health, the natural environment, and can also cause failures in electronic control systems for transport, industrial facilities, etc. Currently, an urgent task is to find the possibilities of measuring the actual radiation patterns of antenna devices, taking into account side lobes in hard-to-reach sectors of space where it is impossible to use existing tools. New means should allow obtaining a picture of the distribution of electromagnetic fields in a short time, in conditions of strong interference and radiation power, which can be dangerous for personnel and disrupt the operation of radio control and data transmission systems. To date, the flight method of measurements using unmanned aerial vehicles provides ample opportunities, but it has a number of serious drawbacks. In particular, there are difficulties for its application in conditions of dense building within the city or industrial zone. As a result of the analysis of known technical solutions, the authors formulated the requirements for a promising system of flight measurements, which can be used both for studying large-aperture antennas and for analyzing the electromagnetic environment in dense urban or industrial buildings. It is shown that for autonomous control of UAV motion and binding of measurement results, it is possible to use laser-optical equipment that meets the requirements for measurement range, weight and dimensions. Based on data from existing analogues, the approximate composition of onboard measuring equipment and navigation sensors for aircraft-type UAVs and multicopters is determined. The operation of the proposed system does not require data from satellite navigation systems and radio links, through which information is exchanged with the ground control point. An algorithm for studying the antenna using the proposed advanced system of flight measurements is presented.

References

1. Ageeva A.A. Investigation of the electromagnetic environment from passed object in Vladivostok with the use of gis systems. *Izvestiya SFEDU. Engineering Sciences*, 2011, no. 9 (122), pp. 244-246.
2. Statsenko L.G., Ageeva A.A. Electromagnetic environment in the formation of urban development. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2018, no 4 (37), pp.119-127.
3. Moiseenko O.A., Chernetskaya L.A., Kas'yanova O.V., Denisov D.N. Electromagnetic environment in the locations of mobile radio communication objects. *Health. Medical Ecology. Science*, 2010, no 1-2 (41-42), pp.90-91.
4. Strakhov A.F., Bondarenko V.M., Strakhov O.A. Method of measuring the radiation pattern of the receiving antenna. inventor's certificate SU 1778714A1.
5. Popov E.S., Minabudinov K.A. Method of measuring the radiation pattern of a band antenna. Patent SU 1804627 A3.
6. Klassen V.I., Prosvirkin I.A., Levitan B.A., Topchiev S.A. Measurement of radiation characteristics of large antenna using UAVs. *Communication Technologies & Equipment*, 2014, vol. 1, pp.60-65.
7. Klassen V.I., Levitan B.A., Prosvirkin I.A., Topchiev S.A. Method of Antenna directivity Measurement with UAV by test flight Method. Patent RU № 2626561 C1, 2017, bull. no. 22, 9 p.
8. Prosvirkin I.A. Fly-by method for measuring the directivity patterns of large-aperture antennas using an unmanned aerial vehicle and the GLONASS system. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences, Kazan', 2018, 157 p.
9. US Patent № 10067172, 04.09.2018 «Far-field antenna pattern characterization via Drone/UAS platform».
10. Gogoberidze Yu.T., Klassen V.I., Levitan B.A., Litnovskij V.Ya., Prosvirkin I.A., Topchiev S.A. Method for automated orientation of an onboard Antenna of an Unmanned Complex for measuring Antennae directivity parameters. Patent RU 2704393 C1, 2019, bull. no. 31, 9 p.
11. Luchin D.V., Minaeva O.A., Spodobaev M.Yu., Trofimov A.P. Yudin V.V. Drone based Software-Hardware Complex for Antenna Array radiation pattern Measurement *Telecommunications and Radio Engineering*, 2018, no. 10, pp.57-65.
12. Zubkov M.P., Mukhametova A.A., Malkov O.B. Automated measurement process control System Antenna characteristics. Proc. of the X-th All-Russian Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates, Educators and Industry Workers. *Information technology and control automation*. Omsk, Omsk State Technical University (OmSTU), 2019, pp.114-122.

13. Gerasimov P.K., Egorov D.A. Aspects of safety in the control of autonomous unmanned aerial vehicles in an urban environment. Proc. of the International Scientific and Technical Conference «INTERMATIC–2014», part. 5, Moscow, MIREA, pp.130-132.
14. Ulybin P.V., Belosh V.V. Gyro-stabilized Platform for a Unlimited aircraft. Proc. of the VIII-th All-Russian Scientific Conference (with international participation) «Theory and Practice of System Dynamics», Apatity, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, 2019, pp.154-158.
15. Voskresenskii D.I., Gostyukhin V.L., Maksimov V.M., Ponomarev L.I. Ustroistva SVCh i anteny [Microwave devices and antennas]. Ed. D.I. Voskresenskii, 2-th ed. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2006, 376 p.
16. Sklar B. Digital Communications. Fundamental and Applications. Prentice Hall PTR, 2 edition, 2001, 1079 p.
17. Hansen R.C. Phased Array Antennas, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2009, 571 p.
18. Tanchenko A.P., Fedulin A.M., Bikmaev R.R., Sadekov R.N. UAV Navigation System Autonomous Correction Algorithm Based on Road and River Network Recognition. Gyroscopy and Navigation, 2020, vol. 28, no. 3 (110), pp. 32-42.
19. Paderin F.G. Kompleksnaya obrabotka informatsii v bortovom navigatsionnom komplekse BPLA s ispol'zovaniem metoda navigatsii i sostavleniya karty (SLAM) [Integrated Data processing in UAV onboard navigation system based on simultaneous localization and mapping (SLAM) method]. Trudy MIEA. Navigatsiya i upravlenie letatel'nymi apparatami, 2017, no. 19, pp.79-87.
20. Zalesky B.A., Shuvalov V.B. Autonomous Navigation of drone by onboard Video Camera: Algorithm and Computer Modeling. Scientific Visualization, vol. 9, 2017, no 2, pp.13-25.
21. Starovoytov E.I. Navigation support for monitoring the underlying surface from UAV with a passive optical sensor. Radio Engineering, 2020, no. 5, pp.13-41. DOI: [10.36027/rdeng.0520.0000183](https://doi.org/10.36027/rdeng.0520.0000183)
22. Makarenko S.I. Counter Unmanned Aerial Vehicles. Monograph. Saint Petersburg, High Tech Publishing House, 2020, 204 p.
23. Russia's Arms and Technologies: The XXI Century Encyclopedia. Vol. 10. Aircraft Armament and Avionics. Ed. S.B. Ivanov, Moscow, Publ. House. "Arm and Technologies" 2005. 766 c.
24. White paper on NRA24 millimeter wave radar. <http://en.nanoradar.cn/File/view/id/435.html>.
25. Vedenkin D.A., Latyshev V.E., Sedelnikov Yu.E. Estimation of Antenna Coupling Coefficients for the Problems of Providing EMC of Board REE of Advanced Unmanned Aircraft Systems. Journal of Radio Electronics, 2014, no. 12, pp.1-16. <http://jre.eplire.ru/jre/dec14/3/text.html>
26. RIEGL - Unmanned Scanning. <http://www.riegl.com/products/unmanned-scanning/>

27. Rud' E.L. Pulse altimeters based on solid-state and semiconductor lasers for monitoring the environment and characteristics of underlying surface objects. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences, Kazan', 2009, 152 p.
28. SF30_D (200 m). <https://lightwarelidar.com/collections/frontpage/products/sf-30-d-200-m>.
29. Starovoitov E.I. Bortovye lazernye lokatsionnye sistemy kosmicheskikh apparatov. Uchebnoe posobie [The onboard laser radar systems of spacecraft. Text-book]. Korolev, OAO «RKK «Energiya» publ., 2015. 160 p.
30. Katenin V.A., Karavaytseva E.V., Chubykin A.A. Current State and Prospects of the Intersatellite laser Navigation System. The Meteorological Bulletin, 2013, vol.5, no. 2 (12), pp.1-15.