

УДК 623.746.-519:621.67:53.082.7

Навигационное обеспечение БПЛА для выполнения облетных радиотехнических измерений в условиях городской и промышленной застройки

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

* mail@vega.su

¹АО "Концерн "Вега", Москва, Россия

Электромагнитные поля, создаваемые различными радиопередающими объектами могут влиять на здоровье человека, окружающую природную среду и технику, имеющую встроенную электронную систему управления. Электромагнитное загрязнение наблюдается преимущественно в городах и в промышленных зонах. Для оценки имеющейся электромагнитной обстановки может быть использован облетный метод измерений с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) типа мультикоптер, обеспечивающий высокую информативность и малую погрешность получаемых результатов. При этом, в условиях плотной городской и промышленной застройки необходимо обеспечить автономную навигацию БПЛА, при снижении точности спутниковых навигационных систем, а также выполнение требований безопасности в ходе совершения полетов. Полученные результаты показывают, что при осуществлении антенных измерений на малых дальностях целесообразно применение бортовых оптических датчиков, дополняющих данные от спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС и GPS.

Ключевые слова: антенные измерения; облетный метод; беспилотный летательный аппарат; городская застройка; навигация

Введение

Техногенные электромагнитные поля (ЭМП) различных частот оказывают влияние на здоровье человека и окружающую природную среду. Невыполнение требований электромагнитной совместимости при размещении передающих радиотехнических объектов (ПРТО) рядом с техническими объектами может приводить к сбоям в их электронных системах управления.

Исследования техногенных ЭМП выполняются в основном на городских территориях, так как явление электромагнитного загрязнения наблюдается в основном в мегаполисах. Это обусловлено ростом числа излучающих средств из-за освоения и более плотного заполнения частотных диапазонов, увеличения числа каналов радио- и телевизионного вещания и других служб.

Предельно допустимые уровни электромагнитного излучения, воздействующего на рабочий персонал и людей, профессионально не связанных с эксплуатацией и обслуживанием аппаратуры, установлены действующими нормативными документами. При вводе в эксплуатацию ПРТО для защиты населения от воздействия ЭМП устанавливаются защитные зоны и зоны ограничений.

Актуальным является разработка средств измерений, предназначенных для условий плотной городской и промышленной застройки. Для их применения также потребуются навигационные датчики, позволяющие определять взаимное положение ПРТО и измерительных антенн.

Цель данной работы состоит в оценке возможностей бортовых навигационных датчиков, используемых при выполнении облетных радиотехнических измерений в условиях плотной городской и промышленной застройки.

1. Методы измерений электромагнитных полей

Совокупность электромагнитных явлений, существующих в данном месте, зависящая от времени, для описания которой может потребоваться статистический подход, согласно ГОСТ 30372-2017 (IEC 60050-161:1990) определяется как электромагнитная обстановка (ЭМО).

Изучение ЭМО является обязательным 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).

Ситуация дополнительно усложняется неоднородностью ЭМП в трехмерном пространстве, а также их изменчивостью во времени. Это затрудняет формирование адекватной картины ЭМО вокруг интересующих объектов.

При прогнозировании путем аналитических расчетов и моделирования электромагнитных полей на ЭВМ упрощается задача и объект исследования. При полном и достоверном описании объекта исследования расхождение результатов моделирования и экспериментальных данных не превышает 15 % [1].

В условиях города возможно несовпадение результатов натуральных наблюдений и расчетного прогнозирования ЭМП, выполненного с помощью программных комплексов анализа ЭМО, что обусловлено сложностью рельефа застройки, влиянием метеорологических условий, реальными параметрами абонентской аппаратуры [2,3].

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

При измерении электромагнитных полей портативными переносными приборами, допустимая относительная погрешность составляет до 30 % [4].

Исследование характеристик антенн с помощью пилотируемых летательных аппаратов (ЛА) и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) представляет собой облетный метод измерений. Как правило, пилотируемый ЛА или БПЛА с измерительной аппаратурой на борту совершает круговой облет исследуемой антенны, поддерживая неизменный радиус и постоянную на каждом проходе высоту.

Облетный метод на практике является единственно возможным путем выполнения исследования крупноапертурных наземных антенн с учетом влияния рельефа окружающего пространства, характеристик почвы и местных предметов. Существуют варианты реализации облетного метода при которых пилотируемый ЛА выполняет высотные и скользящие маневры относительно исследуемой антенны [5].

Сравнительные характеристики различных методов оценки ЭМО, формируемой ПРТО, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнительные характеристики различных методов оценки ЭМО, формируемой ПРТО

Характеристики метода	Численное моделирование	Измерение портативными переносными приборами	Облетный, пилотируемый ЛА	Облетный, БПЛА
Информативность	Высокая*	Низкая	Средняя	Высокая
Погрешность измерений [1,4,6,7]	15 %	30 %	18,9...33,3 %	9,6 %
Область применения	Практически не ограничена, необходимы подробные исходные данные об окружающей среде (рельеф, материалы)	В основном на открытых площадях и внутри помещений, где возможен доступ для оператора	Крупноапертурные антенны, расположенные в малонаселенной местности с несложным рельефом	Различные антенные сооружения, в том числе расположенные в жилом секторе, возможно применение в сооружениях с большим внутренним объемом
Необходимые ресурсы	Персональная ЭВМ со специальным ПО, вся необходимая информация об объекте установки, внешней среде (чертежи, планы, карты, аэрофотоснимки и космические снимки)	Подготовленный и допущенный к выполнению таких работ персонал, аттестованные и поверенные измерительные приборы, транспорт	Пилотируемый ЛА, подготовленный экипаж, бортовые средства измерений**, расположенный поблизости аэродром базирования, разрешение на выполнение полетов, покрытие зоны облета спутниковыми навигационными системами	БПЛА, наземный пункт управления, средства обеспечения, подготовленный расчет, бортовые средства измерений**, расположенная поблизости площадка для взлета и посадки, разрешение на выполнение полетов, покрытие зоны облета спутниковыми навигационными системами
Относительные затраты	0,05	0,10	1,00	0,72
Трудоемкость	Низкая	Средняя	Высокая	Средняя
Безопасность	Высокая, полностью исключается нахождение персонала в зоне действия ПРТО	Средняя, персонал должен находиться в зоне действия ПРТО и при необходимости использовать индивидуальные средства защиты	Низкая, на борту пилотируемого ЛА должны находиться минимум один летчик и два инженера [6], в зоне облета также могут быть люди	Средняя, если при аварии БПЛА не создается угрозы жизни и здоровью людей
* При условии корректно заданных исходных данных, что возможно проверить только после выполнения натуральных измерений ** Проверка и аттестация бортовых средств измерений, установленных на пилотируемых ЛА и БПЛА осуществляются по специально разработанным методикам				

Стоимость измерений ЭМП различными методами определялась на основе сравнительной оценки экономической эффективности использования БПЛА и пилотируемых ЛА для аэрофотосъемки [8]. При этом, относительные затраты на измерения облетным методом с помощью пилотируемого ЛА были приняты равными единице.

Облетный метод измерений имеет преимущества за счет высокой информативности и малой погрешности получаемых результатов. Его использование в условиях плотной застройки принципиально возможно при автономной навигации БПЛА при снижении точности спутниковых навигационных систем, уменьшении затрат и повышении безопасности.

Перспективные системы и комплексы измерений, реализующие облетный метод с использованием БПЛА, должны решать следующие задачи:

1. Оценка ЭМО в труднодоступных секторах пространства, где не применимы другие средства измерений (вышки, наземные мобильные измерительные пункты) за короткий срок;
2. Оценка ЭМО в сложной помеховой обстановке, при возрастании погрешностей определения координат бортовой аппаратурой спутниковой навигации (АСН).

2. Обеспечение безопасности при выполнении облетных измерений

Для использования в черте города или промышленной зоны наибольшие преимущества имеют БПЛА типа мультикоптер, не требующие взлетно-посадочной полосы, способные зависать в одной точке и выполнять маневр по вертикали. Особенностью эксплуатации в этих условиях являются повышенные требования к безопасности полетов.

Наиболее частыми причинами летных происшествий с БПЛА являются [9]:

- 1) Отказ маршевого двигателя или его систем;
- 2) Отказ элементов системы управления (ЭВМ, высотомер и др.);
- 3) Превышение установленных ограничений для данного типа БПЛА;
- 4) Непредусмотренное сочетание нескольких эксплуатационных факторов, влияющих на летные характеристики;
- 5) Небезопасные маневры на малой высоте без учета рельефа местности и наличия искусственных сооружений.

Аварийные ситуации могут возникать как при дистанционном, так и автоматическом управлении полетом БПЛА. При дистанционном управлении одной из основных причин летных происшествий являются ошибки человека-оператора. При полностью автоматическом управлении БПЛА обеспечение безопасности является функцией бортового программного обеспечения [10].

Анализ причин летных происшествий показывает, что доля потерь, вызванных ухудшением устойчивости и управляемости БПЛА, составляет 20...25 % [11], а 35...41 % возникающих отказов связаны с бортовым комплексом управления [12].

Отсюда следует, что основные причины летных происшествий заключаются в потере управления, в том числе из-за повреждений планера, которые в свою очередь могут быть вызваны столкновением с препятствиями или жесткой посадкой.

Система управления БПЛА должна обеспечивать безопасное завершение полета в случае отказов и наступления внештатных ситуаций [10].

Отказ бортового оборудования БПЛА подразумевает выход из строя бортовой ЭВМ (полетного контроллера), контроллеров двигателей, самих двигателей. Система управления должна отслеживать их состояние и подсчитывать время наработки на отказ, сигнализируя об исчерпании ресурса оборудования, после которого эксплуатация БПЛА приостанавливается. При наступлении в полете непрогнозируемого отказа должно обеспечиваться автономное срабатывание воздушных подушек и парашюта.

Выработка заряда аккумуляторной батареи приводит к обесточиванию электродвигателей и полетного контроллера, что неминуемо приводит к неуправляемому падению БПЛА. Поэтому в бортовом программном обеспечении должно быть предусмотрено аварийное завершение полетного задания при недостаточном уровне заряда аккумуляторной батареи. Также может быть предусмотрена функция блокировки полетного задания на дальность, недостижимую при текущем уровне заряда аккумуляторной батареи.

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 датчиков и могут представлять серьезную проблему для БПЛА.

Повышение безопасности полетов может быть достигнуто реализацией следующих мер [10]:

1. Защитой винтов для исключения контакта с ними;
2. Применением защитных воздушных подушек и парашютов, срабатывающих в случае неконтролируемого падения;
3. Установкой источника резервного электропитания оборудования, обеспечивающего безопасность полета;
4. Ограничением высоты полета не менее 100 м, за исключением выполнения полетного задания;
5. Ограничением скорости полета до 20...30 км/ч при полете над поверхностью земли.

3. Оценка влияния погрешности навигации при облетных измерениях в условиях плотной застройки

В условиях плотной городской и промышленной застройки основной задачей облетных измерений становится оценка уровней ЭМП, способных оказать вредное воздействие на находящихся там людей и нарушать функционирование технических систем.

Навигационные датчики позволяют привязать результаты измерений к координатам точек измерений. В свою очередь полученные данные могут быть экстраполированы на области, недоступные для облетных измерений.

В качестве примера далее рассмотрим часто встречающуюся на практике задачу оценки ЭМО вокруг БС сотовой связи, расположенной среди жилых зданий [13].

Напряженность ЭМП вблизи БС вычисляется по выражению

$$E = \sqrt{30 \cdot P \cdot G \cdot \eta} \times \frac{k_{\phi} \cdot F(\alpha) \cdot F(\varphi)}{R} \left[\frac{\text{В}}{\text{м}} \right], \quad (1)$$

где P – мощность на входе антенно-фидерного тракта; G – коэффициент усиления исследуемой антенны; η – КПД антенно-фидерного тракта; $k_{\phi} = 1,15 \dots 1,3$ – коэффициент, учитывающий двухлучевую модель распространения; $F(\alpha)$ – нормированная диаграмма направленности антенны в угломестной плоскости; $F(\varphi)$ – нормированная диаграмма направленности антенны в азимутальной плоскости; R – дальность до измерительной антенны.

Для оценки влияния ЭМП на человека и окружающую среду расчеты и измерения выполняются в дальней зоне антенны, расстояние до которой должно удовлетворять условию

$$R \geq \frac{2D_A^2}{\lambda} [\text{м}], \quad (2)$$

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

Плотность потока энергии в дальней зоне определяется с использованием соотношения

$$P = \frac{E^2}{3,77} \left[\frac{\text{мкВт}}{\text{см}^2} \right]. \quad (3)$$

В дальней зоне функции $F(\alpha)$ и $F(\varphi)$ должны соответствовать паспортной диаграмме направленности исследуемой антенны, которая обычно представляется в графическом виде. На практике значения диаграммы направленности в произвольной точке определяются методами интерполяции. Для достоверного прогноза значений ЭМП в точках, где невозможны измерения, необходимо знание реальных значений $F(\alpha)$ и $F(\varphi)$.

Реализация облетного метода характеризуется облетной сеткой, которая представляет собой геометрическое место точек на траектории полета. Измерения производятся в узлах облетной сетки через равные интервалы времени. Во время облета обычно предполагается построчный способ перемещения БПЛА в границах облетной сетки.

В зависимости от постановки задачи измерений диаграммы направленности могут быть реализованы два типа облетной сетки [7]:

1. Лежащей на поверхности верхней полусферы для измерения полной диаграммы направленности исследуемой антенны;

2. В виде сектора, ограниченного по азимуту и углу места, в котором измеряют главный и несколько боковых лепестков диаграммы направленности исследуемой антенны.

При облете верхней полусферы над исследуемой антенной шаг измерений по азимуту определяется выражением

$$\Delta\varphi = \frac{360 \cdot v}{2\pi \cdot R \cdot f_n} [\text{град}], \quad (4)$$

где v – скорость БПЛА; f_n – частота обновления навигационных данных.

Полное измерение диаграммы направленности в верхней полусфере может быть выполнено за время

$$t = \frac{\sum_{n=1}^n 2\pi \cdot R \cdot \cos\alpha_n}{v} [\text{с}], \quad (5)$$

где α_n – угол места n -й траектории, равный

$$\alpha_n = \alpha_{n-1} + \Delta\alpha [\text{рад}], \quad (6)$$

где $\Delta\alpha$ – шаг измерений по углу места.

В случае, если время для измерений полной диаграммы ограничено длительностью нахождения БПЛА в воздухе, то увеличение радиуса облета возможно с одновременным возрастанием $\Delta\beta$. «Прореживание» облетной сетки затрудняет процесс восстановления диаграммы направленности исследуемой антенны.

Навигация мультикоптеров осуществляется в основном с помощью АСН, использующей данные от глобальных спутниковых навигационных системы ГЛОНАСС, GPS и др. Погрешность определения координат составляет $\pm 1,0...1,5$ м. АСН может работать в режиме дифференциальных поправок при наличии контрольно-корректирующей станции, что позволяет снизить погрешность определения координат на порядок и более, до $\pm 2,0$ см [7].

В случае сильных помех использование АСН не всегда возможно, кроме того проблемой является переотражение сигналов и экранирование созвездия навигационных спутников зданиями и сооружениями. Ухудшение условий приема сигнала от навигационных спутников приводит к росту погрешности определения координат в разы.

Погрешность при определении координат БПЛА должна быть меньше шага измерений, в противном случае происходит искажение диаграммы направленности исследуемой антенны. В результате «прореживания» облетной сетки и влияния погрешности при определении азимутального угла на восстановленной диаграмме направленности может произойти смещение, «размытие» главного лепестка и его слияние с соседними боковыми лепестками.

На рис. 1 представлена нормированная диаграмма направленности узконаправленной антенны с шириной главного лепестка $2,3^\circ$ по уровню -3 дБ и результат ее восстанов-

ления по «прореженным» измерениям, выполненным с погрешностью определения азимутального угла $\pm 1,1^\circ$.

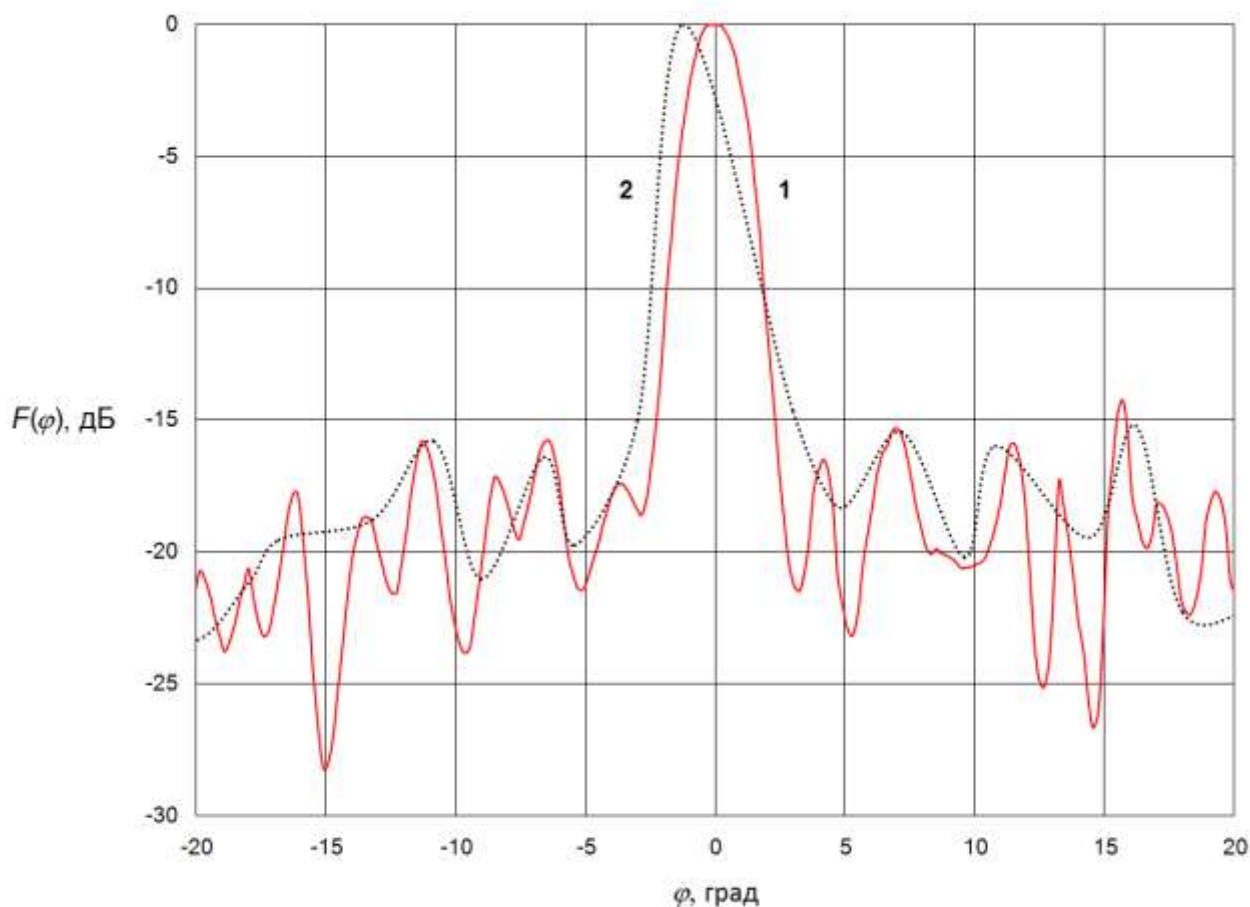


Рис. 1. Нормированная диаграмма направленности узконаправленной антенны: 1 – исходная диаграмма направленности; 2 – диаграмма направленности, восстановленная по результатам измерений

На погрешность измерений также оказывает влияние погрешность оценки дальности до исследуемой антенны.

Ослабление при распространении радиосигнала составляет

$$L_0 = 20 \log \left(\frac{4\pi \cdot R}{\lambda} \right) [\text{дБ}], \quad (7)$$

R – дальность между передатчиком и приемником; λ – длина волны излучения.

Выражение (7) можно представить в виде

$$L_0 = 32,44 + 20 \log f + 20 \log R [\text{дБ}], \quad (8)$$

где f – рабочая частота.

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

$$\Delta L_0 = 20 \log \left(\frac{R + \Delta R}{R} \right) [\text{дБ}], \quad (9)$$

Соответственно

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

Для снижения влияния помех и компенсации большой погрешности АСН на малых расстояниях до исследуемой антенны могут быть использованы оптические датчики. В рассматриваемом случае для измерения дальности можно использовать стереоскопический и угломерный методы измерений.

Стереоскопический метод может быть реализован, когда конструкция мультикоптера обеспечивает достаточную жесткость для размещения базы стереосистемы.

Если погрешность измерения линейного параллакса определяется разрешением многоэлементного (матричного) фотоприемника, то максимальная дальность измерений стереосистемы определяется выражением

$$R = \frac{b \cdot F}{\Delta \Omega_{\min}} [\text{м}], \quad (11)$$

где b – базовое расстояние между объективами; F – фокусное расстояние объектива; $\Delta \Omega_{\min}$ – минимальное разрешаемое смещение изображений объекта (параллакс) в поле зрения системы.

Из выражения (5) следует, что погрешность измерения дальности стереоскопическим методом включает в себя две основные составляющие

$$\Delta R = \Delta R_b + \Delta R_\omega [\text{м}], \quad (12)$$

$$\Delta R_b = \frac{F \cdot (b + \Delta b)}{\Delta \Omega} - R [\text{м}], \quad (13)$$

$$\Delta R_\omega = R - \frac{b \cdot F}{\Delta \Omega + \frac{\Delta \omega}{2}} [\text{м}], \quad (14)$$

$$\Delta \omega = \frac{\omega}{2n} [\text{рад}], \quad (15)$$

где Δb – погрешность определения длины базового расстояния между объективами; ω – поле зрения объектива; n – количество элементов изображения (пикселей) в строке или в столбце многоэлементного фотоприемника.

Самым простым для технической реализации является угломерный метод измерения дальности до объекта с известными линейными размерами.

При визировании монокулярной телекамерой видимый угловой размер объекта равен

$$\Omega = \arctan\left(\frac{l}{R}\right) [\text{рад}], \quad (16)$$

где l – линейный размер объекта в плоскости, перпендикулярной линии визирования.

Отсюда при известных линейных размерах объекта дальность до него оценивается как

$$R = \frac{l}{\tan(\Omega)} [\text{м}]. \quad (17)$$

Погрешность измерений дальности угломерным методом связана с ошибкой измерения размеров объекта (Δl) и угловым разрешением телекамеры ($\Delta \omega$)

$$\Delta R = \frac{l + \Delta l}{\tan(\Omega)} - \frac{l}{\tan(\Omega + \Delta \omega)} [\text{м}]. \quad (18)$$

Для оценки примем следующие исходные данные: $b = 0,5$ м; $\Delta b = 5$ мм; $F = 80$ мм; $\Delta \omega = 1,36 \cdot 10^{-4}$ рад; $l = 1$ м; $\Delta l = 2$ см. Рис. 2 иллюстрирует влияние на величину ΔL_0 погрешностей измерений, выполненных угломерным и стереоскопическим методами в диапазоне дальностей 10...160 м.

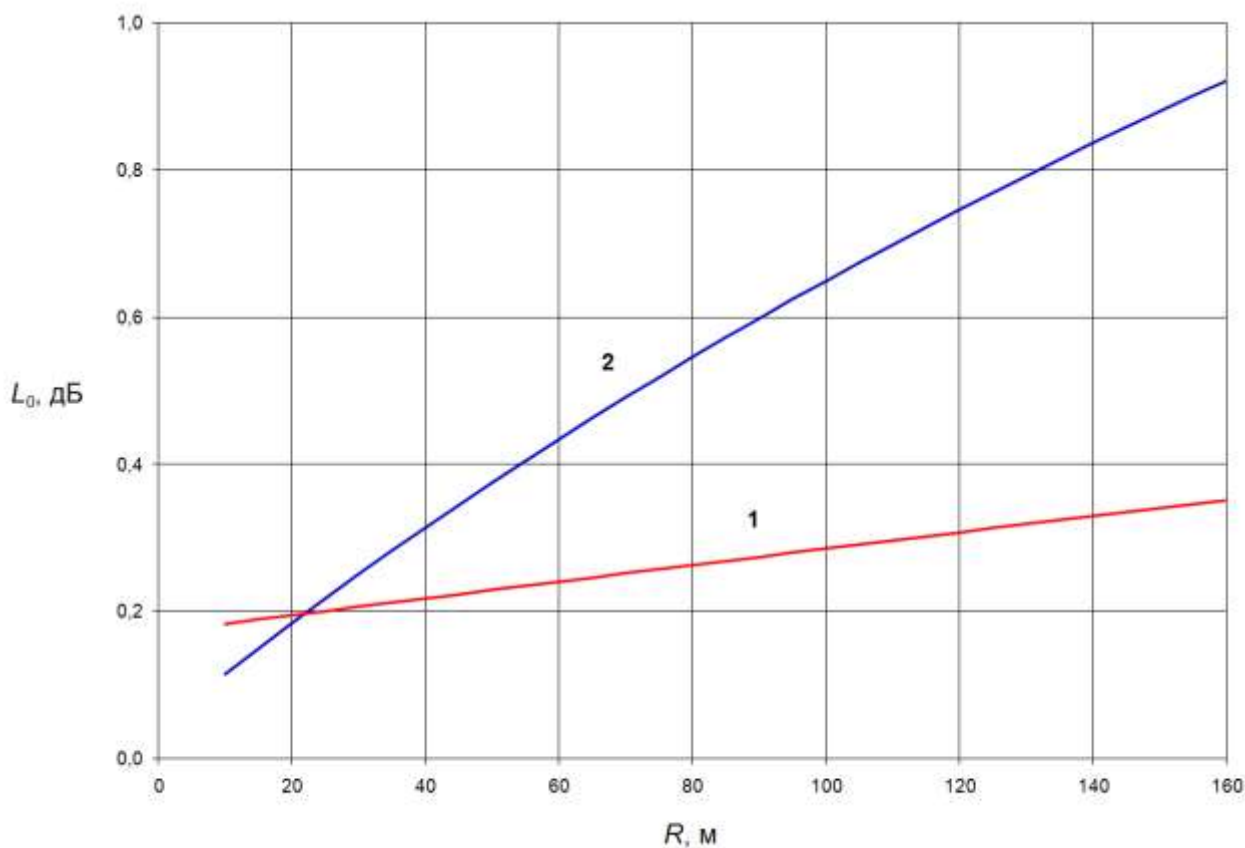


Рис. 2. Зависимость величины ΔL_0 от погрешности измерения дальности оптическим датчиком:
1 – угломерный метод измерений; 2 – стереоскопический метод измерений

Из рисунка видно, что на дальностях менее 25 м стереоскопический метод обеспечивает лучшую точность измерений. Рост погрешности с увеличением расстояния до исследуемой антенны уже не имеет принципиального значения, так как там уже могут быть использованы данные АСН.

На рис. 3 показана аналогичная кривая, соответствующая использованию стереоскопической системы на расстоянии до 35 м, и АСН на больших дальностях. Допустимое значение погрешности уровня сигнала составляет $\Delta L_0 = 0,3$ дБ [7], погрешность определения координат по данным АСН принята равной 1,2 м.

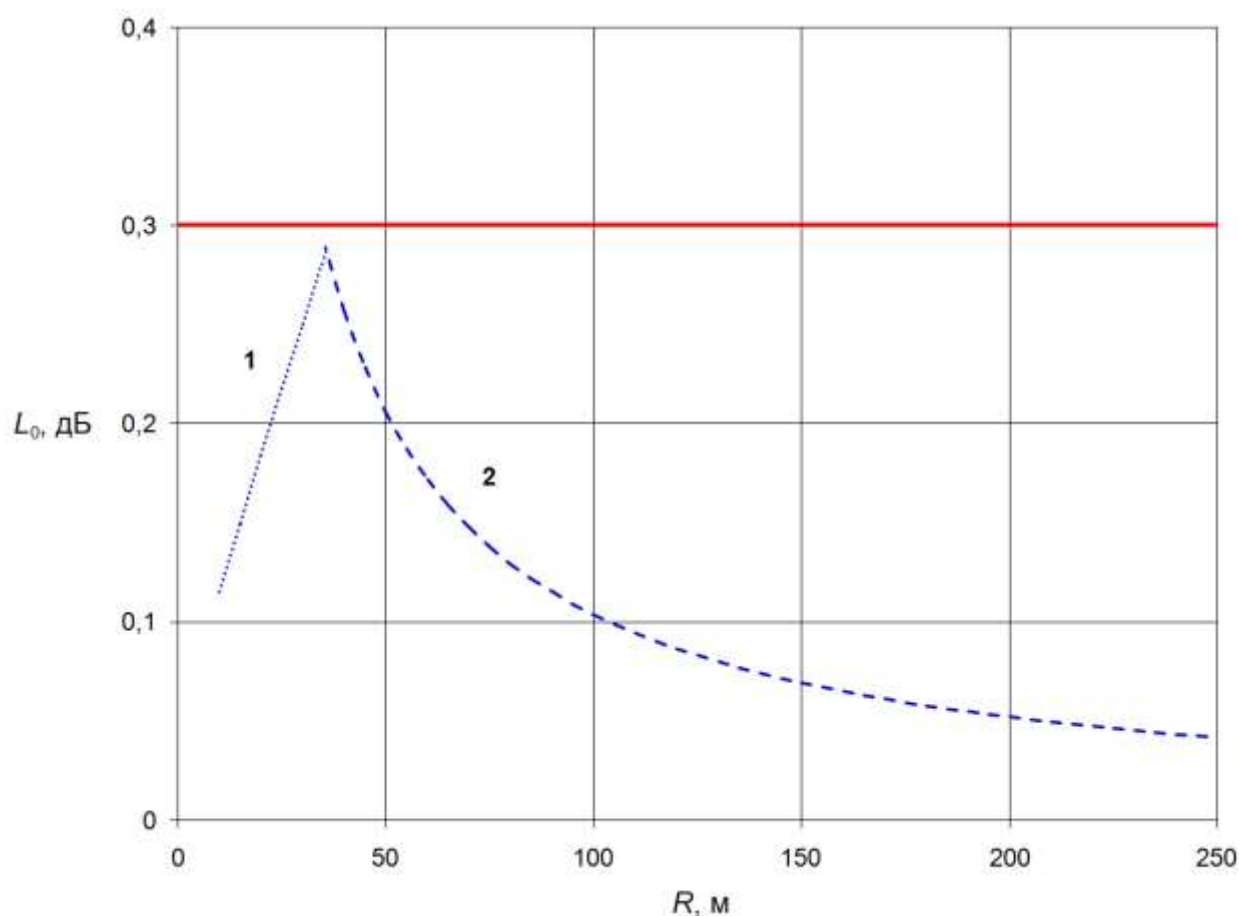


Рис. 3. Зависимость величины ΔL_0 от погрешности измерения дальности стереосистемой и АСН:
1 – стереосистема; 2 – АСН

Результаты показывают целесообразность применения на малых дальностях оптических датчиков для навигации БПЛА относительно исследуемой антенны.

Заключение

В работе проведена оценка возможностей бортовых навигационных датчиков БПЛА, используемых для выполнения облетных измерений ЭМП, создаваемых ПРТО в условиях плотной городской и промышленной застройки.

Анализ существующих в настоящее время методов измерения ЭМП, показывает, что облетный метод измерений имеет преимущества за счет высокой информативности и малой погрешности получаемых результатов. Он может быть использован в городах и промышленных зонах с помощью БПЛА, способных к автономной навигации, при ухудшении

данных, получаемых от спутниковых навигационных систем, и выполнении ряда организационно-технических мер, направленных на безопасность полетов.

Оценка погрешностей, возникающей при исследовании диаграммы направленности ПРТО, показывает, что на расстояниях менее 35 м целесообразно применение оптических датчиков для определения дальности до исследуемой антенны, что позволяет улучшить результаты измерений.

Список литературы

1. Гайнутдинов Р.Р., Чермошенцев С.Ф. Электромагнитная совместимость перспективных авиационных комплексов // Технологии ЭМС. 2018. № 2 (65). С.62-78.
2. 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.
3. Стаценко Л.Г., Агеева А.А. Электромагнитная обстановка при формировании городской застройки // Вестник инженерной школы ДВФУ. 2018. № 4 (37). С.119-127.
4. Гигиенические требования к размещению и эксплуатации передающих радиотехнических объектов. СанПиН 2.1.8/2.2.4.1383-03. М. Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России. 2003. 22 с.
5. Методы измерения характеристик антенн СВЧ / Л.Н. Захарьев, А.А. Леманский, В.И. Турчин и др. Под ред. Н.М. Цейтлина. М. Радио и связь. 1985. 368 с.
6. Отчет МСЭ-R SM.2056-1 (06/2014). Воздушная проверка направленности антенны радиовещательных станций. Серия SM. Управление использованием спектра. URL: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2056-1-2014-PDF-R.pdf.
7. 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.
8. Никитин В.Н., Раков Д.Н. Оценка экономической эффективности использования беспилотных аэрофотосъемочных комплексов // Вестник сибирской государственной геодезической академии. 2013. № 4 (24). С.48-56.
9. Шibaев В.М., Аполлонов Д.В., Матвеев В.А., Кобцева Т.Л. Формирование сценариев безопасного автономного завершения полета ДПЛА с целью определения критериев сертификации // Труды семинара «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта» (в рамках международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника (ЭР-2015)»). СПб. 2015. С.123-129.
10. Герасимов П.К., Егоров Д.А. Аспекты безопасности управления автономными беспилотными летательными аппаратами в городской среде // Материалы Международной научно-технической конференции INTERMATIC-2014, часть 5. М. МИРЭА. С.130-132.

11. Полтавский А.В., Рякин А.В. Обеспечение безопасности полетов беспилотных летательных аппаратов. Научный вестник МГТУ ГА. Сер. Аэромеханика и прочность. 2007. № 119. С.152-157.
12. Агеев А.М., Попов А.С. Требования к надежности бортовых комплексов управления беспилотных летательных аппаратов различного класса // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2018. № 7. С. 95-101.
13. Звездина М.Ю., Шоков А.В., Шокова Ю.А., Лебедев А.Р. Оценка электромагнитной обстановки на крыше жилого здания в присутствии антенны сотовой связи // Вестник Донского государственного технического университета. 2015. № 3(82). С.102-110.

Navigation Support of UAVs for Performing Fly-by Radio Measurements in Urban and Industrial Development

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

* mail@vega.su

¹Radio Engineering Corporation "Vega", Moscow, Russia

Keywords: measurement; fly-by method; unmanned aerial vehicle; urban development; navigation

Electromagnetic fields created by various radio transmitting objects can affect human health, the natural environment and equipment that has a built-in electronic control system. Electromagnetic pollution occurs mainly in cities and industrial areas. To assess the existing electromagnetic environment, a flyby method of measurements using unmanned aerial vehicles (UAVs) of the multicopter type can be used, which provides high information content and a small error in the results obtained. At the same time, in conditions of dense urban and industrial development, it is necessary to ensure autonomous UAV navigation, while reducing the accuracy of satellite navigation systems, as well as meeting safety requirements during flights. The results obtained show that when performing antenna measurements at short ranges, it is advisable to use onboard optical sensors that supplement the data from the GLONASS and GPS satellite navigation systems.

References

1. Gaynutdinov R.R., Chermoshentsev S.F. Electromagnetic compatibility of perspective aviation complexes. *Technologies of electromagnetic compatibility*, 2014, no. 3, pp.45-59.
2. 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.
3. 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.
4. Hygienic requirements for the placement and operation of transmitting radio engineering object. SanPin 2.1.8/2.2.4.1383-03. Moscow, Federal Center of State Sanitary and Epidemiological Supervision of the Ministry of Health of the Russian Federation, 2003, 22 p.
5. L.N. Zakhar'ev, A.A. Lemanskii, V.I. Turchin et al. Methods for measuring the characteristics of microwave antennas. Ed. N.M. Tseitlin. Moscow, *Radio i svyaz'*, 1985, 368 p.

6. Report ITU-R SM.2056-1 (06/2014). Airborne verification of antenna patterns of broadcasting stations. SM Series. Spectrum management. URL: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2056-1-2014-PDF-E.pdf.
7. 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.
8. Nikitin V.N., Rakov D.N. Unmanned Aerial Photography Complexes Application: Cost-effectiveness Assessment. Siberian State Academy of Geodesy Bulletin, 2013, no. 4 (24), pp.48-56.
9. Shibaev V.M., Apollonov D.V., Matveev V.A., Kobtseva T.L. Formation of scenarios for the safe autonomous completion of the UAV flight in order to determine the certification criteria. Proc. of «Unmanned vehicles with artificial intelligence elements» (within the framework of International Scientific and Technological Conference «Extreme Robotics (ER-2015)»), Sankt-Peterburg, 2015, pp.123-129.
10. 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.
11. Poltavskiy A.V., Ryakin A.V. Providing then Safety of Air Flights of Aircraft. Civil Aviation Nigh Technologies, ser. Aeromechanics and Durability, 2007, no. 119. pp.152-157.
12. Ageev A.M., Popov A.S. The reliability Requirements for onboard Control Complexes of different classes Unmanned Aerial Vehicles. Aerospace forces. Theory and practice, 2018, no. 7, pp.95-101.
13. Zvezdina M.Yu., Shokov A.V., Shokova Y.A., Lebedev A.R. Electromagnetic radiation security estimation on the residential building roof for cellular antenna. DSTU Bulletin, 2015, no. 3(82), pp.102-110.