

**МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ БЕЗОПАСНОСТЬ
ПОЛЕТОВ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

А.П. Елохин

elokhin@yandex.ru

Н.А. Грицкевич

komu116@gmail.com

А.А. Василенко

**Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(Московский инженерно-физический институт), Москва, Российская Федерация****Аннотация**

Рассмотрен метод решения задач, обеспечивающих безопасность полета беспилотных летательных аппаратов, несущих на себе приборный комплекс для научных исследований. В целях предотвращения столкновений носителей на каждый беспилотный летательный аппарат установлены излучатель электромагнитного поля с диаграммой направленности в 4л и детектор для его обнаружения. Такое оборудование наряду со специальным программным обеспечением позволит предотвратить подобную аварийную ситуацию

Ключевые слова

Беспилотный летательный аппарат, излучатель электромагнитного поля, диаграмма направленности излучения, детектор электромагнитного поля, индуктивность, емкость, колебательный контур, резонансная частота

Поступила в редакцию 11.12.2017
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

При анализе вопроса радиационного контроля окружающей среды с помощью пилотируемой авиационной техники изучалась возможность применения ее как динамической системы радиационного мониторинга при различных состояниях устойчивости атмосферы [1].

В работе [1] на примере распространения в атмосфере радиоактивного облака, возникающего в результате радиационной аварии на объектах использования атомной энергии (ОИАЭ), включая АЭС, показано, что подобные системы слишком дорогостоящие и малоэффективные даже по сравнению со стационарными автоматизированными системами радиационного контроля окружающей среды (АСКРО) [2]. Их альтернативой могут являться системы, использующие более дешевую авиационную технику, оснащенную дистанционно-управляемыми беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) [3–6] с метео- или экодатчиками, которые можно использовать в качестве зондов, непосредственно направляя их в радиоактивное или химическое облако, для определения соответствующих характеристик.

Таким образом, подобные задачи целесообразно решать с помощью совокупности управляемых малых летательных аппаратов (радиоуправляемых моделей), несущих на себе облегченный комплекс дозиметрического и спектрометрического оборудования [5, 6]. В качестве малых летательных аппаратов могут выступать радиоуправляемые модели вертолетов, квадрокоптеров или самолетов, способных нести полезную нагрузку массой 0,5...3 кг с продолжительностью полета на

крейсерской скорости (~70 км/ч) не менее получаса. После проведения соответствующих измерений в радиоактивном или химическом из состава аварийно-химически опасных веществ (АХОВ) облаке эти аппараты возвращаются на наземную базу. Обработка данных, полученных малым летательным аппаратом, при соответствующем математическом обеспечении позволит скорректировать радиационные характеристики радиоактивного или химического облака. Преимущества подобных технологий, состоящие в применении малых летальных аппаратов для уточнения характеристик окружающей среды, в том числе и радиационных характеристик радиоактивного облака, возникающего в условиях радиационных аварий на ОИАЭ, включая и АЭС, очевидны и определяются низкой стоимостью БПЛА, мобильностью и возможностью их многоразового использования.

Вместе с тем использование подобной совокупности роботизированных БПЛА ставит ряд задач, требующих обязательного их решения при внедрении в народное хозяйство [4]. К этим задачам относятся следующие.

1. Разработка метода и специальной аппаратуры, исключающей возможность столкновения носителей в воздухе при их движении к намеченной пилотом цели и при решении исследовательских задач.

2. Разработка метода управления совокупностью БПЛА, хаотически распределенных в трехмерном пространстве с выделенным (назначенным) в этой совокупности лидером, обеспечивающим упорядоченное их движение к намеченной пилотом цели для дальнейшего решения исследовательских задач.

Первая задача связана с особенностью перемещения БПЛА в воздухе, например полетом в строе или при создании строя. При этом следует иметь в виду, что полет строем — это не только линейные или образующие плоскость распределения носителей в пространстве, но в том числе, трехмерные распределения носителей. До тех пор пока перемещение носителей в пространстве не является самосогласованным (несамосогласованные структуры — это радиоуправляемые носители, независимые друг от друга), велика вероятность их критического сближения, при котором может возникнуть аварийная ситуация, развитие которой может привести к их столкновению и поломке без возможности восстановления. Поэтому в рамках решения этой задачи должно быть разработано устройство или система оповещения, устанавливаемые на каждом носителе, позволяющие диагностировать расстояния между соседними носителями, фиксировать их сближение на критическое расстояние, определять скорость их относительного движения и осуществлять действия, предотвращающие их дальнейшее сближение. При этих условиях пилотируемая совокупность БПЛА сможет быть упорядочена, движение носителей в ней будет безопасным и в дальнейшем приведет к намеченной пилотом цели для решения исследовательских задач. К сожалению, подобная проблема характерна не только для рассматриваемой в настоящей работе совокупности БПЛА, но и для пилотируемых вертолетов и самолетов разных стран. В работе [4] приведен далеко не полный список авиационных аварий, произошедших в России (СССР) и других стра-

нах, связанных со столкновением вертолетов и самолетов в воздухе, сопровождающихся гибелью их экипажей и пассажиров [7]. Этих аварий можно было избежать, если на пилотируемой авиационной технике было бы установлено устройство для диагностики расстояний между соседними носителями с оповещением пилотов.

К сожалению, этот процесс продолжается, в чем нас убеждает авиакатастрофа двух вертолетов, случившаяся в Аргентине 10.03.2015 г. в результате которой погибло 10 человек, включая трех олимпийских чемпионов Франции.

Вторая задача связана с тем, что первоначально БПЛА могут быть распределены в пространстве хаотически или в лучшем случае их распределение будет являться слабо упорядоченным, а для решения исследовательской задачи их предварительно следует собрать, построить, т. е. упорядочить, и дальше вести для решения исследовательских задач. Не вызывает сомнений, что эта задача должна решаться с помощью одного пилота, а не нескольких, которые могли бы управлять (пилотировать) каждым БПЛА отдельно, что и обуславливает требование компактности упорядоченного движения носителей. Напротив, при полете к цели строй «рассыпается» и каждый БПЛА выполняет свою задачу в соответствии с заданной ему программой.

Физический смысл предлагаемого метода диагностики расстояния между носителями (рис. 1) состоит в следующем. На каждом носителе устанавливается источник излучения и детектор. Этот альянс, выполняющий функцию «сторожа», позволит обнаружить любой соседний носитель, который может приблизиться на критическое расстояние, в результате чего дальнейшее сближение носителей может привести к их столкновению. Роль подобного сторожа могут выполнять следующие приборные комплексы: лазерный дальномер; радар РЛС; оборудование ультразвукового оповещения; источник «И» электромагнитного поля с диаграммой направленности в 4π и детектор «Д» напряженности магнитного поля. Требование излучения в 4π -геометрию обусловлено тем, что столкновение носителей (см. рис. 1) может произойти при любом их расположении, а потому каждый носитель должен «чувствовать» соседа независимо от того, с какой стороны тот находится. Именно эта причина не позволяет воспользоваться дальномером на основе лазера. Радар не пригоден для этой цели из-за ограничения веса оборудования. Шумовые помехи, возникающие при полете БПЛА, накладывают ограничения на использование ультразвуковых датчиков и детекторов. Поэтому для решения рассматриваемой задачи остановимся на источнике «И» и детекторе «Д». При этом детектором регистрируется напряженность магнитного поля как излучаемая источником собственного носителя, например носителя 1, так и напряженность магнитного поля соседнего носителя 2, приближающегося к первому. Если детектор (см. рис. 1, например носитель 1) почувствует возмущение измеряемой им напряженности магнитного поля, то это будет означать, что к нему приближается какой-либо другой носитель (например 2 и/или 3), и он по заранее разработанному алгоритму принимает решение, заложенное в программе, и, действуя в соответствии с ним,

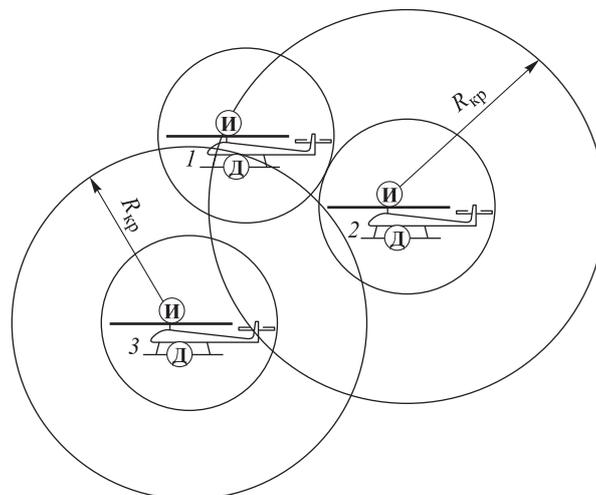


Рис. 1. Принципиальная схема обнаружения соседних носителей БПЛА
($R_{кр}$ — критический радиус сближения БПЛА)

предотвращает дальнейшее сближение летательных аппаратов и возможную аварию при их столкновении. В случае пилотируемой авиационной техники срабатывание детектора будет оповещать пилота об опасном сближении летательных аппаратов.

Таким образом, носитель 1 может почувствовать присутствие носителей 2 и/или 3, если при измерении напряженности магнитного поля, регистрируемой собственным детектором $H_{изм}$, будет выполняться неравенство

$$H_{изм} \geq H_{соб} + H_{кр}, \quad (1)$$

где $H_{соб}$ — значение напряженности магнитного поля собственного излучателя электромагнитного поля носителя 1; $H_{кр}$ — значение напряженности магнитного поля, создаваемого электромагнитным полем соседнего носителя 2 и/или 3, приблизившегося к первому на критическое расстояние $R_{кр}$, соответствующее критической чувствительности детектора по напряженности магнитного поля, величина которого должна составлять не менее двух наибольших длин носителя или диаметров его несущего винта. Из рис. 1 следует, что носитель 1 может чувствовать носители 2 и 3 в силу выполнения условия (1), но носители 2 и 3 не могут чувствовать друг друга, поскольку расстояние между ними может быть больше $R_{кр}$. Излучатель электромагнитного поля и датчики должны быть малогабаритными и небольшой массы. В качестве излучателя может быть использован любой излучатель электромагнитного поля с диаграммой направленности в 4π , излучающий импульсы, модулированные заданной частотой, например элементарный электрический вибратор Герца [8] совместно с импульсным генератором напряжения. При расположении вибратора вертикально магнитное поле излучателя, как показано в [8], будет иметь только одну составляющую H_{ϕ} , а его напряженность определяется формулой [8]:

$$H_{\varphi} = \frac{ikR}{4\pi} \sin \theta \int_{-L/2}^{L/2} I^{\circ}(z') \frac{\exp(-ikR_{p,q})}{R_{p,q}^2} \left(1 + \frac{1}{ikR_{p,q}}\right) dz', \quad (2)$$

где i — мнимая единица; k — коэффициент распространения электромагнитного излучения ($k = 2\pi / \lambda$, волновое число, λ — длина волны); θ — угол между осью вибратора (осью Z) и радиусом R ; $I^{\circ}(z') = I_0^{\circ} L f(z')$ (I_0° — амплитуда тока и $f(z')$ — его линейная плотность распределения); $R_{p,q} = \left[R^2 - 2z(z') + (z')^2 \right]^{1/2}$ ($R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ — расстояние от начала координат до точки наблюдения p , x, y, z — координаты точки наблюдения; z' — координата точки интегрирования q ($0, 0, z'$) области $[-L/2, L/2]$).

Если линейный размер L вибратора устремить к нулю, то он превращается в точечный вибратор, ток которого при $z' \rightarrow 0$ можно представить в виде $I^{\circ}(z) = I_0^{\circ} L \delta(z)$, а напряженность магнитного поля, создаваемого таким вибратором, определится следующим выражением [4]:

$$H_{\varphi} = \frac{ikI_0^{\circ}}{4\pi} \sin \theta \frac{\exp(-ikR)}{R} \left(1 + \frac{1}{ikR}\right) = \frac{I_0^{\circ} L}{4\pi} \sin \theta \left\{ \left[k^2 \frac{\sin kR}{kR} + \frac{\cos kR}{R^2} \right] + i \left[k \frac{\cos kR}{R} - \frac{\sin kR}{R^2} \right] \right\}. \quad (3)$$

Поскольку функции $\sin kR$ и $\cos kR$ при $R \rightarrow \infty$ ограничены, то вторыми слагаемыми в квадратных скобках формулы (3) можно пренебречь, что в конечном счете дает

$$H_{\varphi} \approx \frac{I_0^{\circ} L}{4\pi} k \sin \theta \left\{ \frac{\sin kR}{R} + i \frac{\cos kR}{R} \right\}. \quad (4)$$

Напротив, при $kR \rightarrow 0$ значение амплитуды магнитного поля будет определяться выражением

$$H_{\varphi} \approx \frac{I_0^{\circ} L}{4\pi} k \sin \theta \left[\left(k^2 + \frac{1}{R^2} \right) + i \frac{k}{2R} \right]. \quad (5)$$

Как следует из формулы (3), зависимость модуля магнитного поля от расстояния R от источника в общем случае будет определяться выражением

$$|H_{\varphi}| = \frac{I_0^{\circ} L}{4\pi} \sin \theta \frac{1}{R} \sqrt{k^2 + \frac{1}{R^2}}, \quad (6)$$

где волновое число $k = 2\pi / c\tau$ (c — скорость света; τ — длительность разряда). Диаграмма направленности магнитного поля элементарного электрического вибратора в трехмерной геометрии будет представлять собой тор с внутренним радиусом, равным нулю. В меридиональном направлении зависимость магнитного поля определяется только $\sin \theta$, значение которого изменяется от 0 до π . При этом максимальные значения магнитного поля будут иметь место при $\theta = \pi/2$.

При $\theta = 0, \pi$ напряженность магнитного поля равна нулю, т. е. излучения в направлении оси вибратора не происходит. Из формулы (5) также следует, что магнитное поле не зависит от азимутального угла φ . Отсутствие излучения электромагнитного поля в направлении $\theta = 0, \pi$ говорит о том, что диаграмма направленности излучаемого электромагнитного поля элементарного электрического вибратора не отвечает требованию излучения в 4л, сформулированному ранее. Выход из положения может быть найден при использовании трех излучателей, расположенных на одной оси под углом друг относительно друга на $\pi/3$ (рис. 2).

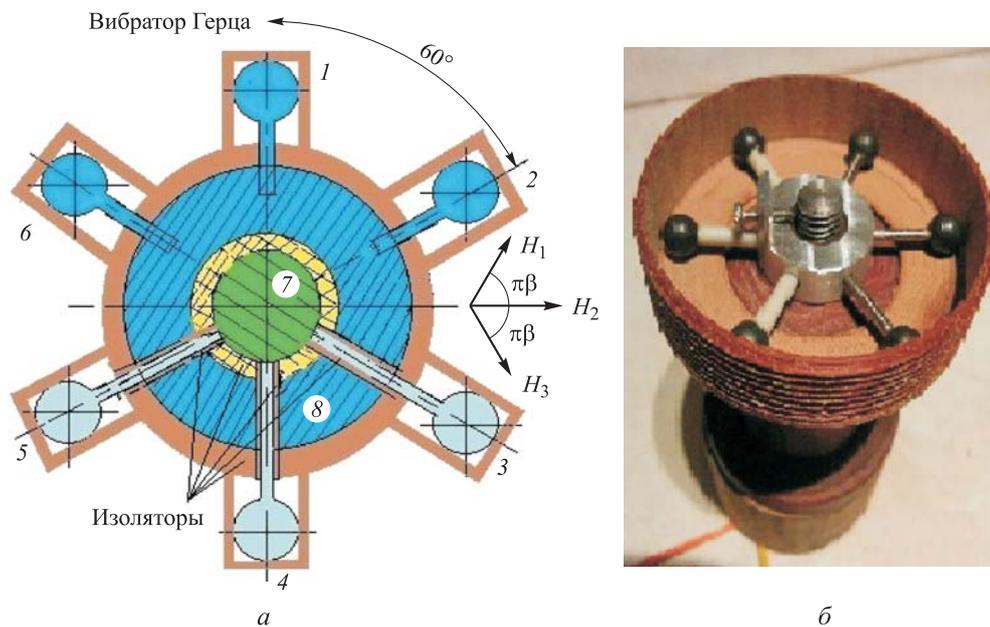
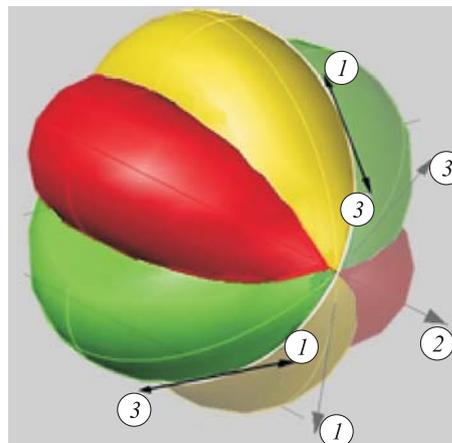


Рис. 2. Строенный вибратор Герца, обеспечивающий излучение электромагнитного поля в геометрию, близкую к 4л:

a — эскиз: 1-6 — излучатели; 7, 8 — токовводы; *б* — рабочий макет

При этих условиях, учитывая, что диаграмма направленности электромагнитного поля любого из трех излучателей будет иметь вид тора с внутренним радиусом, равным нулю, общая картина электромагнитного поля, излучаемого такой «мельницей», в силу выполнения принципа суперпозиции полей, создаваемых каждым вибратором, будет близка к 4л (рис. 3), вектор напряженности суммарного магнитного поля — параллелен оси Y , а его векторная величина, представленная на рис. 2, *a* справа, при $|H_1| = |H_2| = |H_3|$ и $\theta = 0$, согласно формуле (5), будет составлять $H_{\Sigma}(R) = H_1(R) + 2H_2(R)\cos\theta_0 = 2H_1(R)$. Однако в области, где будут складываться встречные магнитные поля (направление 1-3 на рис. 3), суммарное магнитное поле будет равно нулю и в этой области будет иметь место «щель».

Рис. 3. Трехмерное представление диаграммы направленности магнитного поля трех элементарных электрических вибраторов, расположенных под углом $\pi/3$ друг к другу. Стрелками с цифрами 1, 2, 3 обозначены направления напряженности магнитных полей, создаваемых каждым из вибраторов, стрелками 1–3 область встречных магнитных полей; серой областью обозначена плоскость, в которой лежит «щель»



Эта «щель» представляет собой бесконечно тонкую плоскость, на которой расположено геометрическое место точек силовых линий магнитного поля, касательные к которым, определяя направление напряженности магнитного поля, будут равны по величине и противоположны по направлению. Таким образом, диаграмма направленности, создаваемая указанной «мельницей», будет состоять из двух «полусфер», разделенных плоскостью. Причем с ростом числа вибраторов число «долек» в таком «апельсине» будет увеличиваться, поле будет становиться более равномерным в меридиональном и азимутальном направлениях, но плоскость, разделяющая две полусферы, останется, поскольку определяется указанным ранее физическим условием.

Экспериментальное исследование диаграммы направленности напряженности магнитного поля, излучаемого строенным вибратором Герца электромагнитного поля, осуществлялось с помощью детектора электромагнитного поля (рис. 4). Измерения, результаты которых приведены на рис. 5, проводились на расстоянии 1 м от излучателя в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Результаты исследований позволяют констатировать, что диаграмма направленности электромагнитного поля, излучаемого строенным вибратором Герца, в целом близка к 4π -геометрии, но в направлении оси $+Y$ имеет некоторую анизотропию (значения напряженности магнитного поля в направлении оси $-Y$ превышают остальные осевые значения не более чем 1,5–2 раза). В связи с чем диаграмма по форме скорее будет напоминать грушевидный апельсин. Последнее, по-видимому, связано с конструктивными особенностями разрядного устройства, вызванными асимметрией расположения разрядника (рис. 2, б). Очевидно, устраняя асимметрию в конструкции разрядного устройства, можно, в итоге, получить строгую 4π -диаграмму направленности излучателя. Последнее нетрудно осуществить, используя разрядник на ксеноне.

Излучение электромагнитного поля приведенной на рис. 2 «мельницей» для обмена информацией между носителями должно осуществляться на разных частотах, чтобы не мешать друг другу. В качестве детектора электромагнитного поля для простоты решения задачи целесообразно использовать элементарную

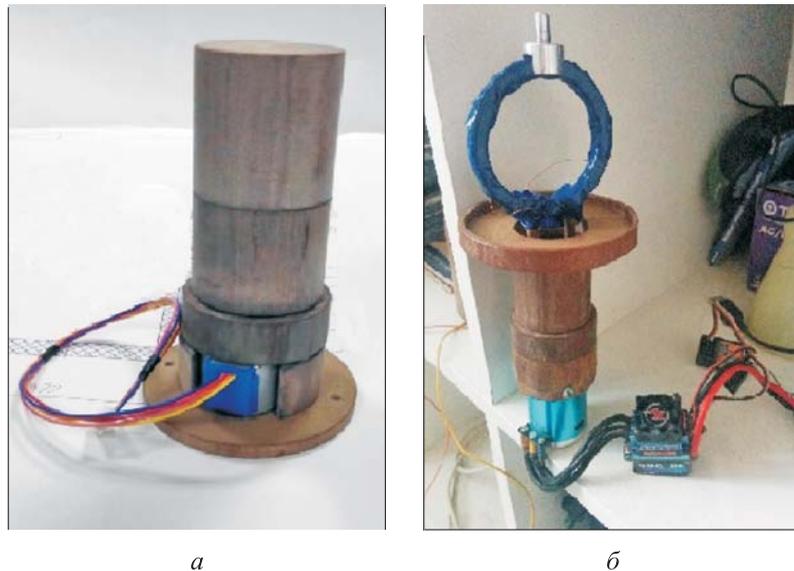


Рис. 4. Действующий макет детектора магнитного поля с соленоидом в виде катушки и сервоприводом, подключенным к источнику питания:
a — в полной сборке; *б* — в рабочем состоянии в условиях лабораторных исследований

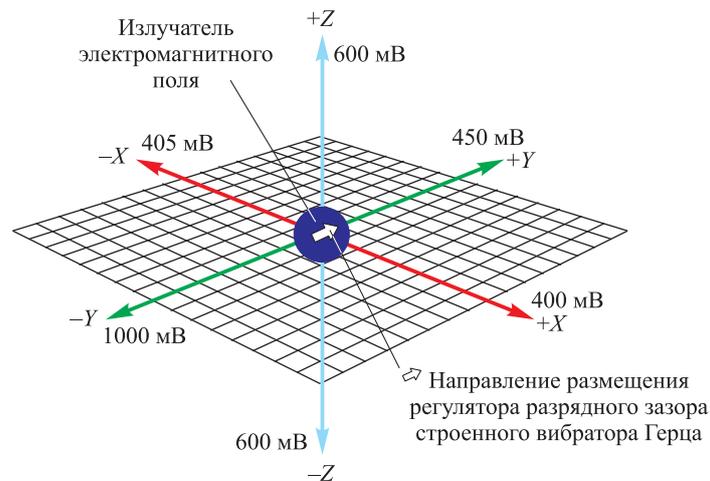


Рис. 5. К оценке диаграммы направленности магнитного поля электромагнитного излучения, осуществляемого строенным вибратором Герца (регулятор разрядного зазора — винт, вкрученный в стойку, закрепленную на электроде)

рамку — соленоид (см. рис. 4), представляющий собой основной элемент детектора магнитного поля, излучаемого строенным вибратором Герца (см. рис. 2). На рис. 2, б показан действующий макет строенного вибратора, на котором черные шарики представляют собой излучатели, а зазор разряда регулируется небольшим винтом, расположенным на стойке слева.

При проведении лабораторных исследований работоспособности системы излучатель–детектор процесс разряда осуществляется в помещении с постоян-

ными температурой и влажностью воздуха. С ростом влажности воздуха разрядные напряжения несколько возрастают. Это обусловлено тем, что разряд в воздухе возникает в результате ионизации, производимой свободными электронами. Если же в воздухе имеются частицы водяного пара, т. е. воздух влажный, то свободные электроны прилипают к этим частицам, что приводит к уменьшению концентрации свободных электронов в воздухе и снижению способности ионизации молекул воздуха, затрудняя тем самым образование электронных лавин [9], усложняя, таким образом, процесс прохождения разряда. Этот недостаток легко исключить, осуществляя разряд в небольшой изолированной стеклянной или керамической ампуле, наполненной ксеноном. Выбор последнего обусловлен, во-первых, тем, что первый потенциал ионизации — это причина, по которой происходит разряд, у ксенона наиболее низкий (таблица), во-вторых, у инертных газов отсутствует сродство к электрону, т. е. в отличие от воздуха в инертных газах не образуются отрицательные ионы, что позволяет отказаться от регулирования зазора разрядника при изменении атмосферных условий.

Значения потенциалов ионизации различных веществ

Газы	Потенциал ионизации, эВ			
	1-й уровень	2-й уровень	3-й уровень	4-й уровень
Водород	13,60	–	–	–
Гелий	24,58	54,42	–	–
Аргон	15,76	27,62	40,90	59,79
Неон	21,56	41,07	63,50	97,02
Криптон	14,00	24,56	36,90	43,50
Ксенон	12,08	21,20	32,10	–
Азот	14,53	29,59	47,43	77,45
Кислород	13,61	35,11	51,89	77,39

Соленоид, характеризующийся индуктивностью L , совместно с емкостью C и активным сопротивлением R представляет собой простейший колебательный контур, в котором параметры (L , C и R) подбираются таким образом, чтобы на возбуждающей частоте имел место резонанс. Это позволит выделить частоту, на которой есть связь с приближающимся носителем, уточнить его имя (первый, второй или третий и т. д.) и передать на него управляющий сигнал для выполнения тех или иных действий, записанных в программе.

Если возмущающая ЭДС изменяется по закону $U = U_0 \sin \omega t$, то ограниченное решение для тока в контуре при условии $i|_{t=0} = 0$ и $i(t) < |M|$ при $t \rightarrow \infty$ определится выражением [4]:

$$i(t) = U_0 \frac{\omega}{L} \frac{(\omega^2 + d) \left\{ \cos \omega t - \exp \left[\left(0,5b - \sqrt{0,25(b^2 + 4d)} \right) t \right] \right\} + \omega b \sin \omega t}{\left(d + 0,5b^2 + \omega^2 + \sqrt{0,25b^2(b^2 + 4d)} \right) \left(d + 0,5b^2 + \omega^2 - \sqrt{0,25b^2(b^2 + 4d)} \right)}, \quad (7)$$

где $b = R/L$; $d = 1/LC$. Выражение для резонансной частоты находят из условий $\omega^2 - \sqrt{0,25b^2(b^2 + 4d)} = 0$ или $\omega = \sqrt[4]{0,25b^2(b^2 + 4d)}$, что при заданных значениях b и d дает

$$\omega_{res} = \sqrt[4]{0,25 \left(\frac{R}{L}\right)^2 \left(\left(\frac{R}{L}\right)^2 + \frac{4}{LC}\right)}. \quad (8)$$

Распознавание имени приближающегося БПЛА устанавливается автоматически по заданной программе путем опроса каждого носителя на своей частоте. Если рамку вращать вокруг собственной оси, то при определенном направлении, при котором нормаль к плоскости рамки окажется параллельной или антипараллельной вектору суммарного магнитного поля, создаваемого такой системой элементарных электрических вибраторов, ток, индуцированный в рамке, будет максимальным, а направление рамки (плоскость, в которой будет находиться рамка) будет указывать на дополнительный источник магнитного поля, что позволит определить направление, из которого может исходить потенциальная угроза столкновения для БПЛА.

Соленоид вращается сервоприводом (см. рис. 4). При определении максимальной амплитуды сигнала на резонансной частоте устройство фиксирует направление источника сигнала путем отслеживания угла поворота соленоида. Далее фиксируется угловая скорость поворота соленоида с помощью установленного на сервоприводе энкодера, что позволяет подобрать оптимальную частоту вращения соленоида для более четкого выделения сигнала.

На рис. 6 приведено фото с экрана осциллографа, регистрирующего ЭДС, возникающую в соленоиде при излучении электромагнитного поля строенным вибратором.



Рис. 6. Фото с экрана осциллографа, регистрирующего изменение во времени ЭДС (3), возникающую в соленоиде при излучении электромагнитного поля вибратором:

1 и 2 — изменения напряжения и тока излучателя в процессе разряда

В целом регистрируемый сигнал детектора магнитного поля согласуется с изменением напряжения и тока, возникающих в строенном вибраторе при разряде.

Излучение электромагнитного поля осуществлялось путем подачи импульсного напряжения на строенный вибратор Герца (см. рис. 2, б) с импульсного генератора напряжения, предназначенного для генерации импульсов резонансной частоты, характерной для каждого из носителей БПЛА, модулированной собственной частотой генератора. Импульсный генератор состоит из преобразователя напряжения, высоковольтного ключа, повышающего трансформатора и задающего генератора.

Технические характеристики импульсного генератора определяются следующими параметрами: рабочее напряжение 5...15 В; потребляемый ток 0,3...1,2 А; амплитуда выходного сигнала 800...3000 В.

Преобразователь напряжения представляет собой импульсный блок питания, работающий по так называемой прямо-обратноходовой схеме. При работе от 7 В амплитуда напряжения на выходе преобразователя составляет ~400 В.

Задающий генератор представляет собой низковольтный генератор импульсов с регулируемой частотой следования и скважностью. Он управляет высоковольтным ключом, роль которого выполняет полевой транзистор. Нагрузкой полевого транзистора служит первичная обмотка выходного повышающего трансформатора, который является последней ступенью усиления импульсов задающего генератора. При питании от 7 В амплитуда напряжения импульсов на вторичной обмотке трансформатора составляет ~1000 В. Амплитуда выходного сигнала регулируется изменением напряжения питания в диапазоне 5...15 В. Ток, потребляемый генератором, находится в диапазоне 0,3...1,2 А, это позволяет в качестве источника питания использовать аккумуляторную батарею типа «Крона».

Результаты эксперимента с поправкой на тот факт, что вибратор Герца в эксперименте является строенным, вполне удовлетворительно согласуются с теоретическими данными.

На рис. 7 приведены максимальные значения положительной (кривая 1) и абсолютные значения отрицательной (кривая 2) амплитуд сигнала $V_{\text{дет}}(R)$ (см. рис. 6), регистрируемого детектором магнитного поля, как функции расстояния R от источника излучения, создаваемого вибратором Герца, стабильная работа которого начиналась при подаче на разрядник напряжения 1000 В и длительности разряда $\tau \sim 1$ мкс. Максимальная относительная погрешность измерения составляла 15 %. Как следует из рис. 7, зависимость $V(R)$ имеет осциллирующий характер, что согласуется с теоретическими оценками, представленными выражениями (3) и (4), но общее поведение распределения отличается от теоретического, создаваемого одноименным вибратором. При этом осцилляции наиболее заметно выражены на малых расстояниях от источника, где напряженность магнитного поля высока. Начиная с расстояния $R \approx 2$ м, зависимость резко спадает, осцилляции имеют место, но выражены слабо. Таким образом, можно констатировать, что критическое расстояние между соседними носителями $R_{\text{кр}}$,

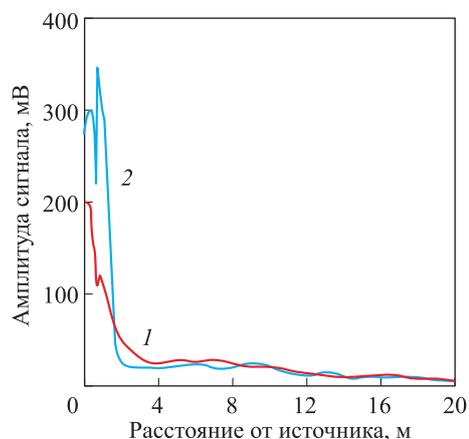


Рис. 7. Максимальное значение амплитуды сигнала $V_{\text{дет}}(R)$, регистрируемого детектором магнитного поля, как функции расстояния R от источника электромагнитного излучения, создаваемого строенным вибратором Герца:

1 — положительная амплитуда сигнала; 2 — абсолютная величина отрицательной амплитуды сигнала

на которое они еще могут подойти друг к другу без опасности столкновения при данной мощности источника, составляет не более 2...3 м. Это расстояние, как и частота сигнала, излучаемого носителем, анализируется амплитудно-частотным анализатором, в результате чего получают информацию о том, какой именно носитель (первый, несущий частоту ω_1 , или второй, несущий частоту ω_2 , и т. д.) подошел на критическое расстояние, после чего вступает в действие программный комплекс, установленный на каждом носителе, который принимает решение о дальнейших действиях.

Характерной особенностью представленных зависимостей является уменьшение амплитуды сигнала с ростом расстояния, начиная с трех-четырех метров, причем этот спад наиболее ярко выражен для амплитуды отрицательной области сигнала (кривая 2), которая на рис. 7 приведена в виде ее абсолютной величины. Таким образом, указанная характерная особенность поведения функций (см. рис. 7) наглядно доказывает справедливость идеи использования зависимости напряженности магнитного поля, возникающего при излучении электромагнитного импульса строенным вибратором Герца, от расстояния в качестве «механизма» предупреждения столкновений носителей в воздухе при их пилотировании, поскольку дает возможность определить положение носителей относительно друг друга и направление их движения. Из рис. 7 следует ограничение на максимальное сближение носителей (БПЛА): сближение носителей прекращается, если регистрируемая амплитуда положительной части сигнала больше или равна 35 мВ, что будет соответствовать расстояниям не более 3 м. Если за критерий принимать амплитуду отрицательной области регистрируемого сигнала (по абсолютной величине), то предельному расстоянию 2 м будет соответствовать то же значение 35 мВ.

Более точные скорректированные данные относительно максимального сближения носителей можно будет получить при более детальном исследовании зависимости $V_{\text{дет}}(R)$ в результате натурных испытаний.

На рис. 8 представлены результаты эксперимента в целях определения направления источника магнитного поля, генерируемого излучателем Герца, относительно направления движения основного (первого) носителя.

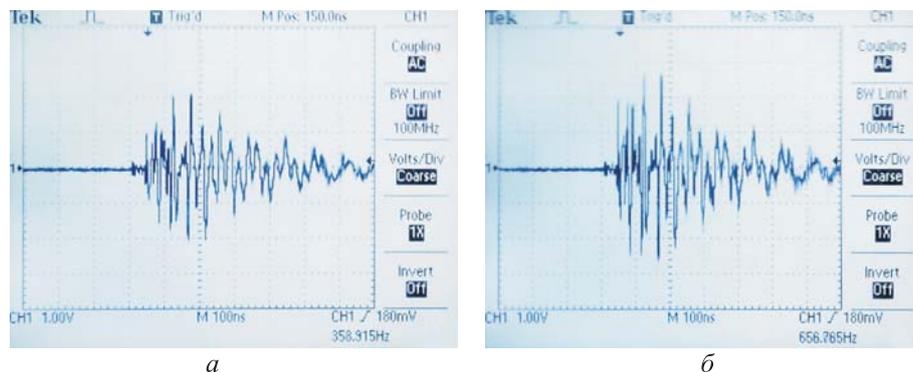


Рис. 8. Максимальное значение амплитуды сигнала $V_{\text{дет}} (R = \text{const})$, регистрируемого детектором магнитного поля, при изменении направления плоскости детектора магнитного поля относительно направления на источник излучения:

$$a - \varphi = 0; \quad b - \varphi = \pi/2$$

С этой целью регистрировались импульсы излучения при повороте плоскости соленоида детектора относительно направления на источник излучения. Результаты наблюдения приведены на рис. 8 (фото с осциллографа, на который выводились регистрируемые сигналы). Действительно, как следует из рис. 8, *а*, максимальная амплитуда сигнала составляет 2,6 В, а на рис. 8, *б* — 2 В. Если магнитное поле имело бы строго азимутальный характер, то при повороте соленоида на угол $\pi/2$ следовало получить амплитуду сигнала, близкую к нулю. Отличие от нулевого значения результатов наблюдения как раз и указывает на то, что магнитное поле имеет диаграмму направленности, близкую к 4л.

Таким образом, результаты наблюдений тем не менее подтверждают ожидаемый эффект: амплитуда регистрируемого сигнала зависит от угла направления плоскости соленоида на источник излучения магнитного поля.

Решение второй задачи, как отмечалось ранее, сводится к разработке специального программного обеспечения, позволяющего предотвратить опасное сближение БПЛА, основываясь на информации о столкновении, которую предоставляет устройство оповещения, связанное с детектором электромагнитного поля. Последний обеспечивается фильтром для исключения влияния на регистрируемый сигнал возмущения, создаваемого собственным электромагнитным полем. Активный фильтр на операционных усилителях выполняется по принципу усилителя с частотно-зависимой обратной связью. В качестве частотно-зависимого звена в петле обратной связи используется RC-цепь. От частоты сигнала зависит глубина обратной связи и, следовательно, коэффициент усиления. Решение этой задачи будет существенно отличаться в зависимости от того, какого вида носитель будет использоваться: квадрокоптеры или БПЛА типа вертолета [10]. Отличие будет определяться в первую очередь методом управления полетом: изменится ли угол атаки несущего винта при движении вертолета вперед, или происходит асинхронное изменение скорости вращения пропеллеров на квадрокоптерах. На рис. 9 приведена принципиальная блок-схема алгоритма программы, иллюстрирующая основную идею решения второй задачи.



Рис. 9. Принципиальная блок-схема алгоритма решения задачи специального программного обеспечения, позволяющего предотвратить опасное сближение БПЛА

Программа должна устанавливаться на каждом из носителей БПЛА и работать по мере обращения к ней до посадки. Перед каждым обращением к программе датчиком электромагнитного поля предварительно проводится анализ состояния поля на каждом носителе. Если датчиком обнаружено возмущение, то дальнейший анализ осуществляется в соответствии с алгоритмом проверки, т. е. определяют скорость и направление движения сближающегося носителя. В случае возникновения опасности столкновения с БПЛА, движущимся впереди, программа уменьшает скорость движения носителя или, если это не помогло, предпринимает маневр уклонения. Маневр уклонения, кроме того, зависит от скорости, направления движения совокупности носителей, а также от взаимного расположения других БПЛА. Алгоритм, реализующий маневр уклонения, должен подбирать такое направление, при котором шанс помехи другим БПЛА сводится к минимуму.

Заключение. Несмотря на простоту предложенного метода самосогласования движения носителей с помощью размещения на них излучателей и детекторов электромагнитного поля, а также соответствующего программного обеспечения, которые исключают возможность столкновения носителей в воздухе при их движении к намеченной пилотом цели, задача предотвращения столкновения БПЛА в воздухе может быть успешно решена.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Елохин А.П.* Об эффективности использования авиационно-ракетного комплекса для оперативного мониторинга крупномасштабных экологических катастроф // *Авиакосмическое приборостроение*. 2004. № 7. С. 52–63.
2. *Елохин А.П.* Методы и средства систем радиационного контроля окружающей среды. М.: НИЯУ МИФИ, 2014. 520 с.
3. *Елохин А.П., Рау Д.Ф., Пархома П.А.* Способ дистанционного определения концентрации радионуклидов в воздушном выбросе радиационно-опасных предприятий и устройство его осуществления. Патент РФ 2299451. 2006. Заявл. 06.07.2006, опубл. 20.05.2007.
4. *Елохин А.П., Грицкевич Н.А.* К вопросу об оборудовании системы управления движением БПЛА, предупреждающей столкновение носителей // *Международная конференция ПГУ «Проблемы автоматизации и управления в технических системах»*. Т. 1. Пенза: ПГУ, 2015. С. 33–41.
5. *Елохин А.П., Жилина М.В., Рау Д.Ф., Пархома П.А.* Способ дистанционного измерения загрязнения радионуклидами подстилающей поверхности в следе радиоактивного выброса радиационно-опасных предприятий и система для его осуществления. Патент РФ 2388018. Заявл. 26.06.2009, опубл. 27.04.2010.
6. *Елохин А.П., Жилина М.В., Пархома П.А.* Особенности сканирования подстилающей поверхности при помощи беспилотного дозиметрического комплекса // *Атомная энергия*. 2009. Т. 107. № 2. С. 103–112.
7. *Катастрофы российских военных самолетов в 2006–2012 гг.* // РИА Новости: веб-сайт. URL: <http://ria.ru/spravka/20121012/772846765.html#ixzz2nXtNnhBG> (дата обращения: 07.03.2018).
8. *Марков Г.Т., Петров Б.М., Грудинская Г.П.* Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Советское радио, 1979. 374 с.
9. *Юриков П.А.* Как работает электрическая изоляция. М.: Энергия, 1972. 80 с.
10. *Belkhouche F.* Modeling and calculating the collision risk for air vehicles // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2013. Vol. 62. No. 5. P. 2031–2041. DOI: 10.1109/TVT.2013.2238265

Елохин Александр Прокопьевич — д-р техн. наук, профессор Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (Российская Федерация, 115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31).

Грицкевич Николай Анатольевич — аспирант Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (Российская Федерация, 115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31).

Василенко Алексей Алексеевич — студент магистратуры Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (Российская Федерация, 115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31).

Просьба сослаться на эту статью следующим образом:

Елохин А.П., Грицкевич Н.А., Василенко А.А. Методы решения задач, обеспечивающих безопасность полетов беспилотных летательных аппаратов // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана*. Сер. Приборостроение. 2018. № 4. С. 15–31. DOI: 10.18698/0236-3933-2018-4-15-31

PROBLEM SOLVING METHODS FOR ENSURING SAFETY OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

A.P. Elokhin

elokhin@yandex.ru

N.A. Gritskevich

komu116@gmail.com

A.A. Vasilenko

National Research Nuclear University (Moscow Engineering Physics Institute),
Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper focuses on a problem solving method for ensuring the safe flight of unmanned aerial vehicles (UAV) carrying a tool set applied for a number of scientific studies. In order to prevent collisions between carriers, every UAV is equipped with an electromagnetic transmitter with the radiation pattern of 4π and a detector for its identification. This equipment with embedded specialized software is expected to prevent crash situations

Keywords

Unmanned aerial vehicle, electromagnetic transmitter, radiation pattern, electromagnetic field detector, inductance, capacitance, oscillatory circuit, resonant frequency

Received 11.12.2017

© BMSTU, 2018

REFERENCES

- [1] Elokhin A.P. Ob effektivnosti ispol'zovaniya aviatsionno-raketnogo kompleksa dlya operativnogo monitoringa krupnomasshtabnykh ekologicheskikh katastrof. *Aviakosmicheskoe priborostroenie* [Aerospace Instrument-Making], 2004, no. 7, pp. 52–63 (in Russ.).
- [2] Elokhin A.P. Metody i sredstva sistem radiatsionnogo kontrolya okruzhayushchey sredy [Methods and tools for environmental radiation monitoring]. Moscow, NIYaU MEFPh Publ., 2014. 520 p.
- [3] Elokhin A.P., Rau D.F., Parkhoma P.A. Sposob distantsionnogo opredeleniya kontsentratsii radionuklidov v vozdushnom vybrose radiatsionno-opasnykh predpriyatiy i ustroystvo ego osushchestvleniya [The method of remote activity concentration determination in emissions from radiation hazardous facilities and a tool to perform it]. Patent RF 2299451. 2006. Appl. 06.07.2006, publ. 20.05.2007.
- [4] Elokhin A.P., Gritskevich N.A. On the issue of UAV movement control equipment to prevent the carriers from collision. *Mezhd. konf. PGU «Problemy avtomatizatsii i upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh»*. T. 1 [Int. Conf. PSU "Challenges of automatics and control of technical systems". Vol. 1]. Penza, PSU Publ., 2015. Pp. 33–41.
- [5] Elokhin A.P., Zhilina M.V., Rau D.F., Parkhoma P.A. Sposob distantsionnogo izmereniya zagryazneniya radionuklidami podstilayushchey poverkhnosti v slede radioaktivnogo vybrosa radiatsionno-opasnykh predpriyatiy i sistema dlya ego osushchestvleniya [The method of remote activity concentration determination on underlying surfaces in traces of radioactive emissions from radiation hazardous facilities, and a system to perform it]. Patent RF 2388018. Appl. 26.06.2009, publ. 27.04.2010.
- [6] Elokhin A.P., Zhilina M.V., Parkhoma P.A. Particulars of scanning an underlying surface using a pilotless dosimetric complex. *Atomic Energy*, 2009, vol. 107, no. 2, pp. 130–143. DOI: 10.1007/s10512-009-9207-1

[7] Katastrofy rossiyskikh voennykh samoletov v 2006–2012 gg. [Russian warcraft crashes in 2006–2012]. RIA Novosti: website. (in Russ.).

Available at: <http://ria.ru/spravka/20121012/772846765.html#ixzz2nXtNnhBG>

(accessed: 07.03.2018).

[8] Markov G.T., Petrov B.M., Grudinskaya G.P. Elektrodinamika i rasprostranenie radiovoln [Electrodynamics and radiowaves distribution]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1979. 374 p.

[9] Yurikov P.A. Kak rabotaet elektricheskaya izolyatsiya [How electrical insulation work]. Moscow, Energiya Publ., 1972. 80 p.

[10] Belkhouche F. Modeling and calculating the collision risk for air vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, vol. 62, no. 5, pp. 2031–2041.

DOI: 10.1109/TVT.2013.2238265

Elokhin A.P. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, National Research Nuclear University (Moscow Engineering Physics Institute) (Kashirskoe shosse 31, Moscow, 115409 Russian Federation).

Gritskevich N.A. — post-graduate student, National Research Nuclear University (Moscow Engineering Physics Institute) (Kashirskoe shosse 31, Moscow, 115409 Russian Federation).

Vasilenko A.A. — Master's Degree student, National Research Nuclear University (Moscow Engineering Physics Institute) (Kashirskoe shosse 31, Moscow, 115409 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Elokhin A.P., Gritskevich N.A., Vasilenko A.A. Problem Solving Methods for Ensuring Safety of Unmanned Aerial Vehicles. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2018, no. 4, pp. 15–31 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3933-2018-4-15-31