

**ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ
И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

УДК 504:621.039.586:614.876

**МЕТОДЫ РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ РАДИОАКТИВНОГО
ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ С ПОМОЩЬЮ
БЕСПИЛОТНЫХ РАДИОУПРАВЛЯЕМЫХ СРЕДСТВ
И ОСОБЕННОСТИ ИХ ПИЛОТИРОВАНИЯ**

© 2014 г. А.П. Елохин, Д.А. Лабашев

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

Анализ работы автоматизированных систем радиационного контроля окружающей среды (АСКРО) показал, что методы контроля, осуществляемого подобными системами, а также приборное обеспечение, широко используемые в настоящее время, в ряде случаев не дают возможности получить информацию в режиме реального времени (on-line).

В рассматриваемой работе для решения подобных задач предлагается метод, основанный на использовании совокупности хаотически распределенных в трехмерном пространстве беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) «роя», несущих на себе комплекс оборудования, которое может быть использовано для решения ряда исследовательских задач.

Показывается, что для выполнения исследовательской задачи движение аппаратов указанного «роя» следует упорядочить, после чего переходить к решению поставленной задачи. С этой целью на каждый БПЛА устанавливаются излучатель электромагнитного поля с диаграммой направленности в 4π и детектор. Это оборудование наряду со специальным программным обеспечением позволяет предотвратить аварийную ситуацию, связанную со столкновением носителей.

Аналогичное оборудование может быть установлено и на пилотируемую авиационную технику с целью предотвращения подобных аварийных ситуаций.

Ключевые слова: радиационный контроль; радиоактивное загрязнение окружающей среды; беспилотный летательный аппарат (БПЛА); излучатель электромагнитного поля; диаграмма направленности излучения; детектор электромагнитного поля; колебательный контур, резонансная частота.

Поступила в редакцию 18.05.2014 г.

Эксплуатация атомных электростанций, различных производств, связанных с использованием и переработкой радиоактивных веществ, хранилищ радиоактивных отходов и т.д. сопровождается, к сожалению, радиационными авариями, которые, в ряде случаев, приводят к радиоактивному загрязнению окружающей среды – воздушного бассейна, подстилающей поверхности и водных акваторий или их донной поверхности, создавая определённые проблемы в экологии, а также для персонала и населения.

В связи с чем в проекте каждой АЭС предусмотрена система радиационного контроля (СРК), обеспечивающая измерение значений контролируемых параметров, характеризующих радиационное состояние АЭС и окружающей среды при всех режимах работы АЭС, проектных и запроектных авариях, а также при ее выводе из эксплуатации [1].

Радиационный контроль газоаerosольных выбросов в окружающую среду и жидких сбросов АЭС, а также мониторинг окружающей среды, осуществляемый оптимизированным числом детекторов фотонного излучения [2-5], производится с

помощью технических средств АСКРО и включает в себя:

- контроль мощности дозы гамма-излучения и годовой дозы на местности;
- контроль метеопараметров;
- контроль загрязнения атмосферного воздуха, почвы, растительности, воды открытых водоемов;
- контроль загрязнения продуктов питания и кормов местного производства.

Следует отметить, что методы радиационного контроля, осуществляемого системой АСКРО, а также приборное обеспечение, широко используемые в настоящее время [6], в ряде случаев не дают возможности получить информацию в режиме реального времени (on-line). Это касается, например, контроля радиационных характеристик газоаэрозольной радиоактивной примеси, распространяющейся в атмосфере при выбросах с АЭС (при штатной работе и в режиме ППР), оценки уровней радиоактивного загрязнения подстилающей поверхности, оказавшейся в зоне радиоактивного загрязнения, т.е. ее объемной и поверхностной активности, традиционно определяемых аспирационным методом (объемную активность) и методом отбора проб, и т.д.

В работах [7,8] для решения аналогичных задач были предложены беспилотный радиоуправляемый дозиметрический комплекс (БДК), внедрение которого, в отличие от системы АСКРО и ее приборного обеспечения, позволит при малой погрешности измерений, характерной для метода отбора проб, существенно повысить оперативность радиационного контроля, его надежность, уменьшить риск принятия неверного решения и, в конечном итоге, оптимизировать принятие решений. Указанный комплекс позволяет решить такие задачи, как, например, измерение мощности выброса газоаэрозольной радиоактивной примеси, выбрасываемой в атмосферу из вентиляционных труб АЭС, как в штатном, так и в режиме планово-предупредительных ремонтов (ППР).



Рис. 1. Общий вид беспилотного дозиметрического комплекса на базе беспилотного радиоуправляемого летательного аппарата (БПЛА) вертикального взлета и посадки JR GSR 260Z (производства Японии). На аппарате имеются видеокамера, детектор гамма-излучения, гамма-спектрометр (ксеноновый гамма-спектрометр).

БДК представляет собой радиоуправляемый беспилотный летательный аппарат (БПЛА) [9], на который навешивается дозиметрическая аппаратура – гамма-детектор, гамма-спектрометр, видеокамера, лазерный дальномер, устройство фиксирования координат – GPS и устройство передачи информации по радиоканалу. Наземное оборудование представляет собой приемное устройство, информация с которого, включая видеоизображение и показания результатов наблюдений, поступает на монитор, а также пульт управления. Общий вид БДК приведен на рисунке 1, а принципиальная схема управления – на рисунке 2.

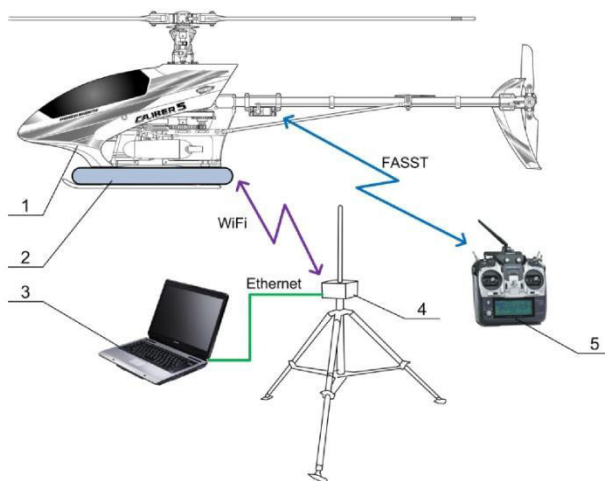


Рис. 2. Принципиальная схема управления БДК. 1 –БПЛА; 2 – дозиметрическое оборудование; 3 – монитор для представления результатов измерений и видеонаблюдений; 4 – антенна; 5 – пульт управления

Работа комплекса основана на измерении спектра фотонного излучения и мощности дозы, создаваемой излучением радионуклидов, распространяющихся в атмосфере в виде ИРГ и аэрозолей. Спектр гамма-излучения измеряют ксеноновым или любым другим гамма-спектрометром с высоким разрешением по энергии фотонов, не требующим охлаждения жидким азотом, приведенном на рисунке 3. Мощность дозы измеряют штатным датчиком типа (БДМГ-200) с диапазоном измерения от 0,1 мкЗв/ч до 0,1 Зв/ч.

После обработки приборного спектра получают амплитудное распределение семейства “монолиний”, каждая из которых характеризуется амплитудой $A(E_i)$ по шкале амплитуд и энергией по шкале энергий. Амплитудное распределение обработанного спектра характеризуется также и полушириной пика ΔE_i , измеряемой на его полувысоте.

Результаты измерений спектра фотонного излучения и мощности дозы позволяют определить объемную активность газоаэрозольной радиоактивной примеси, распространяющейся в атмосфере, и поверхностную активность подстилающей поверхности, например в следе радиоактивного облака. В последнем случае необходимо измерение высоты, с которой осуществляется сканирование радиоактивного загрязнения подстилающей поверхности. Расчет объемной активности осуществляется по формуле:

$$q_R(x_0, y_0, z_0, E_i) = \frac{D'_R(x_0, y_0, z_0) \cdot p_i}{4\pi \cdot 1.458 \cdot 10^5 \sum_{i=1}^N \mu_a(E_i) E_i v(E_i) \beta(E_i) p_i \left\{ \frac{(1 - \exp[-\mu_i R])}{\mu_i} + \frac{a_i \mu_i}{[\mu_i (b_i - 1)]^2} [1 - \exp(\mu_i R (b_i - 1))] + \frac{a_i R \cdot \exp[\mu_i R (b_i - 1)]}{(b_i - 1)} \right\}}$$

- где $D'_R(x_0, y_0, z_0)$ – значение мощности дозы, регистрируемой гамма-детектором;
- x, y, z – координаты точки наблюдения;
- E_i – энергия фотонов;
- $\beta(E_i)$ – энергетическая чувствительность гамма-детектора;
- $\mu(E_i), \mu_a(E_i)$ – коэффициенты линейного ослабления и передачи энергии фотонного излучения соответственно;
- $v(E_i)$ – квантовый выход фотонов с энергией E_i ;
- p_i – парциальный (весовой) вклад активности i – го радионуклида в общую объемную активность;

- a_i, b_i – безразмерные параметры формулы Бергера, зависящие от энергии гамма-излучения и описывающей фактор накопления в гомогенной бесконечной среде (воздухе);
- R – радиус сферы, равный пробегу гамма-кванта с энергией $E_\gamma = 1,0$ МэВ в воздухе.

Метод определения поверхностной активности радиоактивного загрязнения подстилающей поверхности в следе радиоактивного облака не имеет принципиальных отличий от метода оценки объемной активности и также осуществляется БДК, но требует дополнительных технических средств, обеспечивающих измерения высоты сканирования, в виде лазерного дальномера, определения ее оптимальной величины и оценки эффективного радиуса сканирования. Эти вопросы были решены в работах [10,11], в которых было получено, что оптимальная высота сканирования составляет 60м, а эффективная площадь сканирования определяется площадью круга, радиус которого определяется соотношением $R_{эф} \approx 3h_D$, где h_D – высота сканирования (высота полета БДК, на которой осуществляют наблюдение подстилающей поверхности). Величина поверхностной активности i -го радионуклида $\chi(p_i)$ подстилающей поверхности, загрязненной радиоактивными аэрозолями, может быть вычислена по следующей формуле, в которой $m = 3$.

$$\chi(p_i) = \frac{D'_{tot}(x_0, y_0, h_D) \cdot p_i}{2\pi \cdot 1,458 \cdot 10^5 \sum_{i=1}^N \gamma(E_i) E_i \nu(E_i) \beta(E_i) \psi(E_i) p_i \left\{ E_1(\mu(E_i)h_D) - E_1(\mu(E_i)h_D \sqrt{m^2 + 1}) + \frac{a_i}{1-b_i} \exp[\mu(E_i)h_D(b_i - 1)\sqrt{m^2 + 1}] \right\}}$$

где $D'_{tot}(x_0, y_0, h_D)$ – мощность дозы, создаваемая радиоактивными аэрозолями на подстилающей поверхности и измеряемая гамма-детектором БДК;

- x_0, y_0 – координаты точки наблюдения;
- $E_1(\mu(E_i)h_D)$ – специальная функция;
- $\psi(E_i)$ – поправочная функция.

Таким образом, преимущество предлагаемого метода состоит в том, что в его рамках осуществляется локальный дистанционный контроль газоаэрозольной радиоактивной примеси, распространяющейся в воздухе и оседающих на подстилающую поверхность при выбросах с АЭС и других ОИАЭ, как при радиационных авариях, так и при их штатной работе, с передачей информации по радиоканалу в режиме on-line на экран монитора ноутбука независимо от существующих систем АСКРО. В последнем случае может проводиться даже анализ выбросов из вентиляционных труб ОИАЭ. В отличие от стационарных систем радиационного контроля, например, систем АСКРО, оснащенных датчиками, регистрирующими в венттрубе АЭС долгоживущие, короткоживущие радионуклиды, и инертные радиоактивные газы, в основе которых лежат аспирационные методы, а также специальными датчиками, разработанными для регистрации йода, система измерения, реализуемая в предлагаемом методе, определяет весь радионуклидный состав выброса до его выпадения на подстилающую поверхность, а также на подстилающей поверхности в следе радиоактивного облака. Кроме того, используя дистанционный способ управления носителем, существует реальная возможность определения объемной активности радиоактивной газоаэрозольной примеси в процессе ее переноса в атмосфере, что невозможно осуществить всем приборным парком стационарной системы АСКРО в режиме on-line или провести эти измерения лишь

после того, как радиоактивные аэрозоли осядут на землю. Дополнительным плюсом для предлагаемого метода может служить и возможность визуального осмотра места аварии, где отсутствуют датчики системы контроля и системы видеонаблюдений, поскольку беспилотный дозиметрический комплекс (БДК) содержит видеокамеру, работающую в режиме on-line.

Подобные БПЛА, в настоящее время, получают широкое внедрение для решения военно-технических задач, задач МЧС, находят применение в различных отраслях народного хозяйства, например, в нефтяной и газовой, осуществляя дистанционный контроль трубопроводов и газопроводов. Однако, подобное оборудование, предназначенное для применения в области радиационного контроля радиационно-опасных объектов полностью отсутствует, хотя события в Чернобыле и на АЭС Фукусима 1 в Японии наглядно показали, что ряд вопросов, связанных с подобными авариями, при наличии такого оборудования мог бы быть решен значительно проще и намного безопаснее для исполнителей.

С другой стороны, при решении вопроса радиационного контроля окружающей среды, рассмотренного в работе [12] и осуществляемого в рамках конверсии многофункционального авиационно-ракетного комплекса на базе самолета МИГ-31, рассматривалась возможность его использования, как динамической системы радиационного мониторинга при различных состояниях устойчивости атмосферы (см. рис. 3).

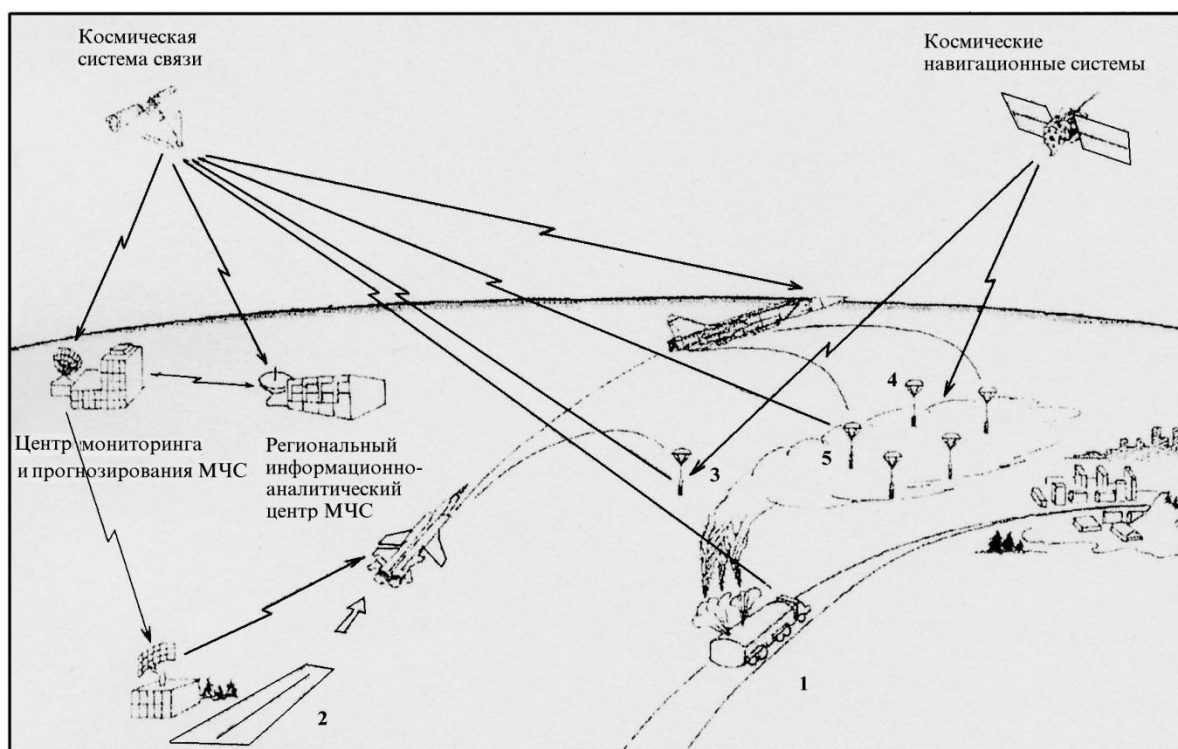


Рис. 3. Схема применения авиационно-ракетного комплекса на базе самолета МИГ-31 для решения задач оперативного мониторинга чрезвычайных ситуаций, связанных с выбросом в атмосферу химически опасных и радиоактивных веществ. 1 – транспорт с радиоактивными или опасными химическими веществами; 2 – взлетная полоса истребителя; 3, 4, 5 – измерительные зонды радиационных характеристик радиоактивного облака, выбрасываемые с самолета и передающие данные измерений по космической связи [12]

Таким образом, решение подобных задач целесообразно искать в другом ключе, а, именно, путем использования совокупности управляемых малых летательных

аппаратов (радиоуправляемых моделей), несущих на себе облегченный комплекс дозиметрического и спектрометрического оборудования вкупе с базовым пилотируемым носителем, т.е. своеобразной «Авиаматкой», например, вертолетом типа Ми-8. В качестве малых летательных аппаратов могут выступать радиоуправляемые модели вертолетов или самолетов, способных нести полезную нагрузку весом от полукилограмма до трех килограммов с продолжительностью полета на крейсерской скорости ~ 70 км/час не менее полчаса.

Один из возможных сценариев использования подобных аппаратов может состоять в следующем. После передачи «Авиаматке», минимальная скорость которой должна быть сравнима с максимальной скоростью БПЛА, чтобы забрать последние к себе на борт в воздухе, координат центра масс радиоактивного облака, покидающего зону, контролируемую системой АСКРО, «Авиаматка» выбрасывает «десант» в виде малых летательных аппаратов (рис. 2 а, б), наводя их на интересующую исследователей область радиоактивного или химического, из состава АХОВ*, облака. После проведения соответствующих измерений в радиоактивном облаке эти аппараты можно вернуть на «Авиаматку» или отослать на наземную базу, если последняя находится в пределах полетного времени (достаточности горючего) аппарата. Очевидно, что возмущением, которое образуется от пропеллера или лопастей малого летательного аппарата, можно пренебречь, если речь идет об измерении мощности дозы внешнего облучения. Обработка данных, полученных малым летательным аппаратом, при соответствующем математическом обеспечении позволит скорректировать радиационные характеристики радиоактивного облака. Преимущество подобных технологий перед технологией использования авиационно-ракетного комплекса на базе самолета МИГ-31, состоящее, именно, в применении малых летательных 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 определяют их низкой стоимостью, мобильностью и возможностью их многократного использования даже в одном рейсе «Авиаматки».

Вместе с тем, использование подобной совокупности роботизированных БПЛА ставит ряд задач, требующих незамедлительного их решения при внедрении в народное хозяйство указанных разработок. К этим задачам относятся:

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 хаотически распределенных в трехмерном пространстве БПЛА, т.е. своеобразным «роем», с выделенным (назначенным) в этом «рое» лидером, обеспечивающим упорядоченное движение «роя» 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 это, в том числе, и трехмерные распределения носителей. До тех пор, пока перемещение носителей в пространстве не является самосогласованным (несамосогласованные структуры, в настоящем понимании, – это структуры (БПЛА) движение которых не зависит друг от друга), велика вероятность их критического сближения, при котором может возникнуть аварийная ситуация, развитие которой может привести к столкновению БПЛА и их поломке без возможности восстановления.

* АХОВ - аварийно химические опасные вещества

Поэтому в рамках решения этой задачи должно быть разработано устройство или система оповещения, которая должна устанавливаться на каждом из носителей, позволяющая проводить диагностику расстояний между соседними носителями, фиксировать их сближение на критическое расстояние, определять скорость их относительного движения и осуществлять действия, предотвращающие их дальнейшее сближение. При этих условиях пилотируемый «рой» сможет быть упорядочен, движение носителей в нем будет безопасным, и, в дальнейшем, приведен к намеченной пилотом цели для решения тех или иных задач.

К сожалению, подобная проблема характерна не только для рассматриваемого в настоящей работе «роя» БПЛА, но и для пилотируемых вертолетов и самолетов в разных странах. В таблице 1 приведен далеко не полный список авиационных аварий в СССР, России и других странах, связанный со столкновением вертолетов и самолетов в воздухе, сопровождающиеся гибелью их экипажей и пассажиров [13].

Совершенно очевидно, что если бы на пилотируемой авиационной технике была бы установлена автоматизированная система диагностики расстояний между соседними носителями с оповещением пилотов, таких крупных потерь можно было бы избежать.

Вторая задача связана с тем, что в выбрасываемом “Авиаматкой” десанте БПЛА носители первоначально будут распределены в пространстве хаотически или, в лучшем случае, их распределение будет являться слабоупорядоченным, 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.

Таблица 1. – Катастрофы пилотируемых летательных аппаратов в России и мире, [13]

| Страна | Дата катастрофы | Жертвы | Описание трагедии |
|--------|-----------------|--|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| СССР | 18.01.1935 | Погибло 11 человек экипажа самолета и 38 (по другим данным – 50) пассажиров-ударников. | Истребитель врезался в выполнявший демонстрационный полёт с передовиками производства восьмимоторный самолёт-гигант АНТ-20 «Максим Горький». Основная статья: <i>АНТ-20</i> . Материал из Википедии – свободной энциклопедии |
| Россия | 3.06.1993 | Пилот самолета – имитатора цели погиб, пилот второй машины катапультировался. | Столкновение самолетов МиГ-29 в полете (один из самолетов имитировал цель) на догонном курсе при отработке ночного перехвата скоростной воздушной цели. |
| | 24.07.1993 | Пилоты катапультировались, выписаны из госпиталя через 2 дня. Зрители не пострадали. | Столкновение в воздухе МиГ-29 на встречных курсах при выполнении двойной петли из-за нерасчетного сближения в нижней точке в завершении комплекса высшего пилотажа на авиашоу в честь 75-летия британских ВВС. |

Продолжение таблицы 1

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|-------|------------|---|---|
| | 4.03.1996 | Пилоты катапультировались, получив незначительные травмы. Ущерба на земле от падения самолетов нет. | Столкновение в воздухе МиГ-29 через несколько минут после взлета при выполнении учебно-тренировочного полета. |
| | 21.03.2007 | Жертв нет, летчики катапультировались. | В ходе проведения плановых полетов столкнулись два истребителя МиГ-29. РИА Новости http://ria.ru/spravka/20121012/772846765.html#ixzz2nXrDTJQM |
| | 16.08.2009 | Погиб командир "Русских витязей" гвардии полковник Игорь Ткаченко, еще двое летчиков пострадали. В результате катастрофы пострадали также четыре человека, находившиеся на земле: один из самолетов упал на территорию дачного поселка, в результате чего сгорели три дома. С сильными ожогами были госпитализированы двое мужчин и одна женщина, которая впоследствии скончалась в больнице. | В ходе подготовки к авиасалону МАКС-2009 произошла авиакатастрофа, в которой столкнулись истребитель Су-27 и спарка (двухместный самолет) Су-27УБ из состава пилотажной группы "Русские витязи". РИА Новости http://ria.ru/spravka/20121012/772846765.html#ixzz2nXojwwbj |
| | 6.08.2010 | Экипаж самолета катапультировался. Никто из местных жителей не пострадал. | При выполнении плановых полетов потерпел аварию штурмовик Су-25 УБ. Причиной катастрофы стала ошибка летчика, связанная с выполнением группового полета, в ходе которого произошло столкновение летевших парой самолетов. РИА Новости http://ria.ru/spravka/20121012/772846765.html#ixzz2nXnV8FQg |
| | 17.09.2012 | Два человека пострадали. | Во время учебного полета на аэродроме столкнулись два учебных вертолета Ми-8Т RA-22719. |
| Индия | 30.08.2012 | Погибли пять человек, еще трое пострадали. | Столкнулись два вертолета Ми-17 ВВС. http://meta.kz/other/729623-v-indii-pri-stolknovenii-vertoletov-mi-17-pogibli-5-chelovek.html |
| Ирак | 22.03.2003 | Погибли семь человек. | Столкновение двух вертолетов Sea King ASaC.7. |
| | 15.11.2003 | Погибли семнадцать человек. | Столкновение в воздухе УН-60L Black Hawk. |
| | 30.03.2004 | Жертв нет. | Столкновение в воздухе АН-1W Super Cobra. |
| | 16.10.2004 | Жертв нет. | Столкновение в воздухе ОН-58D Kiowa. |
| | 26.12.2005 | Погибли два человека. | Столкновение АН-64D Apache с другим вертолетом (не пострадал). |
| | 15.04.2007 | Погибли два человека. | Столкновение в воздухе Aérospatiale Puma. |

Продолжение таблицы 1

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----------|------------|--|---|
| Финляндия | 13.11.2013 | Оба пилота катапультировались. В результате один погиб, второй госпитализирован. | Столкновение двух самолетов в воздухе. Передает АПА со ссылкой на «Интерфакс», сообщение пресс-службы ВВС Финляндии |

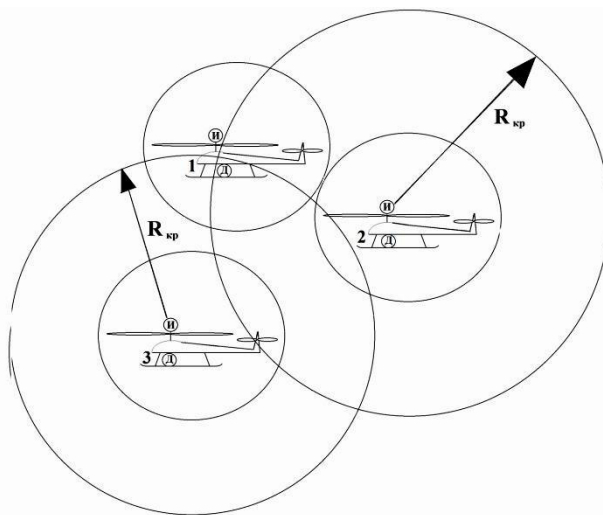


Рис. 4. Принципиальная схема обнаружения соседних носителей БПЛА.
 $R_{кр}$ – критический радиус сближения БПЛА

Физический смысл предлагаемого метода диагностики расстояния между носителями, иллюстрация которого приведена на рисунке 4, 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 их к столкновению. Роль подобного «сторожа» могла бы быть выполнена следующими приборными комплексами:

- 1) Лазерным дальномером.
- 2) Радаром РЛС.
- 3) Использованием оборудования ультразвукового оповещения.
- 4) Путем использования источника «И» электромагнитного поля с диаграммой направленности в 4-пи и детектора «Д» напряженности магнитного поля.

Требование излучения в 4-пи геометрию обусловлено тем, что столкновение носителей, как показано на рисунке 3, 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 для этих целей дальномером на основе лазера. Радар не пригоден для этой цели по причине ограничения веса оборудования. Шумовые помехи, возникающие при полете БПЛА, накладывают ограничения на использование ультразвуковых датчиков и детекторов. Поэтому для решения рассматриваемой задачи остановимся на оборудовании пункта 4. 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.4), например, носителя (1) «почувствует» возмущение измеряемой им напряженности магнитного поля, то это будет означать, что к нему подходит 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, 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 ($R_{кр}$) должна составлять не менее двух наибольших длин носителя или диаметров его несущего винта.

Из рисунка 4 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 небольшого веса.

В качестве излучателя электромагнитного поля может быть использован элементарный электрический вибратор совместно с генератором тока, вид которого приведен на рисунке 4. Элементарным электрическим вибратором называют прямолинейный излучатель, длина которого много меньше длины волны возбуждаемого поля ($L \ll \lambda$), а модуль и фаза линейной плотности электрического тока распределены по длине вибратора равномерно [14]. Реализовать на практике распределение тока, близкое к равномерному, можно с помощью диполя Герца, представляющего собой два металлических шара, соединенных тонким проводом, к разрезу провода подсоединен, например, с помощью двухпроводной линии, источник э.д.с. Длина диполя много меньше длины волны излучаемого поля. Если напряжение в разрезе, создаваемое с помощью источника э.д.с., менять во времени по гармоническому закону, то заряды $q^3(t)$ на шарах также будут изменяться во времени по гармоническому закону. Распределение модуля и фазы электрического тока по длине диполя из-за малой его длины является близким к равномерному. Длина разреза Δ намного меньше длины диполя L , и поэтому можно считать, что провод непрерывен. Таким образом, диполь Герца является физической моделью элементарного электрического вибратора.

Если расположить вибратор вертикально и направить ось Z вдоль оси вибратора (см. рис. 5), то магнитное поле излучателя, как показано в [14], будет иметь только одну составляющую H_ϕ , а его напряженность определяется формулой:

$$H_\phi = \frac{ikR}{4\pi} \sin(\theta) \int_{-L/2}^{L/2} I^3(z') \frac{\exp(-ikR_{pq})}{R_{pq}^2} \left(1 + \frac{1}{ikR_{pq}}\right) dz', \quad (2)$$

где i – мнимая единица;

k – коэффициент распространения электромагнитного излучения ($k = 2\pi/\lambda$), λ – длина волны;

$I^3(z') = I_0^3 L f(z')$, I_0^3 – амплитуда тока;
 $f(z')$ – его линейная плотность распределения;

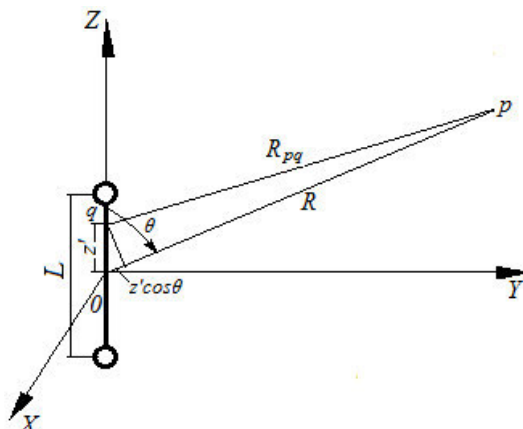


Рис. 5. Иллюстрация к вопросу определения электромагнитного поля элементарного электрического вибратора

$R_{pq} = [R^2 - 2z(z') + (z')^2]^{1/2}$, $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ – расстояние от начала координат до точки наблюдения p ;

x, y, z – координаты точки наблюдения;

z' – координата точки интегрирования $q(0,0,z')$ области $[-L/2, L/2]$;

θ – угол между осью вибратора (осью Z) и радиусом R .

Если линейный размер L вибратора устремить к нулю, то он превращается в точечный вибратор, ток которого при $z' \rightarrow 0$ можно представить в виде $I^3(z) = I_0^3 L \delta(z - 0)$, а напряженность магнитного поля, создаваемого таким вибратором, определится выражением:

$$H_\varphi = \frac{ikI_0^3 L}{4\pi} \sin(\theta) \frac{\exp(-ikR)}{R} \left(1 + \frac{1}{ikR}\right). \tag{3}$$

действительная часть которого, согласно [14], и будет представлять величину магнитного поля, регистрируемого детектором.

$$H_\varphi = \frac{I_0^3 L}{2\lambda R} \sin(\theta) \left[\sin(kR) + \frac{\cos(kR)}{kR} \right]. \tag{4}$$

Поскольку функции $\sin(kR)$ и $\cos(kR)$ при $R \rightarrow \infty$ ограничены, то вторым членом в квадратных скобках формулы (4) можно пренебречь, что, в конечном итоге, дает:

$$H_\varphi(R) = I_0^3 L \frac{\sin(kR)}{2\lambda R} \sin(\theta). \tag{5}$$

Из (5) следует, что $H_\varphi(R)$ имеет затухающий, но осциллирующий характер, а при $R \rightarrow 0$ значение амплитуды магнитного поля будет определяться выражением $I_0^3 L \pi \sin(\theta) / \lambda^2$.

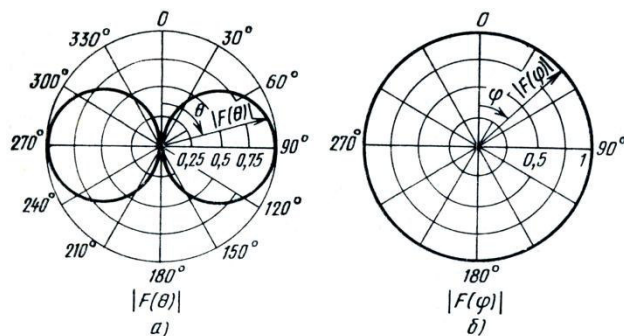


Рис.6. Диаграммы направленности излучения элементарного электрического вибратора в меридиональном (а) и в азимутальном (б) направлениях [14]

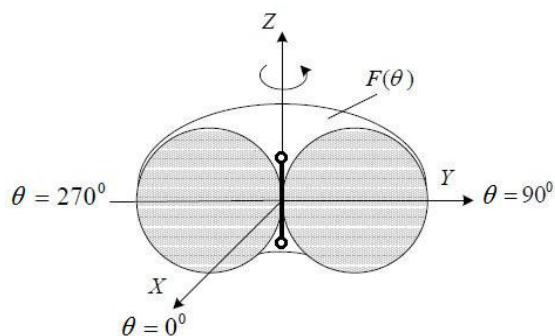


Рис. 7. Трехмерное представление диаграммы направленности магнитного поля элементарного электрического вибратора (разрез плоскостью YZ при $x = 0$)

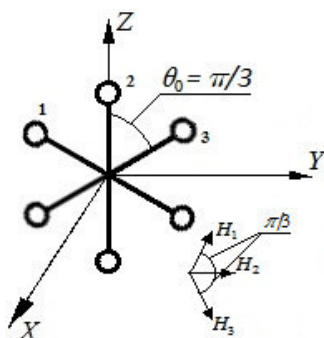


Рис. 8. Совокупность элементарных электрических вибраторов, обеспечивающих излучение электромагнитного поля в геометрию близкую к 4π

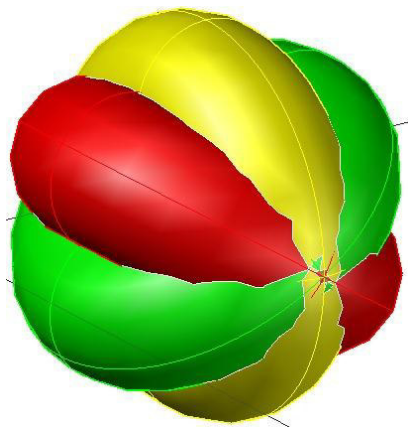


Рис. 9. Трехмерное представление диаграммы направленности магнитного поля трех элементарных электрических вибратора, расположенных под углом $\pi/3$ друг к другу

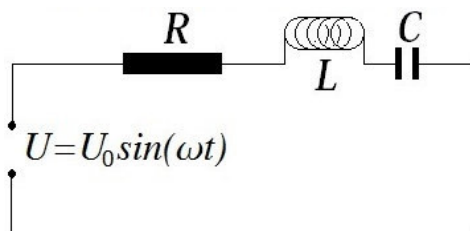


Рис. 10. Последовательный колебательный контур. U – напряжение в цепи; R – активное сопротивление; L – индуктивность соленоида; C – емкость конденсатора

Диаграмма направленности магнитного поля элементарного электрического вибратора представлена на рисунке 6 *а, б*. В меридиональном направлении зависимость магнитного поля определяется только $\sin(\theta)$, значение которого изменяется от 0 до 2π . При этом максимальные значения магнитного поля будут иметь место при $\theta = \pi/2$ и $3\pi/2$. При $\theta = 0, \pi$ магнитное поле равно нулю, т.е. излучения в направлении оси вибратора не происходит (см. рис. 6 *а*). Из формулы (5) также следует, что магнитное поле не зависит от азимутального угла φ , что также отражается на рисунке 6 (*б*). В трехмерной геометрии диаграмма направленности будет представлять собой тор с внутренним радиусом, равным нулю, вид которого приведен на рисунке 7.

Отсутствие излучения электромагнитного поля в направлении $\theta = 0$ и π говорит о том, что диаграмма направленности излучаемого электромагнитного поля элементарного электрического вибратора не отвечает требованию излучения в 4-пи, сформулированному выше. Выход из положения может быть найден путем использования трех излучателей, расположенных на одной оси под углом друг относительно друга на $\pi/3$ (см. рис. 8). При этих условиях, учитывая, что диаграмма направленности электромагнитного поля любого из трех излучателей будет иметь вид, приведенный на рисунке 7, общая картина электромагнитного поля, излучаемого такой «мельницей», в силу выполнения принципа суперпозиции полей, создаваемых каждым вибратором, будет близка к 4π (см. рис. 9), вектор напряженности суммарного магнитного поля – параллелен оси Y , а его величина при $|H_1|=|H_2|=|H_3|$ и $\theta = 0$, согласно формуле (5), будет составлять $H_z(R) = H_1(R) + 2H_2(R)\cos\theta_0 = 2H_1(R)$. Излучение электромагнитного поля, представленной на рисунке 8 «мельницей», для «общения» между носителями должно осуществляться на разных частотах, чтобы не мешать друг другу. В качестве детектора электромагнитного поля можно использовать элементарную рамку, представляющую собой колебательную систему (простейшую колебательную цепь), в которой ее параметры (индуктивность L и емкость C) подбираются таким образом, чтобы на возбуждающей частоте имел место резонанс. Это позволит выделить частоту, на которой идет 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.

Действительно, используя законы Кирхгофа, нетрудно записать уравнение, описывающее напряжение в цепи последовательного колебательного контура, приведенного на рисунке 10. Если приложенная ЭДС изменяется по закону $U=U_0\sin(\omega t)$, а R, L, C – активное сопротивление, индуктивность соленоида и емкость конденсатора соответственно, ограниченное решение величины тока в цепи описывается выражением:

$$i(t) = -U_0 \frac{\omega}{L\sqrt{b^2 + 4d}} \frac{\left[\omega \sin(\omega t) - \left(\frac{b}{2} + \sqrt{b^2 + 4d}/2 \right) \cos(\omega t) \right]}{\left[\omega^2 + \left(\frac{b}{2} + \sqrt{b^2 + 4d}/2 \right)^2 \right]} + C_1 \exp \left[\left(\frac{b}{2} - \frac{\sqrt{b^2 + 4d}}{2} \right) t \right] +$$

$$+ U_0 \frac{\omega}{L\sqrt{b^2 + 4d}} \frac{\left[\omega \sin(\omega t) + \left(-\frac{b}{2} + \sqrt{b^2 + 4d}/2 \right) \cos(\omega t) \right]}{\left[\omega^2 + \left(-\frac{b}{2} + \sqrt{b^2 + 4d}/2 \right)^2 \right]}, \quad (8)$$

в котором в $b = R/L$; $d = 1/LC$, а C_1 определяется из условия $i|_{t=0} = 0$.

$$C_1 = U_0 \frac{\omega}{L\sqrt{b^2 + 4d}} \left[\frac{-b/2 - \sqrt{b^2 + 4d}/2}{\left[\omega^2 + \left(\frac{b}{2} + \sqrt{b^2 + 4d}/2 \right)^2 \right]} - \frac{-b/2 + \sqrt{b^2 + 4d}/2}{\left[\omega^2 + \left(-\frac{b}{2} + \sqrt{b^2 + 4d}/2 \right)^2 \right]} \right]. \quad (9)$$

Выражение для резонансной частоты находят из условия:

$$\omega^2 - b\sqrt{b^2 + 4d}/2 = 0. \quad (10)$$

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 (см. рис. 8), 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.

Решение второй задачи, как отмечалось выше, сводится к разработке специального программного обеспечения, позволяющего предотвратить опасное сближение БПЛА, основываясь на информации, которую предоставляет система оповещения о столкновении, связанная с детектором электромагнитного поля. Решение этой задачи будет существенно отличаться в зависимости от того, какого вида носитель будет использоваться: будут ли это квадрокоптеры или БПЛА типа вертолета. Отличие будет определяться, в первую очередь, методом управления полетом: изменяется ли угол атаки несущего винта при движении вертолета вперед, или происходит асинхронное изменение скорости вращения пропеллеров на квадрокоптерах. На рисунке 11 представлена принципиальная блок-схема алгоритма программы, иллюстрирующая основную идею решения второй задачи.

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 анализируется состояние поля на каждом из носителей. 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 "роя", а также от

взаимного расположения других БПЛА. Алгоритм, реализующий маневр уклонения, должен подбирать такое направление, при котором шанс помехи другим БПЛА сводится к минимуму.

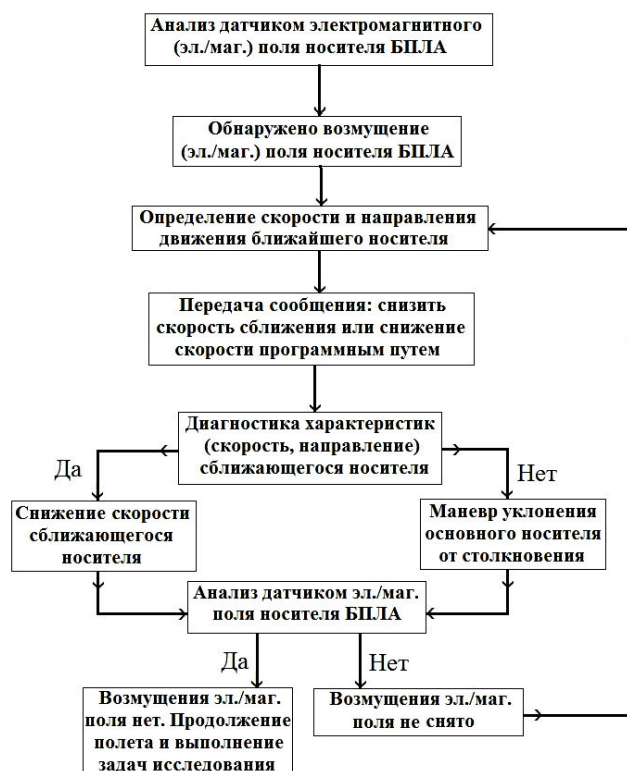


Рис. 11. Принципиальная блок-схема алгоритма решения задачи специального программного обеспечения, позволяющего предотвратить опасное сближение БПЛА

Таким образом, несмотря на простоту предложенного метода самосогласования движения носителей при помощи размещения на последних излучателей и детекторов электромагнитного поля, а также соответствующего программного обеспечения, исключающих возможность столкновения носителей в воздухе при их движении к намеченной пилотом цели, задача предотвращения столкновения БПЛА в воздухе может быть успешно решена.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций» (СП АС-03). СанПиН 2.6.1.24-03 [Текст]. – М.: Минздрав России, 2004.
2. Елохин, А.П., Рау, Д.Ф. Система контроля радиационной обстановки в зонах размещения объектов атомной промышленности. Патент РФ № 2042157 20.08.96 бюл. № 23.
3. Елохин, А.П. Принципы размещения датчиков мощности дозы вокруг АЭС [Текст] / А.П. Елохин // Атомная энергия. – 1994. – Т.76. – Вып. 3. – С. 188–193.
4. Елохин, А.П. и др. Положение о повышении точности прогностических оценок радиационных характеристик радиоактивного загрязнения окружающей среды и дозовых нагрузок на персонал и население [Текст] / А.П. Елохин, М.В. Жилина, Д.Ф. Рау, Е.А. Иванов. – Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации – Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. РБ – 053 – 09. Утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 8 июня 2010 г. – №465. – 79 с.
5. Елохин, А.П. Автоматизированные системы контроля радиационной обстановки окружающей среды [Текст] / А.П. Елохин : учебное пособие для студентов вузов. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2012. – 316 с.

6. Горн, Л.С. и др. Ядерное приборостроение [Текст] / Л.С. Горн, А.А. Климашов, В.В. Матвеев, В.Т. Самосадный, Б.И. Хазанов, Д.Б. Хазанов, С.Б. Чебышов, И.В. Черкашин. – В 2-х тт. – Т. 1. – Приборы для ионизирующих излучений / Под редакцией С.Б. Чебышова. – М.: Восточный горизонт, 2005. – 447 с.
7. Елохин, А.П., Рау, Д.Ф., Пархома, П.А. Способ дистанционного определения концентрации радионуклидов в воздушном выбросе радиационно-опасных предприятий и устройство его осуществления. Заявка МПК G 01T 1/167, № 2006124100/28. Приор. от 06.07.2006. Патент РФ № 2299451, бюл. №14, от 07.12.2006, С. 604-605, ч. 3.
8. Елохин, А.П. и др. Применение беспилотного дозиметрического комплекса для определения концентрации радионуклидов в атмосфере в условиях радиационных аварий [Текст] / А.П. Елохин, В.А. Сафоненко, С.Е. Улин, В.В. Дмитренко, А.В. Пчелинцев, П.А. Пархома // Ядерные измерительно-информационные технологии (Nuclear Measurement & Information Technologies). – 2007. – №3(23). – С. 42–59.
9. Белорусские вертолеты [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://www.indelauav.com> – 30.05.2014.
10. 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. Заявка МПК G 01T 1/29 № 2009117759/28. Приор. от 26.06.2009. Патент РФ № 2388018, бюл. №12, от 27.04.2010.
11. Елохин, А.П. и др. Особенности сканирования подстилающей поверхности при помощи беспилотного дозиметрического комплекса [Текст] / А.П. Елохин, М.В. Жилина, П.А. Пархома // Атомная энергия. – 2009. – Т.107. – Вып. 2. – С. 103–112.
12. Елохин, А.П. Об эффективности использования авиационно-ракетного комплекса для оперативного мониторинга крупномасштабных экологических катастроф [Текст] / А.П. Елохин // Авиакосмическое приборостроение. – 2004. – №7 – С. 52–63.
13. Материал подготовлен на основе материалов РИА Новости и открытых источников. См.: РИА Новости [Электронный ресурс] – Режим доступа: URL: <http://ria.ru/spravka/20121012/772846765.html#ixzz2nXtNnhBG> – 30.05.2014.
14. Марков, Г.Т. и др. Электродинамика и распространение радиоволн [Текст] / Г.Т. Марков, Б.М. Петров, Г.П. Грудинская. – М.: «Советское радио», 1979. – 374 с.

Environmental Radioactive Contamination Radiation Control Methods by Means of Unmanned Aircraft (Drones) and Their Piloting Aspects

A.P. Elokhin, D.A. Labashev

*National Research Nuclear University «MEPhI»,
Moscow, Russia 115409
e-mail: elokhin@yandex.ru*

Abstract – The article tells about the analysis of the use of environmental radiation control automation systems (Automatic Control System of Radiation Dose Level – ACSRDЛ) revealed that control methods performed by these systems along with current widely used instrumentation do not always allow obtaining information in the real time mode (on-line).

In this article, for solving this type of tasks, we propose a new method, based on application of a set ("swarm") of unmanned aircraft (drones) randomly distributed in three-dimensional space, carrying a complex of equipment, which can then be used to solve a number of research tasks.

It is shown, that to fulfill the research task, motion of the aircraft (drones) in the swarm should be arranged in some order. For this purpose, each drone is equipped with an electromagnetic generator with the directional radiation pattern in 4π and a detector. This equipment as well as special software allows prevention of an emergency situation such as collision of the carriers.

Similar equipment can be installed on manned aircraft with a view to preventing accidents of the kind.

Keywords: radiation monitoring; environmental radioactive contamination; unmanned aircrafts; electromagnetic generator; directional radiation pattern; electromagnetic detector; oscillating circuit, tuned frequency.

REFERENCES

- [1] Sanitarnye pravila proektirovaniya i ehkspluatatsii atomnykh stantsij» (SP AS-03). SaNpIN 2.6.1.24-03. [Health regulations of design and operation of nuclear power plants" (JV AS-03). SANRN 2.6.1.24-03.]. M. Pub. Minzdrav Rossii [Ministry of Health of Russia], 2004. (in Russian)
- [2] Elohin A.P., Rau D.F. Sistema kontrolya radiacionnoj obstanovki v zonah razmeshcheniya ob"ektov atomnoj promyshlennosti [The monitoring system of a radiation situation in placement zones objects of the nuclear industry]. Patent RF № 2042157 20.08.96 byul. № 23. [Patent Russian Federation № 2042157 20.08.96 bulletin № 23] (in Russian)
- [3] Elohin A.P. Principy razmeshcheniya datchikov moshchnosti dozy vokrug AEHS [The principles of dose power sensors placement round the NPP]. Atomnaya ehnergiya [Atomic Energy]. 1994, T.76, [Vol. 76], Vyp. 3. [Iss.3], ISSN 0004-7163, pp. 188–193. (in Russian)
- [4] Elohin A.P., Zhilina M.V., Rau D.F., Ivanov E.A. Polozhenie o povyshenii tochnosti prognosticheskikh ocenok radiacionnykh harakteristik radioaktivnogo zagryazneniya okruzhayushchej sredy i dozovykh nagruzok napersonal i naselenie [The provision on increase of predictive estimate accuracy of radiation characteristics of environmental pollution and dose loadings on personnel and population]. Ministerstvo prirodnykh resursov i jekologii Rossijskoj Federacii [The Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Russian Federation]. Federalnaja sluzhba po jekologicheskomu, tehnologicheskomu i atomnomu nadzoru. RB – 053 – 09 [Federal service on ecological, technological and nuclear supervision. RB – 053 – 09]. Utverzhdeno prikazom Federal'noj sluzhby po jekologicheskomu, tehnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 8 ijunya 2010 g. [It is approved by the order of Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision, June 8, 2010], №465, 79 p. (in Russian)
- [5] Elohin A.P. Avtomatizirovannye sistemy kontrolja radiacionnoj obstanovki okruzhajushhej sredy [The automated monitoring systems of a environment radiation] : uchebnoe posobie dlja studentov vuzov [manual for higher education students]. Nacional'nyj issledovatel'skij jadernyj universitet «MIFI» [National Research Nuclear University "MEFhI"], 2012, ISBN 978-5-7262-1716-1, 316 p. (in Russian)
- [6] Gorn, L.S. Klimashov A.A., Matveyev V.V., Samosadny V.T., Khazanov B.I., Khazanov D.B., Chebyshov S.B., Cherkashin I.V. Yadernoye priborostroyeniye [Nuclear instrument making]. V 2-kh tt. [In 2 vol.], T.1. [Vol. 1]. Pribory dlya ioniziruyushchikh izlucheny [Devices for ionizing radiation] / Pod redaktsiyey S.B. Chebyshova. [Edited by S.B. Chebyshov]. M. Pub. Vostochny gorizont [East horizon], 2005. 447 p. (in Russian)
- [7] Elokhin A.P., Rau D.F., Parkhoma P.A. Sposob distantsionnogo opredeleniya kontsentratsii radionuklidov v vozdushnom vybrose radiatsionno-opasnykh predpriyaty i ustroystvo ego osushchestvleniya [Way of remote determination of concentration radionuclides in air emission of the radiation-hazardous enterprises and its device implementation]. Zayavka MPK G 01T 1/167, № 2006124100/28. [Demand of MPK G 01T 1/167, № 2006124100/28.] Prior. ot 06.07.2006. Patent RF № 2299451, [Patent RF № 2299451] byul. №14 [bulletin№14], 07.12.2006, pp. 604-605, ch. 3. [part 3] (in Russian)
- [8] Elokhin A.P., Safonenko V.A., Ulin S.E., Dmitrenko V.V., Pchelintsev A.V., Parkhoma P.A. Primeneniye bespilotnogo dozimetricheskogo kompleksa dlya opredeleniya kontsentratsii radionuklidov v atmosfere v usloviyakh radiatsionnykh avary [Application of a pilotless dosimetric complex for determination of radionuclides concentration in the atmosphere in the conditions of radiation accidents]. Yadernye izmeritelno-informatsionnye tekhnologii [Nuclear Measurement & Information Tecnologies]. 2007, №3(23), pp. 42–59. (in Russian)
- [9] Belorusskiye vertolety [Belarusian helicopters]. Available at: <http://www.indelauav.com> (in Russian)
- [10] 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 [Way of remote measurement pollution by radionuclides of the spreading surface in a trace of radioactive emission the radiation-hazardous enterprises and system for its implementation]. Zayavka MPK G 01T 1/29 № 2009117759/28 [Demand of MPK G 01T 1/29]. Prior. ot 26.06.2009. Patent RF № 2388018 [Patent RF № 2299451], byul. №12[bulletin№12], 27.04.2010 (in Russian)
- [11] Elokhin A.P., Zhilina M.V., Parkhoma P.A. Osobennosti skanirovaniya podstilayushchey poverkhnosti pri pomoshchi bespilotnogo dozimetricheskogo kompleksa [Scanning features of the spreading surface by means of a pilotless dosimetric complex]. Atomnaya energiya [Atomic energy]. 2009, T.107 [Vol.107], Vyp. 2 [Iss.2], ISSN 0004-7163, pp. 103–112. (in Russian)
- [12] Elokhin, A.P. Ob effektivnosti ispolzovaniya aviatsionno-raketnogo kompleksa dlya operativnogo monitoringa krupnomasshtabnykh ekologicheskikh katastrof [About efficiency of aviation missile system use for expeditious monitoring of large-scale environmental disasters]. Aviakosmicheskoe priborostroenie [Aerospace instrument making]. 2004, №7, ISSN 1729-2689, pp. 52–63. (in Russian)
- [13] Material podgotovlen na osnove materialov RIA Novosti i otkrytykh istochnikov. Sm.: RIA Novosti [Material is prepared on the basis of RIA News materials and open sources. See: [News:RIA](http://ria.ru/spravka/20121012/772846765.html#ixzz2nXtNnhBG)]. Available at: <http://ria.ru/spravka/20121012/772846765.html#ixzz2nXtNnhBG> (in Russian)
- [14] Markov G.T., Petrov B.M., Grudinskaya G.P. Elektrodinamika i rasprostraneniye radiovoln [Electrodynamics and distribution of radio waves]. M. Pub. «Sovetskoye radio» ["The Soviet radio"], 1979. 374 p. (in Russian)