

ЛОКАЦИЯ МАЛОВЫСОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ЗА ГОРИЗОНТОМ ЗЕМЛИ

Е. Н. САСИМ, И. А. ИВАЩЕНКО

The electrodynamic model of the "low-altitude aircraft – the surface of the Earth" is considered in the form of the equivalent oscillatory circuit and the ability of application of this circuit radiation for identification and detection of motion parameters of low-flying targets beyond the horizon of the earth

Ключевые слова: эквивалентный колебательный контур, маловысотный летательный аппарат, дальность, радиальная скорость, курсовой угол

1. ВВЕДЕНИЕ

Опыт ведения современных локальных войн [1] свидетельствует о том, что противник стремится в первую очередь разрушить противовоздушную оборону (ПВО) обороняющейся стороны, ее транспортные коммуникации, системы связи и энергоснабжения, оборонные предприятия. Наиболее эффективным оружием в этом случае являются крылатые ракеты (КР), которые относят к классу маловысотных летательных аппаратов (МЛА) [2].

Двигаясь на высотах 40...100 м по складкам местности, они создают целый ряд затруднений для их обнаружения средствами ПВО [2]. Для средств ПВО наземного базирования максимальная дальность обнаружения МЛА ограничена линией горизонта Земли (ГЗ) и составляет 40...45 км. Это существенно сокращает время, отводимое на поражение МЛА, и снижает эффективность средств ПВО. Разработка методов обнаружения КР и определения их дальности за ГЗ обеспечивает их эффективное поражение.

Развитие средств ПВО в борьбе с МЛА и, в частности, с КР идет по различным направлениям [3–6]. Разрабатываемые нетрадиционные методы локации и поражения МЛА основаны на использовании для локации и поражения КР электростатического [6] и электромагнитного [5] взаимодействия МЛА с поверхностью Земли.

Целью работы является исследование электродинамической модели МЛА и возможностей ее применения для обнаружения и определения параметров движения МЛА за ГЗ.

Актуальность разрабатываемой тематики обусловлена одной из задач стоящих перед средствами ПВО – повышение эффективности обороны. Дальнее обнаружение МЛА позволит повысить эффективность обороны охраняемых объектов, что приведет к значительной экономии средств, необходимых для восстановления разрушенных объектов.

2. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МАЛОВЫСОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

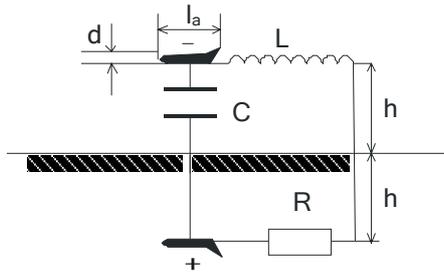


Рис. 1.

В таблице приведены формулы и рассчитанные средние значения электроемкости, индуктивности и резонансной частоты f_0 ЭКК, образованного различными типами ЛА для высоты h ЛА над поверхностью Земли 50 м [8; 9].

В приведенных формулах f_0 – резонансная частота ЭКК; ϵ_0, μ_0 – электрическая и магнитная постоянные в СИ; $\alpha_1 \div \alpha_4, \beta_1 \div \beta_4$ – коэффициенты, учитывающие геометрическую форму МЛА и определяемые экспериментально; S – площадь крыла ЛА; S_b и h_b – соответственно площадь поверхности и высота над Землей лопастей винта вертолета. Остальные обозначения геометрических размеров ЛА пояснены на рисунках в таблице.

Таблица 1.

Тип МЛА		Электроемкость ЭКК		Индуктивность ЭКК		f_0 , МГц
Название	Геометрическая модель	Формула	Результаты расчета	Формула	Результаты расчета	Результаты расчета
1. Вертолет		$\alpha_1 \epsilon_0 \left(\frac{2\pi l_{a1}}{\text{Arch}\left(\frac{2h}{d_1}\right)} + \frac{2\pi l_{a2}}{\ln\left(\frac{2h}{d_2}\right)} + \frac{S_b}{h_b} \right)$	$\approx 6,4 \cdot 10^{-11}$ Ф	$\beta_1 \frac{2\mu_0}{\pi} \left(\sqrt{l_{a1}^2 + h^2} + \sqrt{l_{a2}^2 + h^2} \right)$	$\approx 4,0 \cdot 10^{-7}$ Гн	1...3
2. Крылатая ракета		$\frac{\alpha_2 2\pi \epsilon_0 l_a}{\ln\left(\frac{4h}{d}\right)}$	$\approx 5,78 \cdot 10^{-11}$ Ф	$\beta_2 \frac{2\mu_0}{\pi} \sqrt{l_a^2 + h^2}$	$\approx 3,2 \cdot 10^{-7}$ Гн	3,7
3. Истребитель		$\alpha_3 \epsilon_0 \left(\frac{2\pi l_a}{\ln\left(\frac{4h}{d}\right)} + \frac{S}{h_n} \right) \pi$	$\approx (5,8 \div 6,2) \cdot 10^{-11}$ Ф	$\beta_3 \frac{2\mu_0}{\pi} \sqrt{l_a^2 + h^2}$	$\approx 5,0 \cdot 10^{-7}$ Гн	2,8...3,
4. Транспортный самолет, стратегический бомбардировщик		$\alpha_4 \epsilon_0 \left(\frac{2\pi l_a}{\text{Arch}\left(\frac{2\left(h - \frac{d}{2}\right)}{d}\right)} + \frac{S}{h_n} \right)$	$\approx (7 \div 12) \cdot 10^{-11}$ Ф	$\beta_4 \frac{2\mu_0}{\pi} \sqrt{l_a^2 + \left(h - \frac{d}{2}\right)^2}$	$\approx 6,3 \cdot 10^{-7}$ Гн	1,5...2,

Как видно их таблицы, ЭКК, в зависимости от типа ЛА и с учетом рассчитанной ширины резонансной кривой, возбуждается в диапазоне частот примерно 1...5 МГц. Эти электромагнитные колебания могут быть вызваны как естественными причинами (атмосферика, грозовые разряды [10]), так и специально созданным излучением электромагнитных волн (ЭМВ) (радиостанции, работающие в рассчитанном диапазоне частот). Под действием этих источников в ЭКК возникают вынужденные колебания, а система «МЛА – ПП» становится излучателем ЭМВ соответствующего диапазона частот.

Исследовано влияние скорости МЛА на частоту электромагнитных колебаний в ЭКК. Впервые это влияние изучено в [12], более подробно описано в [11]. Установлено, что за счет влияния скорости МЛА происходит уменьшение переизлучаемой частоты, не зависящее от направления движения МЛА, составляющее единицы герц. Поэтому влиянием скорости МЛА на частоту ЭКК при решении задачи обнаружения можно пренебречь, но его необходимо будет учитывать при определении некоторых параметров полета ЛА.

3. ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ЗАГОРИЗОНТНОЙ ЛОКАЦИИ МЛА

Как показали расчеты, основная частота переизлучаемого диапазона ЭМВ находится на границе средних и коротких волн. Учитывая особенности распространения волн этого диапазона, разработаны способы определения дальности, радиальной скорости и курсового угла МЛА, движущегося за ГЗ, с использованием волн, отраженных от ионосферы [14; 15], и волн, распространяющихся вдоль поверхности Земли [16] (рисунк 2).

Приемо-передающая антенна расположенная в точке P на земной поверхности (рисунк 2) излучает две ЭМВ с линейно изменяющимися частотами в пределах от 3 до 5 МГц. Волна (1), излученная под углом φ к плоскости местного горизонта, приходит в точку L , над которой движется МЛА, зеркально отражаясь от ионосферы в точке B (рисунк 2). Волна (2) приходит к МЛА, распространяясь вдоль поверхности Земли. Переизлученные системой «МЛА – ПП» [17] падающие на нее ЭМВ в полосе частот ЭКК, проходят путь в направлении, противоположном падающей волне, попадают на приемо-передающую антенну P .

В способе определения дальности МЛА за ГЗ с помощью поверхностных волн при приеме переизлученного МЛА сигнала, излученного радиолокатором, одновременно измеряют частоты принимаемой f_n и излучаемой f_n ЭМВ, сравнивают их между собой, а дальность МЛА D определяют по формулам

$$D = \frac{cT_f(f_n - f_n)}{2\Delta F_M}, \text{ если } f_n \leq f_n, \text{ и } D = \frac{cT_f(\Delta F_M - (f_n - f_n))}{2\Delta F_M}, \text{ если } f_n > f_n,$$

где $T_f = \frac{2D_m}{c}$ – период, с которым изменяют частоты излучаемых ЭМВ; D_m – максимальная дальность обнаружения МЛА; $\Delta F_M = f_2 - f_1$ – девиация частоты; f_1, f_2 – нижняя и верхняя границы девиации частоты; c – скорость света в вакууме.

В [15] представлен метод определения дальности МЛА за ГЗ с использованием волн, отраженных от ионосферы. Для МЛА с высотами полета h до 100 м и высоты подъема антенны h_a до 40 м, то есть при $h_a \ll R_3$ и $h \ll R_3$, где R_3 – радиус Земли, выражение для дальности МЛА, отсчитанной вдоль дуги LP (рисунк 2), длину которой обозначим l , имеет вид:

$$l = 2R_3 \left[\theta - \arcsin \left(\frac{R_3}{R_3 + H} \sin \theta \right) \right],$$

где θ – угол между трассой распространения отраженной от ионосферы волны и зенитом.

Если $D \ll R_3$, то пренебрегая кривизной Земли, дальность МЛА за ГЗ считаем равной стороне PL треугольника, и определяем с помощью формулы $D = 2H \operatorname{ctg} \varphi$.

Для определения радиальной скорости и курсового угла МЛА одновременно используются приземный и ионосферный режимы распространения ЭМВ [18].

Частоты ионосферной f_{n1} и приземной f_{n2} , волн, переизлучаемых МЛА, из-за различия доплеровского сдвига частот для них различны и определяются по формулам [13]:

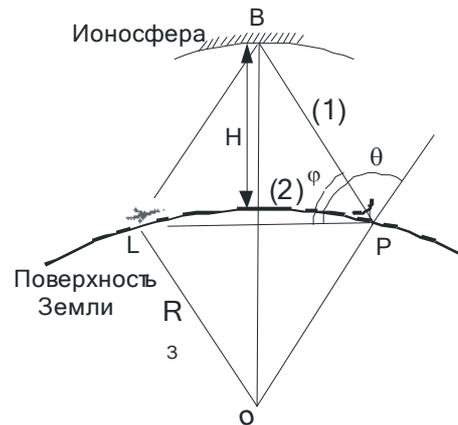


Рис. 2.

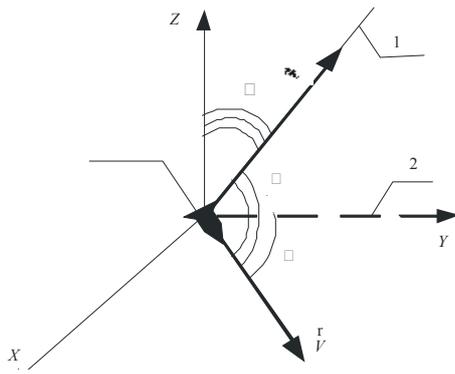


Рис. 3.

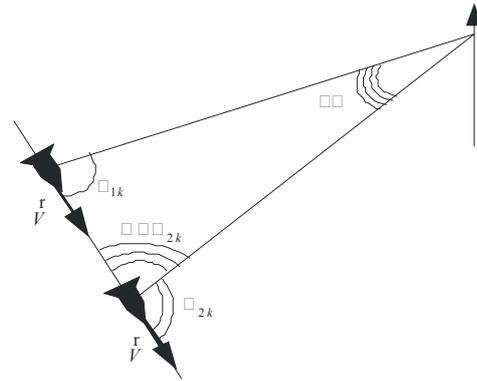


Рис. 4.

для ионосферных волн: $f_{n1} = f_{и} \left(1 + \frac{2V}{c} \cos \gamma \right)$;

для приземных волн: $f_{n2} = f_{и} \left(1 + \frac{2V}{c} \cos \alpha \right)$,

где γ – угол между вектором скорости МЛА и трассой распространения ионосферной волны (рисунок 3); α – курсовой угол МЛА.

Измеряя угол φ между плоскостью местного горизонта и осью диаграммы направленности антенны радиолокатора, частоты принимаемых ионосферной f_{n1} и поверхностной f_{n2} ЭМВ, радиальную скорость V_D МЛА за ГЗ определим по формуле:

$$V_D = \frac{c}{2} \left(\frac{f_{n2} - f_{n1}}{f_{n1} - f_{n2} \operatorname{ctg} \varphi} \right).$$

Измеряя частоты ионосферной f_{n1} и приземной f_{n2} ЭМВ при приеме, а также после изменения курсового угла на $\Delta\psi$ (f'_{n1} , f'_{n2}) (рисунок 4), при углах β_{1k} , β_{2k} между трассой распространения отраженной от ионосферы волны и зенитом в первом и втором случаях, соответственно, определяем курсовой угол α_{1k} , α_{2k} в обоих измерениях по формулам:

$$\alpha_{1k} = \operatorname{arctg} \left(\operatorname{ctg} \Delta\psi - \frac{(f'_{n2} - f'_{n1})(f_{n1} - f_{n2} \sin \beta_{1k})}{(f_{n2} - f_{n1})(f'_{n1} - f'_{n2} \sin \beta_{2k}) \sin \Delta\psi} \right), \quad \alpha_{2k} = \alpha_{1k} + \Delta\psi.$$

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МЛА

Были проведены предварительные экспериментальные исследования электродинамической модели МЛА [19]. Подробно результаты эксперимента изложены в [20].

Постановка прямого эксперимента по загоризонтному обнаружению КР является очень дорогостоящей. Поэтому качестве модели процесса полета МЛА были выбраны процессы посадки и взлета самолетов гражданской авиации в аэропорту Минск-2.

Для подсветки самолетов были использованы ЭМВ частотами 2 МГц, 3 МГц и 5 МГц, представляющие собой фоновое шумоподобное излучение над местом посадки и взлета самолетов – аэропортом, и местом измерения фона – УО «ВА РБ».

Результаты эксперимента в целом свидетельствуют о наличии возможности обнаружения МЛА с помощью разработанной методики. Вместе с тем существует ряд проблем, наличие которых снижает устойчивость обнаружения и требует дальнейших исследований.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования электродинамической модели МЛА свидетельствуют о том, что загоризонтная локация МЛА может быть практически реализована.

Так как решение задачи обнаружения и поражения КР наземными радиолокационными средствами за ГЗ в специальной литературе к настоящему времени не описано, то предложенный в работе метод не имеет аналогов и является перспективным в решении задач ПВО.

Литература

1. Локальные войны и вооруженные конфликты конца XX – начала XXI века / Под ред. *И. А. Мисурагина*. – Минск: УО «ВА РБ», 2007.
2. *Волковский, Н. Л.* Энциклопедия современного оружия и боевой техники / *Н. Л. Волковский*. – М.: Полигон, 2002. – Т.1. – 376 с.
3. *Мицкевич, Д. М.* Физические принципы создания рубежа противовоздушной обороны охраняемого объекта от крылатых ракет / *Д. М. Мицкевич, И. А. Иващенко* // IV Машеровские чтения: материалы междунар. науч.-практич. конф. студ., аспирант. и молод. ученых / УО «ВГУ им. П.М. Машерова». – Витебск, 2010. – С. 84-85.
4. *Сасим, Е. Н.* Физическая модель процесса обнаружения маловысотного летательного аппарата за горизонтом Земли / *Е. Н. Сасим, В. В. Воинов* // IV Машеровские чтения: материалы междунар. науч.-практич. конф. студ., аспирант. и молод. ученых / УО «ВГУ им. П.М. Машерова». – Витебск, 2010. – С. 86-87.
5. Электродинамическая модель маловысотного летательного аппарата / *В. В. Воинов* [и др.] // Сб. науч. ст. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2008. – № 15. – С. 62–66.
6. Способ обнаружения маловысотного летательного аппарата и устройство для его осуществления: пат. 10800 Респ. Беларусь, МПК G01R29/12 / *И. М. Быков, В. В. Воинов, В. В. Мокринский*; заявитель УО «ВА РБ». – № а 20061146; заявл. 17.11.2006; опубл. 30.06.08 // Бюл. – № 3.
7. *Василин, Н. Я.* Крылатые ракеты. Аналит. сб. / *Н. Я. Василин*. – Минск: НИИ ВС РБ, 2003. – 156 с.
8. *Сасим, Е. Н.* Электрические характеристики летательного аппарата / *Е. Н. Сасим, И. А. Иващенко* // Актуальные вопросы авиационной науки и техники: сб. тез. докл. I Междунар. молодежной науч.-техн. конф. / УО «ВА РБ». – Минск, 2011. – С. 220–223.
9. *Сасим, Е. Н.* Корректировка математической модели маловысотного летательного аппарата по результатам экспериментальных исследований / *Е. Н. Сасим, И. А. Иващенко* // Содружество наук. Барановичи – 2011: материалы VII Междунар. науч.-практ. конф. молодых исследователей / УО «БарГУ». – Барановичи, 2011. – Ч.1. – С. 204–205.
10. *Колосков, А. И.* Атмосферные помехи радиоприему // Физический энциклопедический словарь / *А. И. Колосков*. – М.: Сов. энцикл., 1960. – С. 105–106.
11. *Воинов, В. В.* Влияние скорости маловысотного летательного аппарата на частоту электромагнитных колебаний эквивалентного контура / *В. В. Воинов, И. А. Иващенко, В. В. Мокринский, Н. В. Марковникова* // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2011. – № 1 (30). – С. 85–91.
12. *Сасим, Е. Н.* Физическая модель процесса обнаружения маловысотного летательного аппарата за горизонтом Земли / *Е. Н. Сасим, В. В. Воинов* // IV Машеровские чтения: материалы междунар. науч.-практич. конф. студ., аспирант. и молод. ученых / УО «ВГУ им. П. М. Машерова». – Витебск, 2010. – С. 86–87.
13. Справочник офицера воздушно–космической обороны / под ред. *С. К. Бурмистрова*. – Тверь: ВА ВКО, 2006. – 564 с.
14. *Шабельников, А. В.* Распространение радиоволн // Физический энциклопедический словарь. – М.: Сов. энцикл., 1965. – Т.4. – С. 336–340.
15. *Воинов, В. В.* Возможность определения дальности маловысотного летательного аппарата за горизонтом земли / *В. В. Воинов, И. А. Иващенко, В. В. Мокринский, Н. В. Марковникова* // Вестник Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2010. – № 3 (28). – С. 55–61.
16. *Воинов, В. В.* Определение дальности маловысотного летательного аппарата / *В. В. Воинов, Е. Н. Сасим* // Сб. науч. ст. курсантов Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2008. – №6. – С.149–150.
17. Способ обнаружения маловысотного летательного аппарата: пат. 13148 Респ. Беларусь, МПК G01S13/00, G08B13/24 / *В. В. Воинов* [и др.]; заявитель УО «ВАРБ» – № а 20080960; заявл. 18.07.2008; опубл. 30.04.10 // Бюл. – № 2.
18. *Сасим, Е. Н.* Перспективы активной локализации маловысотного летательного аппарата за горизонтом Земли / *Е. Н. Сасим, С. А. Смянович, В. В. Воинов* // Первый шаг в науку – 2011: сб. материалов Международного форума учащейся и студенческой молодежи «Первый шаг в науку – 2011». (Минск, 25–29 апр. 2011 г.) / Нац. акад. наук Беларуси. – Минск: Беларус. навука, 2011 – С.704–705.
19. *Сасим, Е. Н.* Экспериментальное моделирование процесса загоризонтного обнаружения крылатых ракет / *Е. Н. Сасим, В. В. Воинов* // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях: материалы XIV Республиканской науч. конф. студентов и аспирантов, Гомель, 2011 г. / УО «ГГУ им. Ф. Скорины». – Гомель, 2011. – Ч.1. – С. 108–109.
20. Экспериментальное исследование электродинамической модели маловысотного летательного аппарата / *В. В. Воинов* [и др.] // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2011. – № 3 (32). – С. 101–111.