

УДК 621.396.96

ОБНАРУЖЕНИЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА МАЛЫХ И ПРЕДЕЛЬНО МАЛЫХ ВЫСОТАХ МЕТОДОМ ПАССИВНОЙ МАКРОВОЛНОВОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

Р.Г. ХЕХНЕВ

Минский государственный высший авиационный колледж
Уборевича, 77, Минск, 220096, Беларусь

Поступила в редакцию 4 апреля 2012

Рассматривается способ обнаружения летательных аппаратов, являющихся носителями электрического заряда при их полете на малых и предельно малых высотах (20-60 м). Приведено уравнение дальности обнаружения в зависимости от параметров статической электризации маловысотной цели, характера рельефа местности и предметов на ней по трассе полета, уровня естественных помех в диапазоне инфранизких частот, чувствительности устройства, регистрирующего установленное автором явление.

Ключевые слова: пассивная радиолокация, статическая электризация, электромагнитное поле, ток смещения, летательный аппарат.

Введение

Основу современных средств обнаружения летательных аппаратов (ЛА) составляют радиолокационные станции (РЛС) различного назначения, однако в силу известных причин они практически не решают своей задачи, когда полет ЛА совершают на малых высотах. Поэтому как у нас, так и за рубежом, интенсивно ведутся работы по поиску новых методов и средств обнаружения маловысотных целей.

Анализ материалов научных исследований в решении этой проблемы показывает, что наибольший интерес исследователи как у нас, так и за рубежом, проявляют к методу пассивной радиолокации [1, 2], причем важное место отводится изучению физических полей, генерируемых современными ЛА. Они вызваны различными физическими явлениями: инфракрасное излучение двигательных установок, электромагнитное излучение плазменной струи от работы двигательных установок, электростатическое и электромагнитное поле, возникающее при движении в диэлектрической среде материальных тел, сверхнизкочастотное излучение, обусловленное взаимодействием ЛА, являющимся носителем электрического заряда, с магнитным и электростатическим полем Земли.

Довольно широкое распространение получил способ обнаружения, основанный на использовании собственного заряда ЛА [1-4], который считается одним из перспективных способов пассивной радиолокации.

Электризация летательных аппаратов в процессе полета

ЛА при своем полете приобретает электрический заряд. В [1] выполнено подробное исследование процессов, связанных с зарядом и разрядом самолета при его взаимодействии с потоком воздуха в процессе полета. Как результат этих исследований приведена эквивалентная электрическая схема, характеризующая процесс заряда-разряда самолета в полете (см. рис. 1). Элементами схемы являются: I_1, I_2, I_3 – токи заряда ЛА; I_a, I_c, I_p, I_k – токи разряда; C – емкость ЛА; R_a – эквивалентное сопротивление, по которому заряд стекает в атмосферу; R_c – эк-

вивалентное сопротивление струи газов двигателей; R_p – эквивалентное сопротивление статических разрядников; R_k – эквивалентное сопротивление коллекторного эффекта. Современные ЛА заряжаются до напряжения порядка 1,5 млн. вольт, заряд ЛА в пределах $10^{-6} \div 10^{-3}$ К, ток заряда $i=10$ мА, мощность электростатического генератора, заряжающего ЛА, достигает 10 Квт (данные для ЛА ТУ-104, совершающих полет на высотах порядка 10 км) [1]. Для ЛА, совершающих полет на малых высотах, следует ожидать значительного увеличения этих показателей, ибо основным фактором статической электризации ЛА является ток, вызванный соударением частиц, взвешенных в воздухе, с лобовой поверхностью ЛА. Концентрация этих частиц на малых высотах значительно выше, чем на больших.

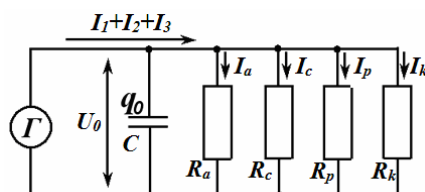


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема самолета в полете

В силу закона электростатической индукции, на земной поверхности в зоне нахождения ЛА наводится точно такой же, но противоположный по знаку электростатический заряд. На рис. 2 представлена нормированная диаграмма плотности распределения индуцированного заряда на поверхности Земли в зависимости от высоты полета ЛА, при этом диаметр зоны индукции равен удвоенной высоте полета [3] (рис. 2). С помощью датчиков, установленных на поверхности Земли и изолированных от нее (рис. 3), могут быть замерены количественные характеристики электрического поля движущихся воздушных объектов, в особенности маловысотных, а также определены некоторые траекторные данные (скорость, высота) [2].

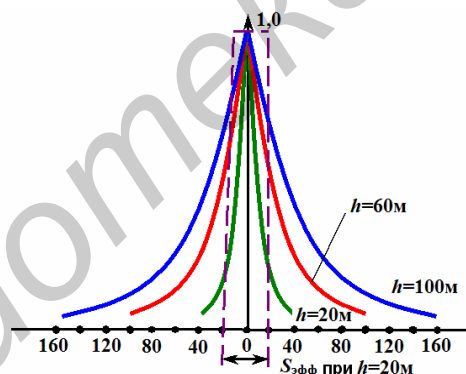


Рис. 2. Нормированная диаграмма плотности распределения индуцированного заряда

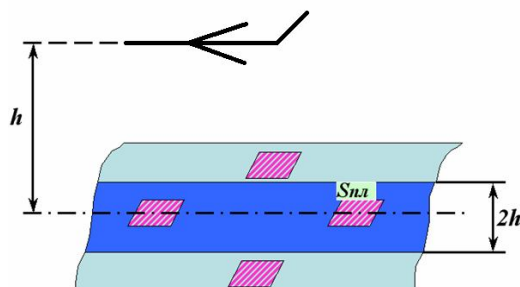


Рис. 3. Обнаружение ЛА способом, основанном на явлении электростатической индукции

Мощность электростатического генератора, который электризует ЛА, составляет единицы – десятки киловатт, однако для целей обнаружения и траекторных измерений при способе, основанном на явлении электростатической индукции, используется очень малая часть

$(5 \cdot 10^{-6})$ энергии собственного заряда ЛА [3]. По этой причине расстояние, на котором возможно решение задач обнаружения ЛА и траекторных измерений, составляет сотни метров [2].

Физические основы предлагаемого способа обнаружения

Решение этих задач можно осуществить иным способом, использующим физические явления, объективно сопутствующие процессу полета ЛА на малых высотах [3].

Поверхностная оболочка Земли (за исключением ледовых районов) является хорошо проводящей, следовательно эквипотенциальной, и образует с поверхностью ЛА конденсатор с воздушным диэлектриком. Емкость этого конденсатора зависит от площади ЛА в плане (площадь плоскостей, стабилизатора, фюзеляжа), диэлектрической проницаемости среды, толщины диэлектрика (в нашем случае – это высота полета).

Обычно считается, что ЛА, использующие преимущества полета на малых и предельно малых высотах, при полете копирует складки местности. Однако при точном копировании ЛА профиля поверхности Земли и предметов на ней при скорости полета $V=200\div 250$ м/сек ($720\div 900$ км/час) нагрузка на несущие элементы плоскостей, фюзеляжа, стабилизатора, рули высоты практически вызвала бы механическое разрушение конструкции, особенно при прохождении горных складок местности, оврагов с отвесными стенками, границ лес-поле и т.д. Поэтому на определенном участке полета, протяженность которого определяется скоростью полета, быстродействием системы управления, допустимыми нагрузками конструкции и т.д., высота полета ЛА по отношению к микронеровностям земной поверхности и предметами на ней представляет собой некоторое усредненное значение, отклонение от которого обязательно имеет место. Это обстоятельство вызывает соответствующее изменение емкости системы «ЛА – поверхность Земли», а при наличии на ней электрического заряда – появление тока смещения через емкость «ЛА – поверхность Земли».

Как показывают расчеты [3], величина тока смещения зависит от тока заряда ЛА и относительного изменения объема зоны индукции (рис. 2) собственного заряда ЛА из-за перепадов рельефа местности, предметов на ней, характера подстилающей поверхности и т.д. по трассе полета (рис. 3).

Этот ток смещения охватывает сравнительно большой объем пространства, что предопределяет появление возмущений электрической и связанной с ней магнитной компоненты электромагнитного поля (ЭМП), которые могут быть зарегистрированы на значительном расстоянии от места, где точного копирования ЛА рельефа местности и предметов на ней не происходит. Таким образом, ЛА при полете на малых высотах являются источником возмущений электромагнитного поля (ЭМП), спектр которых, как показывают данные теоретических и экспериментальных исследований [3], находится в области инфранизких частот (десятые доли – десятки Гц). Спектральный «портрет» помех такого рода для каждого типа ЛА и конкретного участка земной поверхности имеет свои характерные особенности, что может быть использовано для идентификации ЛА и для решения задачи определения местоположения маловысотных целей. Интересующие нас участки земной поверхности могут быть заранее протестированы, введены в память ЭВМ и в сопряжении с цифровыми картами рельефа местности, корреляционно-экстремальной обработкой сигналов [4] использованы для решения этой задачи.

Изменение емкости системы «ЛА – поверхность Земли» происходит при движении ЛА относительно Земли, т.е. источник возмущения ЭМП по существу является параметрическим генератором, в котором на изменение емкости расходуется часть механической энергии движения ЛА. Это обуславливает на несколько порядков (до 10^5 раз) более высокую энергетику явления предлагаемого способа в сравнении со способом обнаружения НЛЦ, основанным на явлении электростатической индукции [3]. Согласно расчетным данным [3], для наиболее характерных для Европы участков рельефа местности импульсная мощность возникающих при этом сигналов может достигать 1 кВт.

С учетом частотного диапазона обозначенных выше возмущений ЭМП этот источник может рассматриваться как точечный излучатель. Диаграмма направленности такого излучателя имеет вид торроида в его срединном сечении [5]. Процесс приема и регистрации таких возмущений имеет свою специфику. Он происходит в ближней зоне, где основным в энергетическом отношении является процесс периодического обмена энергией между источником и

ближней зоной. При этом энергия то забирается от источника и накапливается в электромагнитном поле ближней зоны, то отдается обратно источнику.

Непосредственное измерение флуктуаций электромагнитного поля этого диапазона частот измерительными приборами в настоящее время практически не ведется.

Регистрация возмущения электромагнитного поля

В основу предложенного автором способа обнаружения маловысотных целей положено использование возмущений в поле вертикальных токов атмосферного электричества [3, 4], которые опосредованно связаны с изменением напряженности электрического или магнитного поля.

Действительно, на основе первого уравнения Максвелла [5]

$$\delta_{\text{см}} = j\omega\epsilon_a E = \text{rot}\vec{H}, \quad (1)$$

где $\delta_{\text{см}}$ – плотность тока смещения.

Для наблюдателя, находящегося на поверхности Земли, ток смещения, вызванный изменениями векторов магнитного и электрических полей, направлен нормально к ее поверхности и алгебраически складывается с током проводимости атмосферы. Это обстоятельство дает возможность приборы и методы для измерения параметров электричества атмосферы использовать в качестве инструмента для обнаружения маловысотных целей.

При измерении параметров электричества атмосферы (напряженность электрического поля, плотности тока, проводимости атмосферы, зарядов, проводимости атмосферы и т.д.), используются электрометрические приборы, отличительной особенностью которых является очень большое входное сопротивление, малый уровень тока во входных измерительных цепях, обычно большая постоянная времени процесса измерения, которая ограничивает верхнюю граничную частоту спектра измеряемого физического параметра [6]. Очень широк круг детекторов (устройств), преобразующих измеряемый физический параметр в вид сигнала, удобный для регистрации [6, 7].

В качестве детектора, преобразующего плотность тока проводимости атмосферы в ток, регистрируемый электрометром, может быть использована изолированная пластина известной площади $S_{\text{пл}}$ (рис. 3), расположенная на поверхности Земли.

При этом плотность тока проводимости атмосферы $j_{\text{пр}}$ определяется выражением

$$J_{\text{пр}} = \frac{I}{S_{\text{пл}}}, \quad (2)$$

где I – ток, измеренный электрометром (в А); $S_{\text{пл}}$ – площадь пластины.

В качестве детектора может быть использована обычная шлейфовая антенна [8]. При этом

$$J_{\text{пр}} = \frac{I}{\left(\frac{1}{2}\right) \cdot l \cdot h}, \quad (3)$$

где I – ток, измеренный электрометром (в А); l – длина антенны; h – высота подвеса антенны.

Второй детектор обладает большей чувствительностью, но менее помехозащищен от электростатических наводок.

Плотность тока проводимости атмосферы $j_{\text{пр}}$ несколько отличается для различных районов поверхности Земли, имеет крайне незначительное суточное изменение и уровень $j_{\text{пр}}=10^{-16}$ А/см² [6]. На фоне $j_{\text{пр}}$ осуществляется измерение тока, вызванного маловысотной целью. Для повышения чувствительности устройства ток проводимости атмосферы, с учетом его практического постоянства, довольно легко может быть скомпенсирован.

Современные электрометры имеют предел чувствительности по току ($10^{-16} \div 10^{-17}$) А [7]. С учетом этого обстоятельства при использовании в качестве детектора шлейфовой антенны длиной 25 м и высотой подвеса 4 м (такое устройство использовалось при проведении натур-

ных испытаний по обнаружению маловысотных целей на авиаполигоне «Ружаны» 1986 г.) аппаратурная чувствительность устройства, регистрирующего плотность тока смещения, составляет $2 \cdot (10^{-22} \div 10^{-23}) \text{ А/см}^2$, что по данным предварительных исследований [3] с избытком обеспечивает необходимую для практических целей чувствительность регистрирующего устройства.

Электромагнитное поле в диапазоне сверхнизких частот непостоянно. Оно претерпевает хаотические изменения, вызванные как природными явлениями, так и деятельностью человека. Наиболее подробный анализ результатов исследований этих явлений произведен в [8].

Флуктуации электромагнитного поля в инфранизкочастотном диапазоне вызывают флуктуации плотности вертикального тока атмосферного электричества. При решении задачи обнаружения маловысотных целей, являющихся носителем электрического заряда посредством регистрации возмущений электромагнитного поля в диапазоне инфранизких частот [3], эти флуктуации определяют предел чувствительности устройств, регистрирующих это явление, и прямым образом влияют на оценку параметров полезного сигнала. Их аналитическая оценка крайне затруднена и может иметь недостоверный характер. Как отмечается в [8], данные теоретических расчетов, выполненных различными авторами в сходных условиях, различаются на порядок. По этой причине при оценке уровня флуктуаций плотности тока смещения в диапазоне частот полезного сигнала наиболее целесообразно использовать данные экспериментальных исследований, произведенных непосредственно на месте установки регистрирующего устройства.

Так как число источников помех, вызывающих флуктуацию плотности тока атмосферного электричества, достаточно велико [8], то независимо от закона распределения флуктуаций каждого из них закон распределения флуктуаций совместного события можно считать нормальным. Это обстоятельство существенно упрощает аппаратурное определение среднеквадратичного значения флуктуации этого тока.

Экспериментальная часть

Экспериментальные данные измерений среднеквадратичного значения флуктуаций этого тока с использованием двух независимых регистрирующих устройств, проведенные автором совместно с А.И. Прохоровым и В.Г. Игнатовичем на авиаполигоне «Ружаны» в июле 1986 г. во время проведения натурных испытаний по обнаружению низколетающих целей, составили для аппарата №1 $\sigma \Delta j = 1,16 \cdot 10^{-20} \text{ А/см}^2$; для аппарата №2 $\sigma \Delta j = 1,06 \cdot 10^{-20} \text{ А/см}^2$. Полученные результаты могут быть использованы в качестве ориентировочных при оценке порога чувствительности регистрирующего устройства.

Плотность тока смещения как функция тока излучателя I_m и расстояния R до источника излучения, высоты полета h имеет вид [3]:

$$\delta_{\theta, M}(t) = \frac{I_m \cdot h \cdot \sin \theta}{4\pi} \times \left[\frac{\sin\left(\omega t - \frac{\omega R}{c}\right)}{R^3} + \frac{\omega}{R^2 \cdot c} \cdot \cos\left(\omega t - \frac{\omega R}{c}\right) \right] \quad (4)$$

Как видно из (4), плотность тока смещения $\delta_{\theta, M}(t)$ имеет две составляющие, одна из которых убывает обратно пропорционально кубу расстояния, другая убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от источника излучения. В качестве критерия, определяющего преобладающее влияние одной из составляющих, примем условие, когда одна из них на порядок меньше другой, т.е.

$$0,1 \frac{1}{R^3} \geq \frac{\omega}{R^2 \cdot c}. \quad (5)$$

$$\text{При } F=30 \text{ Гц имеем: } 0,1 \frac{1}{R^3} \geq \frac{6,28 \cdot 30}{R^2 \cdot 3 \cdot 10^8}; R \leq 160 \text{ км.}$$

Таким образом, при $R \leq 160$ км амплитудное значение плотности тока смещения $\delta_{\theta_{\max}}$ (при $\theta = 90^\circ$) можно считать определяемой первым слагаемым (4):

$$\delta_{\theta_{\max}} = \frac{I_m \cdot h}{4\pi R^3}. \quad (6)$$

Совершенно идентичное выражение для плотности тока смещения $\delta_{\theta_{\max}}$ в ближней зоне получается и в случае, если плотность тока смещения рассматривать как функцию изменения напряженности электрического поля [3].

Из уравнения (6) можно определить максимальную дальность обнаружения НЛЦ предлагаемым способом:

$$R_{\max} \leq \sqrt[3]{\frac{i \cdot h}{4\pi \cdot \Delta j_{\text{пр. мин}}} \cdot \frac{V_i}{V_{\text{экв}}}}, \quad (7)$$

где i – ток заряда ЛА в установившемся режиме полета; h – высота полета; $\frac{V_i}{V_{\text{экв}}}$ – относительные изменения объема зоны индукции собственного заряда ЛА за счет изменения рельефа местности и предметов на ней по трассе полета (рис. 2); $\Delta j_{\text{пр. мин}}$ – порог чувствительности регистрирующего устройства, определяемый уровнем флуктуации плотности вертикального атмосферного тока в диапазоне частот полезного сигнала. Согласно экспериментальным исследованиям, он принят равным 10^{-20} А/см².

Рассчитанная по (7) дальность обнаружения самолета АН-26 при $h=50$ м, преодолеваемом перепаде высот $\Delta h=5$ м, $\Delta j_{\text{пр. мин}}=10^{-20}$ А/см² и при данных для этого типа ЛА значений i [3] составляет (50÷60) км. При проведении натурных испытаний (июль 1986 г., полигон Ружаны) для ЛА АН-26 при высоте полета $h=50$ м дальность обнаружения составила около 70 км.

Эффект изменения уровня вертикальных токов электричества атмосферы, вызванный низколетящей целью [3, 4], может быть положен в основу принятия решения о наличии цели в пределах дальности обнаружения. Этот эффект будет проявляться в большей мере при уменьшении высоты полета: Δh от высоты полета h не зависит, а при увеличении h увеличивается площадь зоны индукции ($S=4\pi h^2$), что приводит к появлению дополнительных знакопеременных составляющих тока смещения, вызванного изменением емкости системы «ЛА – поверхность Земли», которые могут компенсировать друг друга.

Заключение

Представленный в данной работе материал является результатом многолетних теоретических и экспериментальных исследований автора по пассивному методу радиолокации и может быть использован для практической реализации проблемы обнаружения маловысотных целей, являющихся носителем электрического заряда, определения их местоположения, мониторинга физических полей околоземного воздушного пространства, обусловленных движущимися маловысотными целями.

Автор выражает благодарность сотрудникам кафедры радиотехнических систем БГУИР Игнатовичу В.Г. и Прохорову А.И. за участие в изготовлении регистрирующих устройств и в проведении натурных испытаний, главному штурману 26 Воздушной Армии генерал-майору авиации Сахарову М.Г. за организацию и участие в проведении натурных испытаний по обнаружению маловысотных целей в 1985-1986 гг.

AIRCRAFT DETECTION AT LOW AND EXTREME LOW ALTITUDES THROUGH PASSIVE MACROWAVE RADIOLOCATION

R.G. KHEKHNEV

Abstract

This article deals with describing of the means of electrically charged aircraft detection while they are flying at low and extremely low altitudes (20-60 metres). The equation to count the range of detection that depends on parameters of static electrification of low altitude flying aircraft, on relief nature with its objects in the flying track, on the level of natural interferences on the range of infrared frequencies, on sensitivity of the device that registers the phenomena stated by the author is given.

Список литературы

1. *Именитов И.М.* Электризация самолетов в облаках и осадках. Л, 1970.
2. *Небабин В.Г., Сергеев В.В.* Методы и техника радиолокационного распознавания. М, 1984.
3. *Хехнев Р.Г.* Способ Хехнева обнаружения низколетящего объекта, являющегося носителем электрического заряда. №3155419/24-09. Заявл. 22.08.86.
4. *Красовский А.А.* // Изв. РАН. Теория и системы управления, 1998. №3.
5. *Бессонов Л.А.* Теоретические основы электротехники. М, 1967.
6. *Именитов И.М.* Приборы и методы для изучения электричества атмосферы. М, 1975.
7. *Илюкович А.М.* Техника электрометрии. М, 1976.
8. *Александрова М.С.* Флуктации электромагнитного поля Земли в диапазоне сверхнизких частот. М., 1972.