

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВОЗМУЩЕНИЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ, СОЗДАВАЕМОГО ВЕРТОЛЕТОМ

Нефёдов Д. С., Курилович В. В., Дубков А. В.

Кафедра тактики и вооружения ЗРВ факультета ПВО, Учреждение образования "Военная академия Республики Беларусь

Минск, Республика Беларусь

E-mail: VARB\_NefedovDS@tut.by

*В докладе представлена математическая модель временной структуры возмущений вертикальной составляющей напряженности электрического поля в точке наблюдения на земной поверхности, создаваемых вертолетами на малых и предельно малых высотах. Особенностью модели является учет составляющей электрического заряда вертолета, обусловленной вращением лопастей несущего винта.*

## ВВЕДЕНИЕ

В процессе решения задач электростатической локации летательных аппаратов (ЛА), основанной на обработке возмущений напряженности электрического поля земли, решаются задачи обнаружения, определения координат и распознавания.

Экспериментальные исследования выявили наличие в амплитудно-частотном спектре (АЧС) сигналов электростатической локации, создаваемых вертолетами, составляющей, обусловленной электрическим зарядом несущего винта (модуляционной составляющей) [1].

Наличие модуляционной составляющей в зарегистрированных АЧС позволяет решать задачу распознавания вертолетов на основании одного из методов, который широко используется для радиолокационного распознавания [2].

Распознавание ЛА по возмущениям естественного электрического поля Земли, по аналогии с задачей радиолокационного распознавания, является статистической задачей. Для ее решения необходимо математическое описание входных воздействий при условии наличия и отсутствия полезных сигналов, создаваемых ЛА распознаваемых классов.

В докладе представлена математическая модель возмущений напряженности электрического поля, создаваемых вертолетами на малых и предельно малых высотах.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВХОДНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Сигналы в электрической локации описываются математической моделью возмущений напряженности электрического поля, создаваемых электрическим зарядом ЛА (полезный сигнал), и естественными флуктуациями напряженности электрического поля Земли (помеховый сигнал).

Самолеты и крылатые ракеты, в зависимости от высоты полета, представляются точечным или линейно распределенным электрическим зарядом постоянным на интервале наблюдения [3, 4]. Электрический заряд вертолета, ввиду враще-

ния лопастей несущего винта с большой скоростью, включает постоянную  $q_k$  и изменяющаяся на интервале наблюдения составляющую электрического заряда  $q_{vm}$ , обусловленную вращением несущего винта.

Математическая модель временной структуры возмущений напряженности электрического поля, создаваемых перемещением заряда вертолета и естественными флуктуациями электрического поля Земли в точке наблюдения на земной поверхности может быть представлена выражением:

$$E_{vi} = E_{ki} + E_{vmi} + E_{shi},$$

где  $E_{ki}$  – дискретный отсчет напряженности электрического поля, создаваемой зарядом  $q_k$ , В/м;  $E_{vmi}$  – дискретный отсчет модуляционной составляющей напряженности электрического поля, создаваемой зарядом  $q_m$ , В/м;  $E_{shi}$  – напряженность флуктуаций электрического поля Земли, В/м;  $i = 1...N$  – количество дискретных отсчетов на интервале наблюдения.

Напряженность электрического поля, создаваемая перемещением заряда  $q_k$ , описывается известной функцией времени с неизвестными параметрами  $\lambda_a, \lambda_\tau$  [4]:

$$E_{ki} = \frac{\lambda_a \lambda_\tau^3}{(\lambda_\tau^2 + t_i^2)^{\frac{3}{2}}}. \quad (2)$$

Параметры  $\lambda_a, \lambda_\tau$  зависят от величины электрического заряда, высоты, скорости и параметра полета вертолета относительно точки наблюдения.

Напряженность модуляционной составляющей  $E_{vm}$  можно аппроксимировать функцией времени  $\sin(2\pi f_{vm} t_i)$ . Частота модуляционной составляющей  $f_{vm}$  зависит от скорости вращения несущего винта вертолета. Полученное эмпирически выражение для данной частоты имеет вид:

$$f_{vm} = \frac{N_{ob}}{k_{vm}}, \quad (3)$$

где  $N_{ob}$  – частота вращения вала несущего винта вертолета, об/мин;  $k_{vm}$  – постоянный коэффициент равный 12.

Напряженность электрического поля естественных помех  $E_{shi}$  является случайным процессом, который в дискретном представлении моделируется отсчетами экспоненциально-коррелированных нормально распределенных случайных величин при помощи формирующего фильтра по рекуррентной формуле [3, 5, 6]:

$$E_{shi} = E_0 + \sum_{k=1}^2 (b_f \sigma_{sh}^2 \text{randn}(x) + a_f E_{shi-k}),$$

где  $E_0$  – математическое ожидание унитарной составляющей электрического поля Земли, В/м;  $a_f, b_f$  – коэффициенты формирующего фильтра;  $\sigma_{sh}$  – СКО естественных помех, В;  $\text{randn}(x)$  – функция формирования нормально распределенной случайной величины.

Поскольку значения параметров, представленных в выражениях (2) и (3), отличаются для различных вертолетов, будут отличаться и параметры АЧС, создаваемых ими сигналов. В таблице 1, для примера представлены значения параметров сигналов, создаваемых вертолетами Ми-8 и Ми-24 [7], а на рисунках 1 и 2 их АЧС.

Таблица 1 – Параметры сигналов, создаваемых вертолетами

Параметр	Ми-8	Ми-24
$\lambda_a$ , В/м	0,5...238	0,12...150
$\lambda_\tau$ , с	0,5...4,2	0,5...4,2
$N_{ob}$ , об/мин	192	240
$f_{vm}$ , Гц	16	20

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная математическая модель возмущений напряженности электрического поля, создаваемых вертолетами, может использо-

ваться для решения задач обнаружения и распознавания. Обнаружение целесообразно осуществлять по составляющей АЧС сигналов, создаваемой зарядом  $q_k$ , поскольку ее амплитуда на высотах полета вертолета 50...200 метров превышает уровень естественных помех на 20...30 дБ. Для решения задачи распознавания необходимо использовать отличия параметров АЧС сигналов, создаваемых различными типами вертолетов. Так признаком сигнала вертолета является наличие модуляционной составляющей АЧС, а показателем его принадлежности к одному из типов является значение частоты  $f_{vm}$ .

1. Нефёдов, Д. С. Экспериментальные исследования сигнала вертолета в электростатической локации / Д. С. Нефёдов, В. В. Курилович, А. В. Дубков // Сборник научных статей курсантов УО "ВАРБ". – 2018. – № 16. – С. 101–106.
2. Небабин, В. Г. Методика и техника радиолокационного распознавания / В. Г. Небабин, В. В. Сергеев. – М.: Радио и связь, 1984. – 153 с.
3. Мелец, А. Ф. Обнаружение и дистанционное измерение электрического заряда маловысотных аэродинамических объектов: дис. ... канд. техн. наук: 20.02.14 / А. Ф. Мелец. – Минск, 1991. – 193 л.
4. Нефёдов, Д. С. Экспериментальные исследования по оценке скорости полета неуправляемых авиационных ракет с использованием модуля пассивной электростатической локации / Д. С. Нефёдов, А. Ф. Мелец // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2015. – № 4. – С. 96–103.
5. Нефедов, Д. С. Имитационная модель электростатической многопозиционной системы пассивной локации маловысотных летательных аппаратов / Д. С. Нефедов, А. Ф. Мелец // Информационные технологии в образовании, науке и производстве : II Международная научно-техническая интернет-конференция, 4 декабря 2014 г. Секция: Информационные технологии в производстве и научных исследованиях [Электронный ресурс]. – [Б. и.], 2014.
6. Быков, В. В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике / В. В. Быков. – М.: Советское радио, 1971. – 328 с.
7. Вертолет Ми-24. Техническое описание, кн. IV. Авиационное оборудование. М.: Машиностроение. – 1982 г.

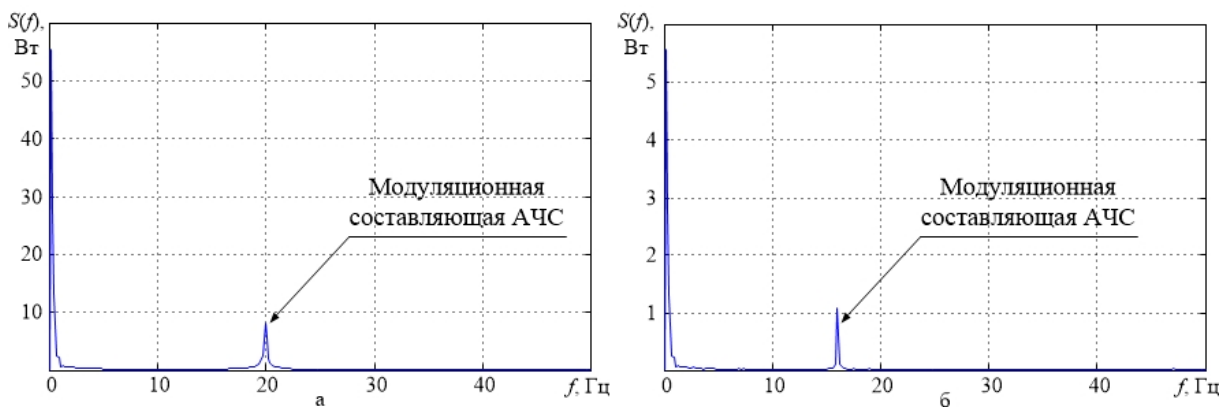


Рис. 1 – Амплитудно-частотные спектры сигналов, создаваемых вертолетами Ми-24 (а) и Ми-8 (б)