

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ МНОГОПОЗИЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПАССИВНОЙ ЛОКАЦИИ МАЛОВЫСОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Д. С. Нефёдов, А. Ф. Мелец

Военная академия Республики Беларусь, Минск, e-mail: nooff85@mail.ru

Введение

Одним из перспективных способов пассивного обнаружения летательных аппаратов (ЛА) на малых и предельно малых высотах, является регистрация возмущений естественного электрического поля Земли. Эти возмущения возникают вследствие перемещения электрического заряда, накапливаемого на корпусе ЛА. Перспективность данного способа подтверждена теоретическими и экспериментальными исследованиями, проведенными за рубежом, а также в Республике Беларусь [1–3].

Реализация способа обнаружения ЛА по возмущениям электрического поля осуществляется многопозиционной электростатической системой пассивной локации (СПЛ), включающей N_d пространственно разнесенных электростатических датчика. На сегодняшний день авторами разработана структура такой системы, алгоритмы функционирования, а также комплексная имитационная модель системы. Модель может использоваться при проектировании и эксплуатации электростатической СПЛ для решения следующих задач:

1. На этапе проектирования:

- формирование представления о физических процессах, протекающих в системе;
- оценка влияния факторов случайного происхождения на функционирование системы;
- выбор оптимальных по заданному критерию параметров устройств системы;
- проверка работоспособности, оценка характеристик и показателей качества разработанных алгоритмов функционирования системы.

2. На этапе эксплуатации:

- определение характеристик и параметров системы для конкретных условий применения;
- выработка практических рекомендаций по изменению состава и параметров системы для обеспечения выполнения поставленных задач в конкретных условиях обстановки.

Структурная схема имитационной модели электростатической СПЛ

Разработанная имитационная модель описывает все этапы функционирования системы, включающие:

- размещение системы с заданным количеством датчиков на местности;
- формирование траектории полета ЛА;
- формирование входных воздействий электростатических датчиков;
- обработку входных воздействий электростатическими датчиками;
- совместную обработку выходной информации датчиков.

Структурная схема имитационной модели представлена на рисунке 1, на котором обозначено: ПНП–У – преобразователь напряженности электрического поля в напряжение с усилителем; УВПС – устройство выделения полезного сигнала; УФПО – устройство формирования порога обнаружения; УПР – устройство принятия решения; N_d, r_d – количество и расстояние между датчиками; q, φ, V, H – электрический заряд, курс, скорость и высота полета ЛА; E_0 – математическое ожидание унитарной составляющей электрического поля Земли; σ_{fl} – среднеквадратическое отклонение (СКО) флуктуационной составляющей электрического поля Земли; E_c, E_p – матрицы отсчетов полезного сигнала и естественных помех на входе электростатических датчиков; E_n – входное воздействие n -го датчика; A_n, t_n – решение об обнаружении и время обнаружения ЛА n -м датчиком; A_c – решение об обнаружении ЛА

системой; φ_{oc} , V_{oc} – оценки курса и скорости полета ЛА системой.

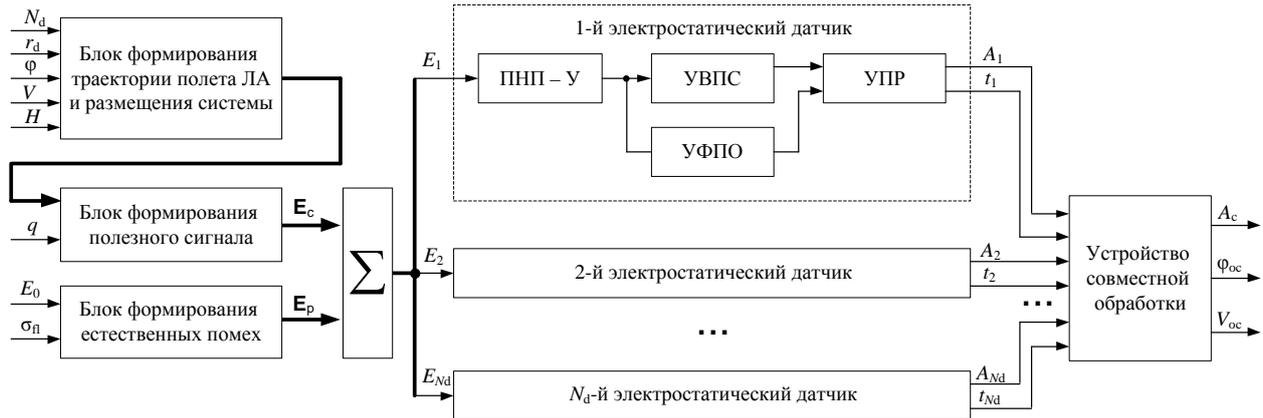


Рисунок 1 – Структурная схема имитационной модели электростатической СПЛ

Представленная имитационная модель реализована в среде программирования MATLAB R2014.

Функционирование имитационной модели электростатической СПЛ

Исходными данными для модели являются параметры ЛА (q , φ , V , H), естественных помех (E_0 , σ_n), количество и размещение электростатических датчиков на местности, расстояние между ними.

Входное воздействие каждого датчика системы представляет собой аддитивную смесь естественных флуктуаций электрического поля и возмущений, вызванных перемещением заряженного ЛА. Формирование возмущений электрического поля, вызванных перемещением ЛА, для точки размещения датчика относительно траектории полета, осуществляется по выражению [4]:

$$E_{ci} = \frac{2k_0 q H}{[P^2 + H^2 + (i\Delta t - t_z)V^2]^{3/2}}, \quad (1)$$

где k_0 – электрическая постоянная, $9 \cdot 10^9$ м / Ф;

P – параметр полета ЛА относительно датчика, м;

Δt – интервал дискретизации, с;

t_z – задержка сигнала в датчике относительно момента начала отсчета времени, с.

Естественные флуктуации электрического поля в каждом датчике моделируются как отсчеты экспоненциально коррелированных нормально распределенных случайных величин при помощи формирующего фильтра по рекуррентной формуле [5]:

$$E_{pi} = E_0 + \sum_{k=1}^2 b_{ffk} \sigma_n^2 \text{randn}(i-k) + \sum_{k=1}^2 a_{ffk} E_{pi-k}, \quad (2)$$

где a_{ff} , b_{ff} – коэффициенты формирующего фильтра;

$\text{randn}(x)$ – функция формирования отсчетов гауссовской случайной величины.

Сформированные входные воздействия проходят обработку в электростатических датчиках. Обработка включает преобразование напряженности электрического поля в напряжение, компенсацию естественных помех, выделение полезного сигнала, формирование порога обнаружения, принятие решения об обнаружении ЛА датчиком и оценку времени обнаружения.

Преобразование напряженности электрического поля и компенсация естественных помех осуществляются моделью преобразователя напряженности. Модель преобразователя учитывает геометрические размеры чувствительного элемента, а также параметры входной цепи. Выходной сигнал преобразователя описывается выражением:

$$U_{\text{pnp}_i} = \sum_{k=1}^3 b_{\text{pnp}_k} E_{i-k} + \sum_{k=1}^4 a_{\text{pnp}_k} U_{\text{pnp}_{i-k}}, \quad (3)$$

где \mathbf{a}_{pnp} , \mathbf{b}_{pnp} – коэффициенты ПНП–У.

Отсчеты сигнала с выхода устройства компенсации помех поступают на устройство формирования адаптивного порога обнаружения. В состав данного устройства включен регистр сдвига, условно разделенный на три области. L отсчетов первой и третьей области регистра используются для вычисления оценок СКО естественных помех и формирования порога обнаружения по алгоритму выбора наименьшего [6]:

$$z_0 = \chi_{\text{lt}} \min \left(\frac{1}{L} \sqrt{\sum_{l=1}^L U_{\text{pnp}_l}}; \frac{1}{L} \sqrt{\sum_{l=L+N}^{2L+N} U_{\text{pnp}_l}} \right), \quad (4)$$

где χ_{lt} – коэффициент учитывающий требуемый уровень ложных тревог датчика и вид обработки сигнала в УВПС;

L – размер «окна» оценки СКО помехи;

N – размер области анализа.

N отсчетов второй области регистра, или области анализа, передаются на УВПС. Размеры указанных областей задаются при моделировании.

В УВПС выполняется свертка отсчетов сигнала с отсчетами импульсной характеристики фильтра по выражению:

$$Z_i = \sum_{k=1}^N U_{\text{pnp}_{i-k}} h_k, \quad (5)$$

где \mathbf{h} – отсчеты импульсной характеристики УВПС, определяемые формой ожидаемого полезного сигнала на выходе ПНП–У.

Результат обработки передается на УПР, в котором сравнивается с порогом. В случае обнаружения ЛА электростатический датчик формирует решение об обнаружении и оценку времени обнаружения, которая соответствует времени максимального по амплитуде отсчета корреляционной суммы (5).

Выходная информация датчиков (решения об обнаружении и оценки времен обнаружения) используется для совместной обработки, включающей обнаружение и определение координат ЛА.

Обнаружение ЛА системой осуществляется на основании алгоритма суммирования частных решений об обнаружении ЛА датчиками [7]:

$$Z_c = \sum_{i=1}^{N_d} A_i. \quad (6)$$

Порог обнаружения, с которым сравнивается сумма (6), определяется критерием обнаружения « n из N_d », где n – количество датчиков, принятие решения об обнаружении ЛА которыми обеспечит принятие системой решения об обнаружении.

Для определения координат в электростатической системе из каждой тройки датчиков, обнаруживших ЛА формируются измерительные ячейки. В измерительных ячейках оцениваются направление и скорость полета ЛА. Итоговые оценки координат формируется путем весового объединения частных оценок. Весовые коэффициенты, характеризующие точность оценок параметров полета ЛА в измерительных ячейках системы, зависят от ошибок топографической привязки датчиков, расстояния между ними, скорости, направления полета ЛА и ошибок оценок времен обнаружения.

В результате функционирования имитационная модель электростатической СПЛ выдает решение об обнаружении ЛА системой, а также оценки направления и скорости полета обнаруженного ЛА.

На рисунке 2 и в таблице 1 представлены результаты функционирования модели электростатической СПЛ, состоящей из четырех датчиков, при обнаружении сигнала создаваемо-

го ЛА со значением собственного заряда 10^{-5} Кл, летящего на высоте 200 м со скоростью 300 м / с. Датчики размещены в две линии на расстояниях 400 м друг от друга.

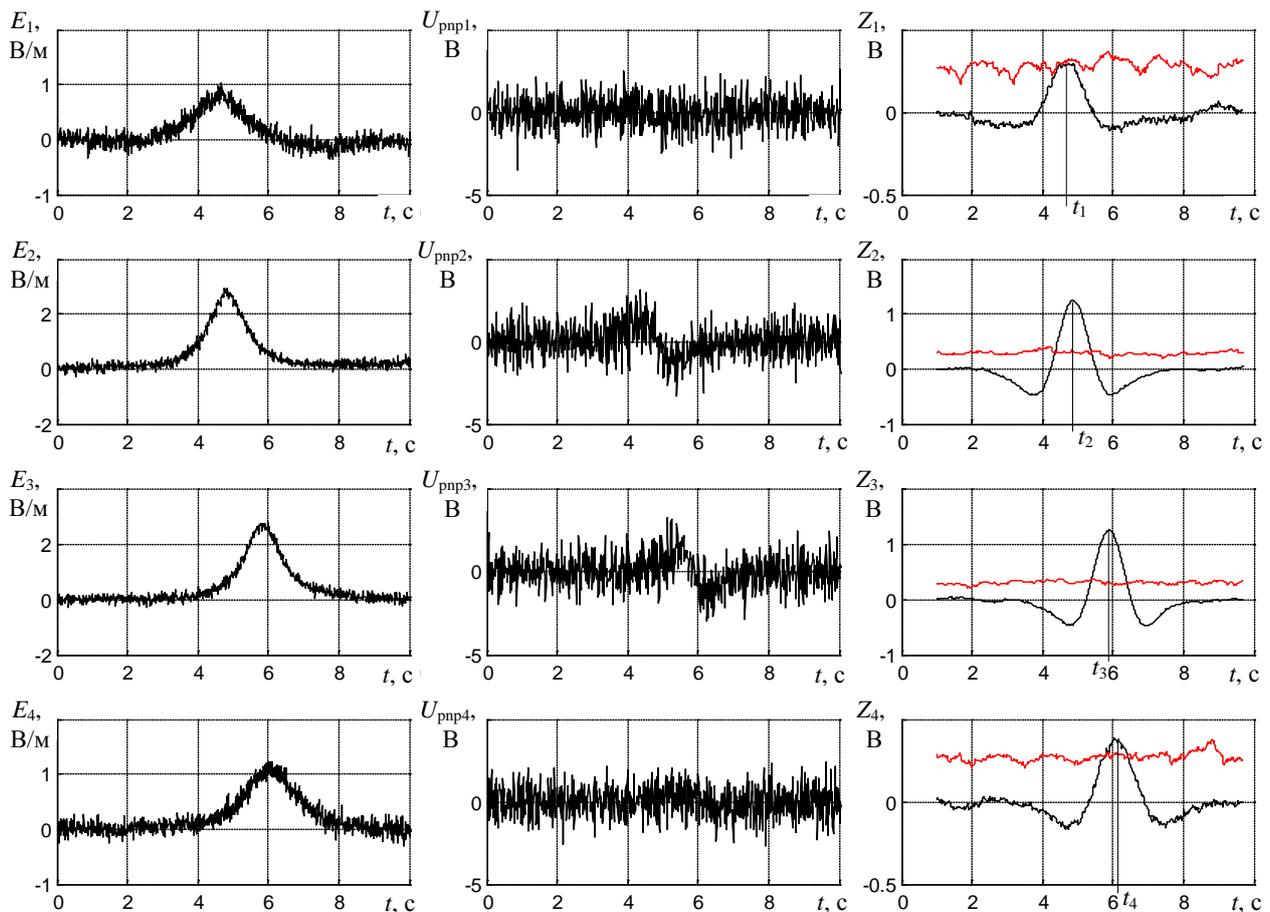


Рисунок 2 – Пример функционирования модели электростатической СПЛ

Таблица 1 – Результаты расчета параметров ЛА

Параметр	t_z, c	t, c	$\Delta t, c$	A	$\varphi, \text{град}$	$\varphi_{oc}, \text{град}$	$\Delta \varphi, \text{град}$	$V, \text{ м / с}$	$V_{oc}, \text{ м / с}$	$\Delta V, \text{ м / с}$
Датчик 1	4,59	4,66	0,07	1	10	9,4	0,6	300	306,5	6,5
Датчик 2	4,82	4,88	0,06	1						
Датчик 3	5,84	5,89	0,05	1						
Датчик 4	6,08	6,1	0,02	1						

Из рисунка 2 и таблицы 1 видно, что в результате пролета ЛА обнаружен всеми четырьмя датчиками системы. Ошибка определения направления полета ЛА составила 0,6 град, скорости – 6,5 м / с.

Примеры использования имитационной модели электростатической СПЛ

Рассмотрим результаты оценки некоторых показателей качества электростатического датчика и системы в целом.

Одним из показателей качества электростатического датчика является вероятность правильного обнаружения ЛА. Для получения оценки вероятности правильного обнаружения методом моделирования можно воспользоваться выражением [8]:

$$\hat{D}_{po} = \frac{\sum_{k=1}^{N_{op}} A_k}{N_{op}}, \quad (7)$$

где N_{op} – количество модельных экспериментов.

Многократно повторяя моделирование для различных значений заряда ЛА строятся характеристики обнаружения электростатического датчика, как зависимости вероятности

правильного обнаружения от отношения сигнал / шум при фиксированной вероятности ложной тревоги.

Характеристики обнаружения ЛА, летящего на высоте 200 м со скоростью 300 м / с, полученные с использованием имитационной модели электростатической СПЛ, изображены на рисунке 3. На второй оси ординат рисунка 3 отмечены значения заряда ЛА, соответствующие значениям отношения сигнал / шум.

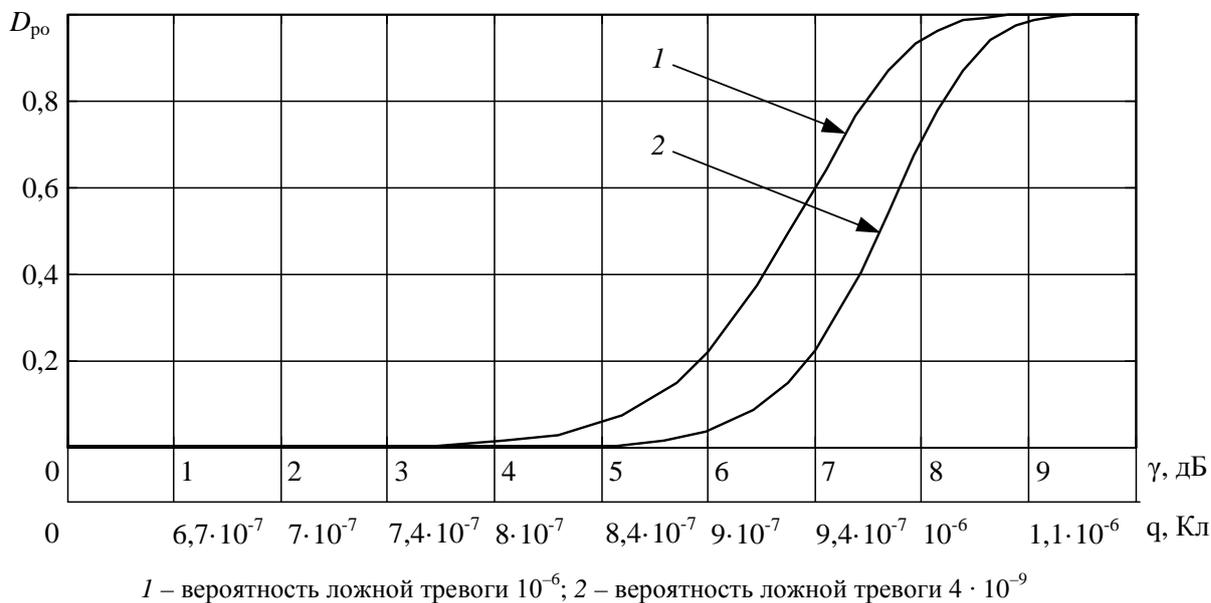


Рисунок 3 – Характеристики обнаружения электростатического датчика

Из анализа представленных зависимостей определяется отношение сигнал / шум, необходимое для обнаружения ЛА с заданными вероятностями правильного обнаружения и ложной тревоги. Например, для обнаружения ЛА с вероятностью не менее 0,9 при вероятности ложной тревоги 10⁻⁶ отношение сигнал / шум на выходе УВПС должно составлять не менее 8 дБ. На высоте 200 м указанное отношение сигнал / шум достигается при значении заряда ЛА 10⁻⁶ Кл.

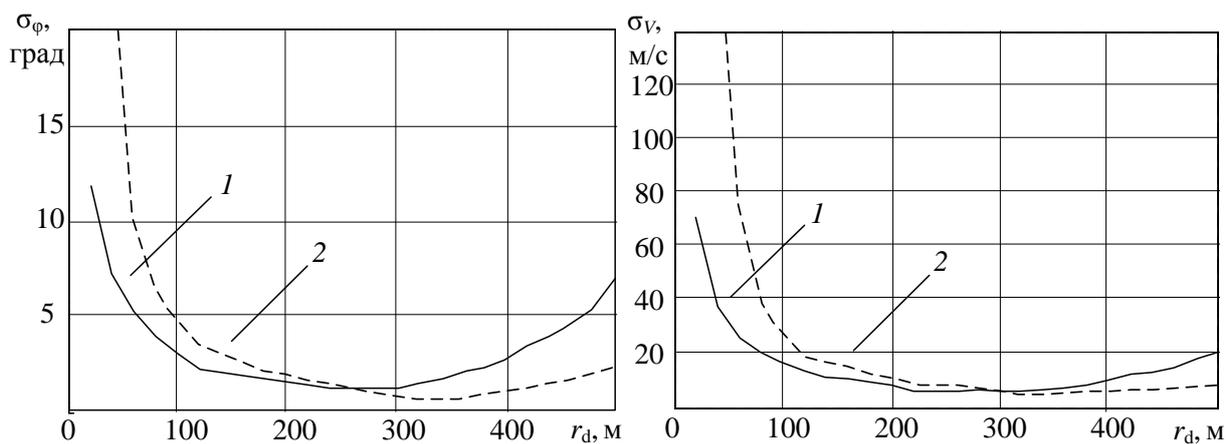
В качестве примера оценки показателей качества электростатической СПЛ рассмотрим СКО ошибок определения направления и скорости полета ЛА алгоритма определения координат.

Для получения искомых СКО осуществляется следующая последовательность действий:

1. Формирование траектории полета ЛА и реализаций входных воздействий системы датчиков.
2. Обработка входных воздействий системой датчиков, включающая обнаружение и оценку времени обнаружения ЛА датчиками, совместное обнаружение и определение координат обнаруженного ЛА.
3. Сравнение истинных значений координат с полученными оценками.
4. Расчет СКО оценок координат в результате многократного повторения процедур по пунктам 1–3.

На рисунке 4 изображены зависимости СКО ошибок определения направления и скорости полета ЛА со значением собственного заряда 10⁻⁵ Кл, летящего на высоте 200 м со скоростью 300 м / с, от расстояния между датчиками системы.

Полученные зависимости позволяют оценить потенциальную точность алгоритмов определения координат ЛА электростатической СПЛ, а также определить расстояние между датчиками при котором ошибки определения координат минимальны.



1 – направление полета 0 град; 2 – направление полета 30 град

Рисунок 4 – Зависимости СКО ошибок определения координат ЛА электростатической СПЛ

Заключение

Разработанная имитационная модель электростатической СПЛ предназначена для оценки параметров системы и показателей качества ее функционирования. Достоинствами модели является простота, высокая степень приближения к результатам натурных испытаний макета системы. Применение имитационной модели позволяет оценивать показатели качества системы в зависимости от алгоритмов обработки, параметров устройств, размещения датчиков на местности, факторов естественного происхождения. Это ограничивает количество проводимых натурных экспериментальных исследований, а также обеспечивает достижение максимально возможных показателей качества системы в заданных условиях функционирования.

Список литературы

1. Успенский, А.К. Вопросы теории и техники использования электростатических полей для локации объектов: дис. ... д-ра техн. наук: 20.02.14 / А.К. Успенский. – Минск, 1979. – 414 л.
2. Trinks, H. Electric field detection and ranging of aircraft / H. Trinks, J.L. Ter Haseborg // IEEE Transactions on AES-18. – 1982. – № 3. – С. 268–274.
3. Method and Apparatus for Detecting Sources of Projectiles: пат. 7,765,083 B2 US, G01C 17/00 / P.A. Zank, M. Mercier; заявитель BAE Systems Inform. and Electronic Systems Integration INC – № 7,765,083 B2; заявл. 8.06.2005; опубл. 27.07.2010.
4. Фейнман, Р. Фейнмановские лекции по физике / Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. – М.: Мир, 1966. – Вып. 5: Электричество и магнетизм. – 1966. – 296 с.
5. Быков, В.В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике / В.В. Быков. – М.: Советское радио, 1971. – 328 с.
6. Rohling, H. Range CFAR Techniques / H. Rohling // Теория и техника передачи, приема и обработки сигналов: Сб. тез. докл. 10-й юбилейной Междунар. науч. конф. – Харьков – Туапсе, 2004 г. / Харьков, 2004. – С. 178–188.
7. Черняк, В.С. Многопозиционная радиолокация / В.С. Черняк. – М.: Радио и связь, 1993. – 418 с.
8. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Наука, 1988. – 480 с.