

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОИНДУКЦИОННОГО ДАТЧИКА ДЛЯ ОТСЛЕЖИВАНИЯ ПОДВИЖНЫХ И НЕПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

В статье реализуется пространственная модель отслеживания траектории с использованием динамических параметров положения объекта, а также траектории движения источника электрического поля. Результаты моделирования показывают высокую точность при оценке взаимосвязи между составляющими электрического поля и изменением положения. Результаты хорошо согласуются с результатами анализа методом конечных элементов. Также используется соотношение между ошибкой измерения составляющей электрического поля, горизонтальным углом, углом места и точностью отслеживания для анализа эффективности отслеживания. Кроме того, метод может быть совмещен с пространственно-временными координатами, и в таком случае конфигурация адаптируется под текущие условия при сохранении максимальной эффективности системы оценки в целом и позволяет прогнозировать изменения положения объекта как источника поля.

Ключевые слова: электрометрические измерения, электрическое поле, трехкоординатный электроиндукционный датчик, подвижные объекты.

Введение. С одной стороны, окружающая среда по своей природе является динамичной, как и отдельные источники электрического поля (ЭП), так и существует необходимость давать оценку ЭП в положении движения датчика (например, с использованием беспилотных воздушных систем) или другие аэрокосмические объекты [1]) для оценки параметров в произвольном местоположении, которые также могут быть не постоянными и во времени.

В работе [2] представлено использование датчика в нефтепромысловых хранилищах.

Стоит отметить, что техническое оснащение постоянно совершенствуется и усложняется. При разработке платформы контроля параметров ЭП [3, 4] задача оценки представляется для объектов наблюдений, находящихся в неподвижном состоянии на стационарной области. Для этого рассматривается применение направления IoT в задаче комплексной оценки ЭП на различных объектах.

В работе [5] предусматривается вариант, когда датчик может быть утерян для системы, например, неисправность связи или поломка датчика, в таком случае нейроконфигурация сохраняется и адаптируется по текущим условиям с сохранением максимальной эффективности системы, при этом объекты наблюдений также находятся в неподвижном состоянии.

Датчики параметров ЭП широко используются в различных отраслях народного хозяйства. Важно отметить, что в работе [6] представлены разработанные конструкции датчиков и сделаны оценки параметров ЭП, а в работе [7] представлен новый датчик в составе платформы контроля параметров ЭП.

Например, в работе [8] трехмерный датчик электрического поля и датчик диэлектрической проницаемости используются для обнаружения пространственного ЭП, а трехмерная система ЭП предлагается для проведения измерения этого поля.

Однако эти исследования не могут отслеживать траекторию движения объекта наблюдения в реальном времени при одновременном измерении ЭП.

Стоит обратить внимание на работу [9], в которой представлена модель отслеживания грозового облака, которая не учитывает положение движения первичного датчика. Важно отметить, что эффективные методы мониторинга оценки параметров ЭП в режиме реального времени особенно важны для оценки эффективной защиты и прогнозирования опасных влияний ЭП на окружающие объекты.

Постановка задачи. При использовании датчика в оценке подвижных и неподвижных объектов наблюдений важно реализовать локализацию источника в реальном времени. Поэтому следует не только оценивать параметры ЭП, но и отслежи-

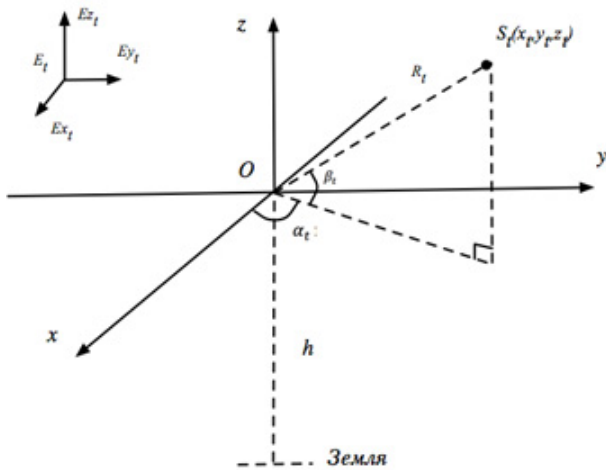


Рис. 1. Пространственная модель для отслеживания траектории движения

вать движение объекта и при этом определять динамические параметры положения. Необходимо учесть в значениях результирующих трехмерных компонент ЭП определение динамических параметров положения объекта и тем самым реализовать слежение за движением.

Также важно принять во внимание не только высокие метрологические характеристики оценки параметров ЭП, но и эффективность отслеживания движения в режиме реального времени с учетом изменяющихся параметров.

Краткая теория. На основе трехмерной системы координат упрощаем область наблюдаемого объекта до точечного заряда [10]. Получаем модель отслеживания траектории движения наблюдаемого объекта на рис. 1.

На рис. 1 представлена трехмерная система координат, с началом координат в точке O . Тогда точка O с координатами $(0, 0, 0)$ будет задавать положение изотропного электроиндукционного датчика.

В свободной точке пространства $S_i(x_i, y_i, z_i)$ — динамическое положение точки S_i исследуемого объекта, изменяющееся во времени T ; h — высота устройства относительно нулевого положения, соответственно, динамический горизонтальный угол и угол вертикальный относительно точки S_i ; R_i — расстояние в реальном времени от точки S_i до устройства O ; E_i — напряженность электрического поля в реальном времени в точке S_i , измеренная прибором; E_{xi}, E_{yi}, E_{zi} — напряженность ЭП относительно осей x, y, z .

Из рис. 1 видно, что при обнаружении источника ЭП рядом с датчиком ЭП, то будет накапливаться большое количество заряда. В это время ЭП, создаваемое источником поля, будет восприниматься трехмерным датчиком ЭП.

После этого координаты точки объекта могут быть получены расчетным путем, что может служить источником данных для отслеживания траектории движения объекта.

Отслеживание пути движущегося объекта. Важно отметить, что определение местоположения объекта для интерпретации отслеживания пути движения грозового облака имеет важное практическое значение для прогнозирования и предупреждения изменения параметров ЭП.

Согласно теории о том, что наведенный заряд равен зеркальному заряду в методе зеркального

отображения [10], область объекта рассматривается как точечный заряд q , а распределение потенциала φ_T точки в реальном времени относительно точки движения S_i получается следующим образом:

$$\varphi_T = \frac{1}{4\pi\epsilon_1} \left(\frac{q}{\sqrt{x_T^2 + y_T^2 + (z_T - h)^2}} - \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + \epsilon_1} \frac{q'}{\sqrt{x_T^2 + y_T^2 + (z_T + h)^2}} \right). \quad (1)$$

В уравнении (1) q' — это заряд изображения точечного заряда q . ϵ_1 и ϵ_2 — диэлектрическая проницаемость воздуха и земли, на которой находится датчик O .

Поскольку напряженность ЭП, измеряемая датчиком, представляет собой трехмерный вектор, который можно представить в ортогональном разложении:

$$E_T = E_{x,T} + E_{y,T} + E_{z,T} \quad (2)$$

Если взять производные от распределения потенциала по направлениям осей x, y и z , то получаем

$$\begin{aligned} E_{x,T} &= \frac{\partial \varphi_T}{\partial x_T} = \\ &= \frac{-qx_T}{4\pi\epsilon_1} \left\{ \frac{[x_T^2 + y_T^2 + (z_T - h)^2]^{-3/2}}{\epsilon_2 + \epsilon_1} - \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + \epsilon_1} \frac{[x_T^2 + y_T^2 + (z_T + h)^2]^{-3/2}}{\epsilon_2 + \epsilon_1} \right\}, \\ E_{y,T} &= \frac{\partial \varphi_T}{\partial y_T} = \\ &= \frac{-qy_T}{4\pi\epsilon_1} \left\{ \frac{[x_T^2 + y_T^2 + (z_T - h)^2]^{-3/2}}{\epsilon_2 + \epsilon_1} - \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + \epsilon_1} \frac{[x_T^2 + y_T^2 + (z_T + h)^2]^{-3/2}}{\epsilon_2 + \epsilon_1} \right\}, \\ E_{z,T} &= \frac{\partial \varphi_T}{\partial z_T} = \\ &= \frac{-q}{4\pi\epsilon_1} \left\{ \frac{(z_T - h)[x_T^2 + y_T^2 + (z_T - h)^2]^{-3/2}}{\epsilon_2 + \epsilon_1} - \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + \epsilon_1} \frac{(z_T + h)[x_T^2 + y_T^2 + (z_T + h)^2]^{-3/2}}{\epsilon_2 + \epsilon_1} \right\}. \quad (3) \end{aligned}$$

Допустим, что параметр координат объекта может превышать высоту h :

$$z_T \approx z_T - h \approx z_T + h. \quad (4)$$

Согласно рис. 1, расстояние R_T от точки S_T датчика O — это:

$$R_T = \sqrt{x_T^2 + y_T^2 + z_T^2}. \quad (5)$$

Уравнения (4) и (5) используем в уравнении (3) и получим:

$$\begin{cases} E_{x,T} = m(1-n)R_T^{-3}x_T, \\ E_{y,T} = m(1-n)R_T^{-3}y_T, \\ E_{z,T} = m(1-n)R_T^{-3}z_T. \end{cases} \quad (6)$$

В уравнении (6)

$$m = -\frac{q}{4\pi\epsilon_1} \text{ и } n = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + \epsilon_1}.$$

В уравнении (6) используются сферические координаты $(R_T, \alpha'_T, \beta'_T)$ расположения точки S_i , меняющейся во времени t .

$$\begin{cases} R'_T = \sqrt{\frac{m^2(1-n)^2}{E_{x,T}^2 + E_{y,T}^2 + E_{z,T}^2}}, \\ \alpha'_T = \arctan \frac{E_{y,T}}{E_{x,T}}, \\ \beta'_T = \arctan \frac{\varepsilon_1 E_{z,T}}{\varepsilon_2 \sqrt{E_{x,T}^2 + E_{y,T}^2}}. \end{cases} \quad (7)$$

В уравнении (7) R'_T — это инверсное значение R_T от объекта S_T до датчика O . α'_T и β'_T — значения инверсии динамического горизонтального угла α'_T и вертикального угла β'_T .

Когда точечный заряд q и $\varepsilon_1, \varepsilon_2$, диэлектрическая проницаемость известны, координаты объекта ($R'_T, \alpha'_T, \beta'_T$) в реальном времени связаны с трехмерными векторами электрического поля. Соответственно, если $E_{x,T}, E_{y,T}, E_{z,T}$ определены, то и траекторию движения объекта можно рассчитать.

Обозначим набор P динамических координат объекта, изменяющихся во времени T , определяет-ся как

$$P = \left\{ (R'_T, \alpha'_T, \beta'_T), (R'_{T_1}, \alpha'_{T_1}, \beta'_{T_1}), \dots, (R'_{T_n}, \alpha'_{T_n}, \beta'_{T_n}) \right\}. \quad (8)$$

В выражении (8) T_1, T_2, \dots, T_n — это первая, вторая и n -ая точка времени в соответствии с координатами объекта ($R'_{T_1}, \alpha'_{T_1}, \beta'_{T_1}$), ($R'_{T_2}, \alpha'_{T_2}, \beta'_{T_2}$), ..., ($R'_{T_n}, \alpha'_{T_n}, \beta'_{T_n}$).

Используя для расчета положения объекта выражения (7) и (8), возможно реализовать отслеживание траектории подвижного объекта наблюдения.

Результаты. Проведем анализ результатов отслеживания пути подвижных объектов наблюдения.

Предположим, что диэлектрическая проницаемость воздуха ε_1 принимается равной 1, диэлектрическая проницаемость земли ε_2 , на которой находится датчик, принимается равной 5. Кроме того, добавим стандартное отклонение σ_{Ei} компонентов измерения ЭП для общей производительности метода отслеживания.

Формула координат объекта наблюдения является основой метода отслеживания его движущегося пути. Согласно теории погрешности косвенного измерения [11, 12], погрешность измерения $\sigma_{R'}$, $\sigma_{\alpha'}$, $\sigma_{\beta'}$ расстояния R'_T , горизонтального угла α'_T и вертикального угла β'_T , обусловленная погрешностью измерения составляющей ЭП, может быть получена по выражению (7):

$$\begin{cases} \sigma_R = \sqrt{\left(\frac{\partial R'_T}{\partial E_{x,T}}\right)^2 \sigma_{E_i}^2 + \left(\frac{\partial R'_T}{\partial E_{y,T}}\right)^2 \sigma_{E_i}^2 + \left(\frac{\partial R'_T}{\partial E_{z,T}}\right)^2 \sigma_{E_i}^2}, \\ \sigma_\alpha = \sqrt{\left(\frac{\partial \alpha'_T}{\partial E_{x,T}}\right)^2 \sigma_{E_i}^2 + \left(\frac{\partial \alpha'_T}{\partial E_{y,T}}\right)^2 \sigma_{E_i}^2 + \left(\frac{\partial \alpha'_T}{\partial E_{z,T}}\right)^2 \sigma_{E_i}^2}, \\ \sigma_\beta = \sqrt{\left(\frac{\partial \beta'_T}{\partial E_{x,T}}\right)^2 \sigma_{E_i}^2 + \left(\frac{\partial \beta'_T}{\partial E_{y,T}}\right)^2 \sigma_{E_i}^2 + \left(\frac{\partial \beta'_T}{\partial E_{z,T}}\right)^2 \sigma_{E_i}^2}. \end{cases} \quad (9)$$

Выражение (9) еще более упрощается, и получаем:

$$\begin{cases} \sigma_R = \frac{6}{5} \pi^{3/2} R_T'^3 \sigma_{E_i}, \\ \sigma_\alpha = \frac{12}{5} \pi R_T'^2 \sqrt{1 + 25 \tan^2 \beta'_T} \sigma_{E_i}, \\ \sigma_\beta = \frac{12}{25} \pi R_T'^2 \cos \beta'_T \times \\ \times \sqrt{(1 + 24 \sin^2 \beta'_T)(1 + 25 \tan^2 \beta'_T)} \sigma_{E_i}. \end{cases} \quad (10)$$

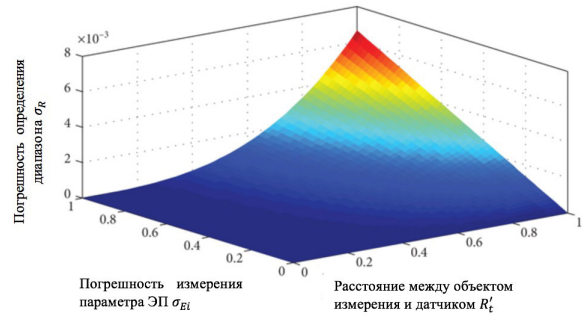


Рис. 2. График погрешности измерения расстояния объекта наблюдения

В выражении (10) ошибка σ_R отслеживания связана только с ошибкой измерения расстояния R'_T и ошибкой измерения ЭП, не зависящей от горизонтального угла α'_T и вертикального угла β'_T . Кроме того, ошибки $\sigma_{\alpha'}$, $\sigma_{\beta'}$ связаны с расстоянием R'_T , вертикальным углом β'_T и погрешностью измерения ЭП σ_{Ei} , но не зависят от угла α'_T .

Следовательно, при практическом применении метода отслеживания получаем независимость результата от изменения угла горизонтального отклонения. В пределах максимального диапазона измерения изотропного электроиндукционного датчика, чем меньше расстояние R'_T и погрешность измерения ЭП σ_{Ei} , тем выше будет точность измерения дальности и определение местоположения объекта представленными расчётами.

Выражение (10) используется для изучения взаимосвязи между расстоянием R'_T , погрешностью измерения ЭП σ_{Ei} и погрешностью определения дальности метода слежения σ_R . Результаты моделирования показаны на рис. 2.

На рис. 2 погрешность определения дальности методом слежения σ_R увеличивается с увеличением расстояния R'_T и ошибки измерения электрического поля σ_{Ei} . Когда расстояние R'_T находится в диапазоне от 0 до 0,55 км, погрешность измерения дальности σ_R меньше зависит от погрешности измерения электрического поля σ_{Ei} и σ_{Rmax} и достигает только 1 м. Однако когда расстояние R'_T превышает 0,55 км, ошибка дальности σ_R резко возрастает с увеличением ошибки σ_{Ei} и σ_{Rmax} и достигает 6,4 м. Точно так же, когда ошибка измерения электрического поля σ_{Ei} меньше 0,15 кВ/м, погрешность дальности σ_R меньше зависит от расстояния R'_T и σ_{Rmax} и достигает только 1 м. Однако при погрешности измерения электрического поля σ_{Ei} от 0,15 до 1 кВ/м погрешность возрастает σ_R до 6,4 м с увеличением расстояния R'_T . Несмотря на то, что погрешность дальности σ_R этого метода неизбежна, она находится в измеримом диапазоне и показывает хорошие характеристики дальности отслеживания.

При анализе погрешности определения местоположения датчиком ЭП, согласно выражению (10), исследование взаимосвязи между расстоянием R'_T , углом β'_T объекта наблюдения и погрешностью измерения его горизонтального угла σ_α . Представим анализ на рис. 3.

На рис. 3 погрешность измерения горизонтального угла σ_α метода слежения увеличивается с увеличением расстояния R'_T и вертикального угла β'_T . Когда расстояние r' составляет от 0 до 0,42 км, на погрешность измерения меньше влияет вертикальный угол β'_T , тогда погрешность измерения σ_α

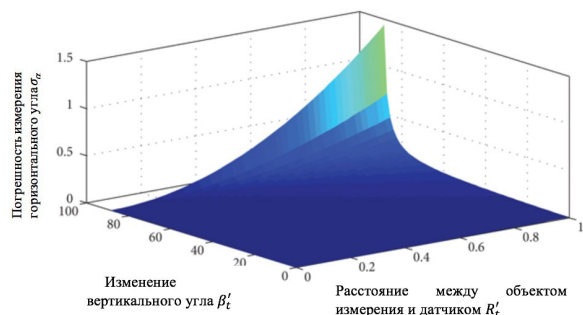


Рис. 3. График анализа погрешности измерения горизонтального угла

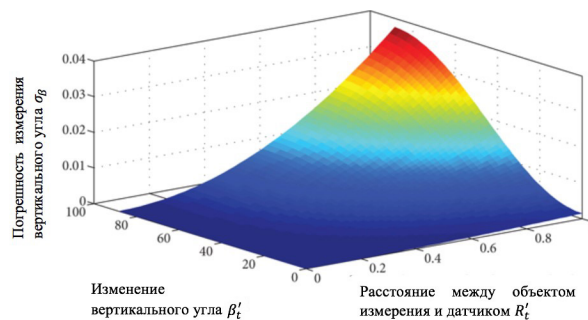


Рис. 4. График анализа погрешности измерения угла положения

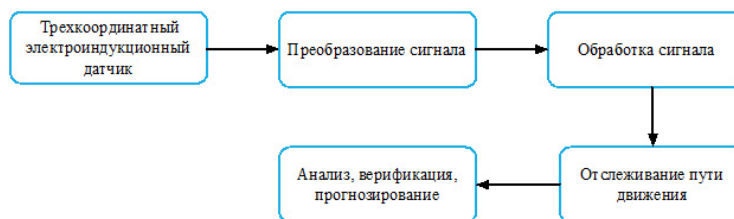


Рис. 5. Обобщенная структурная схема системы

составляет менее 0,2 градуса; однако когда расстояние r' превышает 0,42 км, погрешность измерения σ_α экспоненциально возрастает с увеличением угла β'_T и достигает 1,07 градуса. Когда расстояние R'_T и угол β'_T становятся еще больше, погрешность σ_α резко возрастает с увеличением этих двух величин. Однако в большинстве случаев ни то, ни другое практически не влияет на погрешность σ_α .

Используя выражение (10), представим взаимосвязи между расстоянием R'_T , вертикального угла β'_T места объекта измерения и погрешностью измерения его угла σ_β , а результаты моделирования представим на рис. 4.

На рис. 4 погрешность измерения угла σ_β при отслеживании положения увеличивается с увеличением расстояния R'_T и угла β'_T ; при расстоянии от 0 до 0,35 км погрешность измерения σ_β меньше зависит от угла β'_T и достигает только 0,005 градуса; когда расстояние R'_T превышает 0,35 км, погрешность измерения σ_β медленно возрастает до 0,0375 градуса по мере увеличения угла. Точно так же, когда угол β'_T меньше 30 градусов, погрешность σ_β почти не зависит от расстояния R'_T и $\sigma_{\beta\max}$ достигает только 0,01 градуса. Однако когда расстояние R'_T и угол β'_T значительно увеличиваются, погрешность измерения также возрастает только до 0,0375 градуса.

На точность определения места положения влияет дальность расстояния между целевым объектом измерения и датчиком. Из рис. 3 и рис. 4 легко увидеть, что, как только предельная дальность обнаружения прибора превышена, кривая, вызванная этим влиянием, становится все более резкой, а погрешность значительно возрастает. Однако, хотя погрешности определения места положения нельзя избежать, величина невелика и все еще поддается обнаружению и может быть учтена в последующих расчетах.

Моделирование системы и конструкции изотропного электроиндукционного датчика. Для практической реализации спроектирована система (рис. 5), включающая изотропный электроиндукционный датчик [6], в котором объединены блок изме-

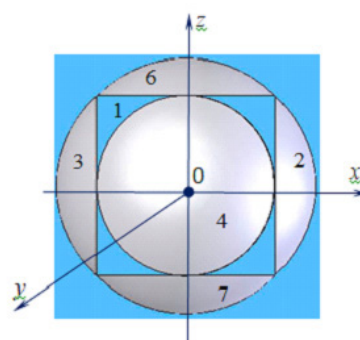


Рис. 6. Изотропный датчик напряженности электрического поля

рения ЭП блока калибровки ЭП и блока измерения диэлектрической проницаемости для оценки смежных объектов. Также объединяем данные локализации источника ЭП и данных геоположения для анализа экспериментальных результатов.

Один из вариантов конструкций изотропного электроиндукционного датчика схематично представлен на рис. 6.

Датчик представляет собой проводящее сферическое основание 1, на поверхности которого изолированно от него и друг от друга по трем координатным осям диаметрально расположены три пары проводящих чувствительных элементов. По оси x : 2 и 3, по оси y : 4 и 5 (на рис. 6 не показан), по оси z : 6 и 7. Чувствительные элементы выполнены в форме сферических сегментов, толщина которых много меньше радиуса сферического основания датчика. На чувствительных элементах, расположенных по трем координатным осям датчика, формируются сигналы, пропорциональные трем составляющим вектора напряженности ЭП E_x , E_y и E_z . Путем их геометрического суммирования получают модуль вектора напряженности ЭП $E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$. Принцип действия датчика основан на явлении электростатической индукции.

Выводы и заключения. Таким образом, исследуя взаимосвязь между компонентой ЭП и физической величиной положения объекта наблюдения, можем сделать возможным отслеживание траектории движения. Получено соотношение координат объекта наблюдения с моментом времени. На основе изотропного датчика ЭП установлена модель отслеживания траектории движения объекта наблюдения.

Стоит отметить, что фактически положение объекта нельзя определить по одномерной составляющей ЭП, что приводит к недостаточной способности предупреждения в практическом применении, поэтому важно использовать именно оценку трех составляющих ЭП.

Общие характеристики определения параметров ЭП движущегося объекта наблюдения, места положения методом отслеживания пути движения объекта достаточны. В реальных экспериментах могут быть введены такие алгоритмы, как объединение данных и компенсация точности, чтобы уменьшить негативное влияние рода нелинейного поведения на производительность определения местоположения грозных облаков.

Результаты исследования показывают, что этот метод может точно отслеживать траекторию движения объекта наблюдения, и, кроме того, этот метод комбинируется с обработкой данных специализированной библиотекой Python [13] с геопозиционированием объекта, что позволяет лучше прогнозировать значение параметров ЭП с изменениями направления движения.

Библиографический список

1. Da X., Shen H., Hong L. Aircraft electric field measurements: recent research status and key technologies // Journal of the Academy of Equipment Command and Technology. 2008. Vol. 19, no. 3. P. 80–84.
2. Koto M., Okabe S. Multipoint measurement of electric field in oil gap by using electric field measurement systems based on Kerr effect // IEEE Transactions on Power and Energy. 2006. Vol. 126, no. 3. P. 321–326. DOI: 10.1541/ieejpes.126.321.
3. Колмогорова С. С., Колмогоров А. С., Баранов Д. С., Мокряк А. В. Платформа контроля электромагнитного поля для обеспечения безопасности труда и промышленных объектов // Безопасность труда в промышленности. 2022. № 2. С. 58–63. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-2-58-63.
4. Колмогорова С. С., Бирюков С. В., Колмогоров А. С., Баранов Д. С. Автоматизированный программно-технический комплекс системы сбора и интеллектуальной обработки данных // Приборы. 2022. № 7 (265). С. 48–55. EDN PKYAOE.
5. Колмогорова С. С., Романов Н. О. Программные модули децентрализованных беспроводных измерительных систем: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2022666361; заявл. 24.08.22; опубл. 31.08.22.
6. Колмогорова С. С., Бирюков С. В. Проектирование электроиндукционных датчиков и средств измерений элек-

трических полей. Санкт-Петербург: ООО Реноме, 2022. 180 с. ISBN 978-5-00125-731-8. DOI: 10.25990/7bky-3e46.

7. Колмогорова С. С., Бирюков С. В., Колмогоров А. С., Баранов Д. С. Расчет характеристик многоэлектродного датчика и оценка его эффективности при использовании в составе платформы сбора и обработки данных // Приборы. 2022. № 8 (266). С. 1–13.
8. Xing H., He G., Ji X. Analysis on electric field based on three dimensional atmospheric electric field apparatus // Journal of Electrical Engineering and Technology. 2018. Vol. 13, no. 4. P. 1696–1703. DOI: 10.5370/JEET.2018.13.4.1696.
9. Yang X., Xing H., Wei X. [et al.]. A Moving Path Tracking Method of the Thunderstorm Cloud Based on the Three-Dimensional Atmospheric Electric Field Apparatus // Journal of Sensors. 2021. Vol. 9. P. 1–13. DOI:10.1155/2021/8856033.
10. Миролубов Н. Н., Костенко М. В., Левинштейн М. А. Методы расчёта электростатических полей. Москва: Высшая школа, 1963. 415 с.
11. Пиотровский Я. Теория измерений для инженеров: пер. с польск. Москва: Мир, 1989. 335 с.
12. Leberl F. Introduction to the mathematics of inversion in remote sensing and indirect measurement // Tectonophysics. 2013. Vol. 65, no. 3. P. 376–378.
13. Колмогорова С. С., Кутузов М. Е. Обработка измерительных данных алгоритмами искусственного интеллекта: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2022666360; заявл. 24.08.22; опубл. 31.08.22.

КОЛМОГорова Светлана Сергеевна, кандидат технических наук, преподаватель кафедры «Информационные системы и технологии» Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 4216-9920

ORCID: 0000-0001-8032-0095

ResearcherID: E-4652-2017

Адрес для переписки: ss.kolmogorova@mail.ru

БИРЮКОВ Сергей Владимирович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры физики Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 9384-0078

ORCID: 0000-0002-1362-9911

AuthorID (SCOPUS): 7006438919

Адрес для переписки: sbiryukov154@mail.ru

Для цитирования

Колмогорова С. С., Бирюков С. В. Использование электроиндукционного датчика для отслеживания подвижных и неподвижных объектов наблюдений // Омский научный вестник. 2023. № 2 (186). С. 140–146. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-140-146.

Статья поступила в редакцию 09.02.2023 г.

© С. С. Колмогорова, С. В. Бирюков

¹Saint Petersburg State
Forest Technical University
named after S. M. Kirova,
Saint Petersburg, Russia

²Omsk State Technical University,
Omsk, Russia

USING ELECTRO-INDUCTIVE SENSOR TO TRACE MOVING AND NON-MOVING OBJECTS TRACKED

The research carries out a spatial model of path tracking using the dynamic parameters of the object's position, as well as the path of motion of electric field source. The simulation results show high accuracy in estimating the dependence between the electric field components and position modifications. The results are in good agreement with the results of FEM analysis. The connection between the measurement error of the electric field component, horizontal angle, location angle, and tracking accuracy is also used to analyze the tracking performance. In addition, the method can be combined with spatiotemporal coordinates, in which case the configuration becomes appropriate to the current conditions while maintaining maximum efficiency of the estimation system as a whole and allows predicting changes in the position of the object as a field source.

Keywords: electrometric measurements, electric field, three-coordinate electroinductive sensor, moving objects.

References

1. Da X., Shen H., Hong L. Aircraft electric field measurements: recent research status and key technologies // Journal of the Academy of Equipment Command and Technology. 2008. Vol. 19, no. 3. P. 80–84. (In Engl.).
2. Koto M., Okabe S. Multipoint measurement of electric field in oil gap by using electric field measurement systems based on Kerr effect // IEEE Transactions on Power and Energy. 2006. Vol. 126, no. 3. P. 321–326. DOI: 10.1541/ieejpes.126.321. (In Engl.).
3. Kolmogorova S. S., Kolmogorov A. S., Baranov D. S., Mokryak A. V. Platforma kontrolya elektromagnitnogo polya dlya obespecheniya bezopasnosti truda i promyshlennykh ob'yektov [Electromagnetic field monitoring platform for ensuring occupational and industrial facilities safety] // Bezopasnost' truda v promyshlennosti. *Occupational Safety in Industry*. 2022. No. 2. P. 58–63. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-2-58-63. (In Russ.).
4. Kolmogorova S. S., Biryukov S. V., Kolmogorov A. S., Baranov D. S. Avtomatizirovanny programmno-tekhnicheskii kompleks sistemy sbora i intellektual'noy obrabotki dannykh [Computerized software and hardware complex of the system of data collection and intelligent processing] // Pribory. *Instruments*. 2022. No. 7 (265). P. 48–55. EDN PKYAOE. (In Russ.).
5. Kolmogorova S. S., Romanov N. O. Programmnyye moduli detsentralizovannykh besprovodnykh izmeritel'nykh sistem: cvidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2022666361 [Software modules for decentralised wireless measuring systems: Certificate of State Registration of a Computer Programme. No. 2022666361]. (In Russ.).
6. Kolmogorova S. S., Biryukov S. V. Proyektirovaniye elektroinduktsionnykh datchikov i sredstv izmereniy elektricheskikh poley [Design of electro-induction sensors and electric field measuring instruments]. Saint Petersburg, 2022. 180 p. ISBN 978-5-00125-731-8. DOI: 10.25990/7bky-3e46. (In Russ.).
7. Kolmogorova S. S., Biryukov S. V., Kolmogorov A. S., Baranov D. S. Raschet kharakteristik mnogielektrodnogo diskovogo datchika i otsenka ego effektivnosti pri ispol'zovanii v sostave platformy sbora i obrabotki dannykh [Multi-electrode disk sensor performance analysis and assessment of its application as part of a data acquisition and processing platform] // Pribory. *Instruments*. 2022. No. 8 (266). P. 1–13. (In Russ.).
8. Xing H., He G., Ji X. Analysis on electric field based on three dimensional atmospheric electric field apparatus // Journal of Electrical Engineering and Technology. 2018. Vol. 13, no. 4. P. 1696–1703. DOI: 10.5370/JEET.2018.13.4.1696. (In Engl.).
9. Yang X., Xing H., Wei X. [et al.]. A Moving Path Tracking Method of the Thunderstorm Cloud Based on the Three-Dimensional Atmospheric Electric Field Apparatus // Journal of Sensors. 2021. Vol. 9. P. 1–13. DOI:10.1155/2021/8856033. (In Engl.).
10. Mirolubov N. N., Kostenko M. V., Levinshteyn M. L. Metody raschata elektrostaticheskikh poley [Calculation methods for electrostatic fields]. Moscow, 1963. 415 p. (In Russ.).
11. Piotrovskiy Ya. Teoriya izmereniy dlya inzhenerov [Measurement theory for engineers] / trans. from Polish. Moscow, 1989. 335 p. (In Russ.).
12. Leberl F. Introduction to the mathematics of inversion in remote sensing and indirect measurement // Tectonophysics. 2013. Vol. 65, no. 3. P. 376–378. (In Engl.).
13. Kolmogorova S. S., Kutuzov M. E. Obrabotka izmeritel'nykh dannykh algoritmi iskusstvennogo intellekta: cvidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM [Measurement data processing by artificial intelligence algorithms: Certificate of State Registration of a Computer Programme]. No. 2022666360. (In Russ.).

KOLMOGOROVA Svetlana Sergeyevna, Candidate of Technical Sciences, Lecturer of Information Systems and Technology Department, Saint Petersburg State Forest Technical University named after S. M. Kirova, St. Petersburg.

SPIN-code: 4216-9920

ORCID: 0000-0001-8032-0095

ResearcherID: E-4652-2017

BIRYUKOV Sergey Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Physics Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 9384-0078

ORCID: 0000-0002-1362-9911

AuthorID (SCOPUS): 7006438919

Correspondence address: sbiryukov154@mail.ru

For citations

Kolmogorova S. S., Biryukov S. V. Using electro-inductive sensor to trace moving and non-moving objects tracked // Omsk Scientific Bulletin. 2023. No. 2 (186). P. 140 – 146. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-140-146.

Received February 09, 2023.

© S. S. Kolmogorova, S. V. Biryukov