

References

1. Roslyakov A.V. *Virtualnye tyastnye seti. Osnovy postroeniya i primeneniya* [Virtual private networks. Bases of construction and application]. Moscow, Eco-Trends Publ. 2006. 304 p.
2. Cruz R.L. A calculus for network delay. Part I, II. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1991, vol. 37, no. 1, pp. 114–141.
3. Litvinov G.L. Decvantovanie Maslova, idempotentnaya i tropicheskaya matematika: kratkoe vvedenie [The Maslov dequantization, idempotent and tropical mathematics: a brief introduction]. *Teoriya predstavleniy, dinamicheskie sistemy, kombinatornye i algoritmicheskie metody, XIII, Zapiski nauchnyh seminarov POMI*, 2005, vol. 326, pp. 145-182.
4. Baccelli F., Cohen G., Olsder G.J., Quadrat J.P. *Synchronization and Linearity: An algebra for discrete event systems*. John Wiley & Sons Ltd, 1992. 485 p.
5. Le Boudec J.-Y., Thiran P. *Network Calculus: A Theory of Deterministic Queuing Systems for the Internet*. Springer-Verlag, 2012. 263 p.
6. Jiang Y., Yong L. *Stochastic Network Calculus*. Springer-Verlag, 2008. 240 p.
7. Lenzini L., Mingozzi E., Stea G. A Methodology for Computing End-to-end Delay Bounds in FIFO-multiplexing Tandems. *Elsevier Performance Evaluation*, 2008, vol. 65, pp. 922–943.
8. Lenzini L., Martorini L., Mingozzi E., Stea G.. Tight End-to-end Per-flow Delay Bounds in FIFO Multiplexing Sink-tree Networks. *Performance Evaluation*, 2006, vol. 63, pp. 956-987.
9. Bisti L., Lenzini L., Mingozzi E., Stea G. Numerical analysis of worst-case end-to-end delay bounds in FIFO tandem networks. *Real-Time Systems*, 2012, vol. 48, no. 5, pp. 527-569.
10. Website of the Computer Networking Group at the University of Pisa. Available at: <http://cng1.iet.unipi.it/wiki/index.php/Deborah>, continuously updated (accessed:15.12.2016).

Received 08.01.2017

НОВЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК УДК 621.396

ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЛОКАЦИИ ТРАСС ПОДЗЕМНЫХ ПРОТЯЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Бурдин В.А., Кубанов В.П.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ
E-mail: burdin@psati.ru

В статье рассматриваются потенциальные возможности реализации метода электромагнитной локации трасс протяженных подземных сооружений с помощью беспилотных летательных аппаратов (дронов). Рассмотрены преимущества технологии с использованием беспилотных летательных аппаратов. Изложены основные положения электромагнитной локации трасс подземных сооружений. Представлен анализ особенностей реализации методов электромагнитной локации при использовании дронов. Подробно рассмотрены проблемы поиска трассы и определения глубины залегания подземного сооружения при измерении распределений уровней электромагнитного поля с помощью беспилотных летательных аппаратов. Представлены варианты технических решений этих проблем. Показано, что применение беспилотных летательных аппаратов для электромагнитной локации вполне реально, а возникающие при этом проблемы имеют технические решения.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, дрон, электромагнитная локация, кабелеискатель, подземное сооружение, кабель, трубопровод, трасса, глубина прокладки

Введение

За последнее десятилетие технологии, использующие беспилотные летательные аппараты (БПЛА), или, по-другому, дроны, играют все большую роль в различных областях деятельности

человеческого общества. Если на первых порах БПЛА рассматривали в основном с точки зрения военных приложений [1], то в настоящее время их широко используют в нефтегазодобывающей промышленности, геологоразведке, сельском хозяйстве, лесном хозяйстве, строительстве, поис-

ково-съёмочные работах, оказании медицинской помощи, поисково-спасательных и аварийно-спасательных работах и многих других отраслях [2-8]. Применение БПЛА в гражданских целях очень широко. Перечислить все задачи, которые успешно решают с помощью дронов, было бы очень сложно. Области их использования включают в первую очередь обеспечение безопасности, управление чрезвычайными ситуациями, аэрофотосъёмка, дистанционное зондирование, видеосъёмка. Это далеко не полный перечень задач, решаемых с помощью беспилотников. На самом деле у них более широкая область применения, и она расширяется год от года. Одним из наиболее востребованных направлений применения БПЛА является строительство и эксплуатация таких объектов, как трубопроводы, кабельные линии и т.п., для которых, учитывая большую протяженность и обширность территории объектов, воздушный мониторинг является наиболее эффективным средством контроля и дистанционного сбора данных о состоянии. Очевидно, что применение БПЛА станет полезным и при поиске трасс прокладки, составлении схем подземных коммуникаций. Технические решения радиолокационного поиска трасс подземных коммуникаций известны [9-14]. Как уже упоминалось, технологии применения дронов пришли из военной практики, а там именно радиолокационные методы поиска и обнаружения объектов наиболее востребованы и распространены [1, 15-16]. Такие системы позволяют получить картину распределения подземных кабелей и труб в различных видах грунта. Однако даже в благоприятных условиях применение радиолокационных методов требует использования достаточно сложных способов обработки результатов измерений, чтобы получить необходимую для специалиста интерпретацию этой картины. По сложности, стоимости, зависимости от условий применения они проигрывают в традиционной наземной практике методу электромагнитной локации [17]. При реализации метода электромагнитной локации на базе БПЛА он получает дополнительное преимущество по сравнению с методами радиолокации. Из полезной нагрузки исключается наиболее массогабаритная и энергопотребляющая составляющая – радиопередатчик. Это позволяет уменьшить массогабаритные параметры и, соответственно, стоимость собственно летательного аппарата. Вместе с тем очевидно, что реализация электромагнитной локации подземных коммуникаций на базе дронов имеет существенные особенности по сравнению

с традиционным наземным применением, которые в итоге и определяют перспективы и проблемы внедрения. Попытка анализа потенциальных возможностей применения БПЛА для электромагнитной локации подземных коммуникаций и предпринята авторами в данной работе.

Основы электромагнитной локации

Электромагнитная локация - это универсальный метод локации и трассировки подземных линий, который обеспечивает поиск с поверхности земли границ трасс подземных кабелей и труб, измерение глубины залегания линии непосредственно с поверхности земли, трассировку и идентификацию определенных линий, локализацию повреждений. Он отличается портативностью, небольшим весом оборудования, возможностью использования оборудования при всех типах грунта и даже воды, а также низкой стоимостью. К основным недостаткам данного метода относится то, что с его помощью невозможно обнаружить неметаллические кабели и трубы.

В основе метода – измерения уровней магнитного поля и анализ их распределения над объектом. Различают пассивный и активный поиск. В первом случае измеряют уровни магнитного поля, создаваемого в однопроводных цепях подземного объекта (кабеля или трубопровода), наведенными в них внешними источниками токами. Эти токи могут наводиться за счет влияния линий электропередачи, электрифицированных железных дорог, радиостанций и т.п. Более эффективен активный поиск. В этом случае к цепи «провод-земля» подземного объекта подключают генератор низких частот и с поверхности земли над объектом измеряют уровни магнитного поля, создаваемого током, протекающим в этой цепи. В качестве проводника цепи «провод-земля» используют жилу, оболочку или броню кабеля, металлическую трубу трубопровода и т.п.

При выборе частоты активной электромагнитной локации руководствуются следующим. Чем выше частота, тем выше эдс, наводимая в антенне приемника. Однако с увеличением частоты возрастает затухание однопроводной линии. Как следствие, сигнал в цепи «провод-земля» распространяется на более короткие расстояния. Необходимо также учитывать, что потери в однопроводной цепи зависят как от типа трубы или кабеля, так и от характера и состояния грунта. С увеличением диаметра трубы или кабеля потери возрастают. Существенную роль играет тип переходов трубы или кабеля. Чем меньше переходное сопротивление цепи «провод-земля», тем

больше затухание. При этом затухание этой цепи возрастает с увеличением проводимости грунта.

Кроме того, с увеличением частоты возрастает уровень помех, наводимых внешними источниками. Возрастает уровень токов, наводимых в рядом проходящих цепях, что значительно затрудняет локализацию искомого объекта в зонах с большим числом коммуникаций.

Таким образом, выбор оптимальной для эффективной локации частоты зависит от типа трубы или кабеля, способа и условий поиска. Однако очевидно, что при активном поиске в подавляющем большинстве случаев целесообразна работа на низких частотах. При этом, естественно, рабочая частота локации не должна быть равна промышленной частоте 50 Гц и ее гармоникам.

В общем случае теория, описывающая электромагнитное поле, создаваемое током одиночного горизонтального проводника, уложенного вблизи поверхности земли, над землей, на земле или под землей, подробно описана в работе [18]. Для низких частот, при условии, что расстояние от точки наблюдения до объекта пренебрежимо мало по сравнению с протяженностью объекта и значительно больше поперечных размеров проводника, формула для расчета напряженности магнитного поля существенно упрощается. Можно полагать, что напряженность магнитного поля на некотором отсчитываемом вдоль линии расстоянии от места подключения генератора и на расстоянии r от проводника равна [19]:

$$H(x) = I(x)/2\pi r. \quad (1)$$

При традиционном наземном поиске методом электромагнитной локации с помощью кабелеискателя местоположение объекта в зависимости от ориентации антенны определяют либо по максимуму сигнала, либо по минимуму сигнала, перемещая антенну перпендикулярно трассе. При поиске по максимуму антенна располагается согласованно с силовыми линиями магнитного поля непосредственно над объектом. При поиске по минимуму антенна располагается так, чтобы непосредственно над объектом она не была согласованна с силовыми линиями магнитного поля.

Погрешности определения трассы подземных коммуникаций определяются в основном двумя факторами. Во-первых, погрешностями определения местоположения максимума (или минимума) напряженности магнитного поля, которые, в частности, зависят от разрешающей способности локатора. Во-вторых, искажениями силовых линий магнитного поля искомого объекта за счет влияния соседних цепей. Большинство ошибок

при определении трассы подземного объекта связано именно с искажением магнитных полей. Существует практически бесконечное множество причин, по которым другие проводники вызывают искажение магнитного поля исследуемого сооружения. Это и расположение их под разными углами к проводнику исследуемого сооружения, и наличие в них различных сигналов, и т.п., и т.д.

Эффективным способом снижения погрешностей локализации является применение двоярных антенн, которые обеспечивают подавление помех, позволяют улучшить разрешающую способность, упрощают измерения глубины залегания [17].

В условиях сложной электромагнитной обстановки (сложная трасса исследуемого объекта, внешние источники электромагнитных воздействий, большое число сторонних подземных коммуникаций рядом с исследуемым объектом) для этих целей более эффективны способы, согласно которым в отличие от традиционной методики применения кабелеискателя трассу прокладки и глубину залегания подземного сооружения определяют в результате анализа распределения электромагнитного поля по участку над сооружением [20 - 24].

Особенности электромагнитной локации на базе БПЛА

Специфика реализации электромагнитной локации на базе БПЛА связана в основном с тем, что антенна с приемником устанавливается на дроне и, как следствие, значительно удаляется от исследуемого подземного сооружения по сравнению с выполнением наземных измерений обычным кабелеискателем. Расстояние может быть увеличено на порядок и более. Это приводит при прочих равных условиях к ослаблению принимаемого сигнала и сглаживанию измеряемых распределений уровней магнитного поля над объектом. Кроме того, добавляется еще составляющие погрешностей локации, обусловленные погрешностями позиционирования БПЛА и изменениями положения корпуса дрона относительно исследуемого сооружения во время полета.

Предварительный анализ показывает, что из-за ослабления принимаемого сигнала вследствие значительного удаления антенны от проводника с током при реализации электромагнитной локации на базе БПЛА целесообразно рассматривать только активный поиск.

К основным способам, позволяющим принимать сигнал и производить измерения на необходимых для полета дрона расстояниях до исследуемого подземного сооружения, следует отнести:

- уменьшение потерь в цепи «провод-земля»;
- увеличение мощности сигнала;
- увеличение чувствительности приемника.

Затухание однопроводной цепи определяет длину участка подземного сооружения, на котором при заданном расстоянии антенны-приемника от сооружения можно определить его местоположение и глубину залегания. Затухание однопроводной цепи, как правило, для определенной линии и частоты сигнала есть величина постоянная, определяемая проводимостью, емкостью и индуктивностью относительно земли и соседних металлических конструкций. Конструктивные параметры для отдельных кабелей и типовых стальных труб, методики расчетов первичных и вторичных параметров их однопроводных цепей и их оценки приведены в работах [24-27]. В частности, отмечено, что типичные значения затухания однопроводной цепи для стальных труб лежат в пределах от 10^{-4} до 10^{-3} 1/м. При этом можно полагать, что затухание однопроводных цепей на низких частотах прямо пропорционально $\sqrt{\omega}$, где ω – круговая частота. Пусть частота генератора изменяется от значения ω_1 до значения ω_2 . Обозначим $\chi = \omega_2 / \omega_1$. Тогда, поскольку наводимая в антенне под действием магнитного поля эдс прямо пропорциональна частоте [28], получаем, что при таком изменении частоты сигнал на входе приемника, расположенного на расстоянии l от генератора по трассе, изменится прямо пропорционально параметру Sk , где:

$$Sk = \chi \exp[\alpha_1 l (1 - \chi)]. \quad (2)$$

На рис. 1 приведены результаты вычислений параметра Sk в зависимости от суммарных потерь в однопроводной цепи для ряда значений параметра χ .

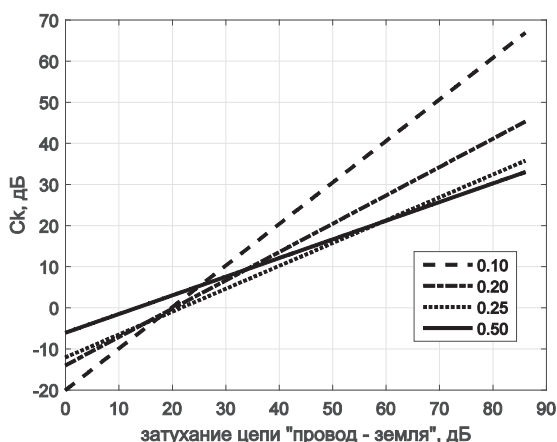


Рис. 1 Изменение уровня детектируемого сигнала при снижении рабочей частоты

Как видим, за счет снижения частоты можно частично скомпенсировать уменьшение уровня сигнала из-за потерь в однопроводной цепи. Но только частично.

Таким образом, при активном поиске ослабление сигнала за счет удаления дрона с антенной на значительное по сравнению с расположением кабелеискателя при обычном наземном выполнении измерений расстояние частично может быть компенсировано снижением рабочей частоты комплекта. Вместе с тем для сложной помеховой обстановки целесообразно иметь набор частот и выбор частоты осуществлять экспериментально.

Увеличение мощности детектируемого сигнала можно осуществить тремя способами:

- за счет выполнения качественного заземления (а при низких частотах надо заземлить однопроводную цепь и на дальнем конце);
- согласованием импеданса за счет управления выходным сопротивлением генератора;
- за счет увеличения мощности генератора.

Последний способ наиболее непрактичный и дорогой. Ток в однопроводной цепи, а значит, и принимаемый приемником сигнал, изменяются пропорционально квадратному корню от мощности генератора. В частности, увеличение мощности генератора в четыре раза приводит лишь к удвоению величины сигнала. При этом подключение высокого напряжения к проводникам объекта требует особого внимания к вопросам техники безопасности.

Исключительно важным параметром комплекта с точки зрения осуществления поиска с антенной на дроне, удаленном на большее по сравнению с приемником наземного кабелеискателя расстояние от подземного сооружения, является чувствительность приемника на рабочей частоте. Приемлемое отношение «сигнал/шум» достигается за счет сочетания высокого усиления и фильтрации сигнала помехи при частотах, отличных от частоты генератора. В работе [29] приводятся данные кабелеискателя, приемник которого на частоте 1,0 кГц с режекторным гребенчатым фильтром, подавляющим не только первую гармонику частотой 50 Гц, но и высшие гармоники, в режиме спектрального разрешения 16 Гц имеет чувствительность -70 дБ, а в режиме спектрального разрешения 4 Гц имеет чувствительность -130 дБ. Увеличить чувствительность можно еще больше, выбирая оптимальные форматы модуляции, кодовые последовательности и формы сигнала. Ослабление сигнала при подъеме антенны на высоту 10 м с поверхности земли при заглушении провода 1,0 м составляет около 20 дБ.

Очевидно, что такое ослабление может быть скомпенсировано вышеперечисленными мерами. По грубым оценкам, в подавляющем большинстве случаев прокладки кабелей и металлических трубопроводов возможен поиск трассы методами электромагнитной локации с БПЛА на участках протяженностью до 20 км и более.

Погрешности, обусловленные изменениями положения дрона в полете, можно уменьшить, применяя трехкоординатные магнитные антенны и стабилизируя положение антенны относительно земли, например как в круглых электронных маркерах [30].

Известно, что системы управления позволяют перемещать дрон по заданным сложным траекториям [31-38], что дает возможность получать данные о распределениях уровней электромагнитного поля на участках на некоторой площади над исследуемым подземным сооружением. Причем можно получать эти распределения для разных высот. Анализ таких распределений, полученных с помощью трехкоординатной магнитной антенны, позволяет снизить влияние помех сторонних источников, улучшить разрешающую способность и снизить погрешность локации трассы и определения глубины прокладки из-за сглаживания распределений уровней магнитного поля при удалении от провода с током, снизить погрешности из-за ошибок позиционирования БПЛА [17, 20-23]. Кроме того, для снижения погрешностей позиционирования БПЛА совместно со спутниковой навигацией используют другие средства навигации (гироскопы, дальнометры, высотометры, датчики перемещений и т.п.). Эффективным средством повышения точности позиционирования является применение роя дронов [32-38]. Очевидно, что использование роя дронов в целом перспективно для регистрации распределений электромагнитного поля при реализации электромагнитной локации. Однако это тема отдельной статьи. Здесь же отметим, что обработку данных целесообразно вести на наземной станции, что допускает применение необходимых вычислительных ресурсов.

Таким образом, применение БПЛА для электромагнитной локации вполне реально, а возникающие при этом проблемы имеют технические решения.

Заключение

В работе представлены результаты анализа потенциальных возможностей электромагнитной локации с использованием БПЛА. Рассмотрены особенности реализации поиска трассы подзем-

ного сооружения данным методом с применением БПЛА. Показано, что применение БПЛА для электромагнитной локации вполне реально, а возникающие при этом проблемы имеют технические решения.

Литература

1. Павлушенко М., Евстафьев Г., Макаренко И. Беспилотные летательные аппараты: история, применение, угроза распространения и перспективы развития // Научные записки ПИР-центра: национальная и глобальная безопасность. 2 (26), 2004. – 611 с.
2. Янников И.М., Фомин П.М., Габричидзе Т.Г., Захаров А.В. Применение беспилотных летательных аппаратов при разведке труднодоступных и масштабных зон чрезвычайных ситуаций // Вектор науки ТГУ. Т. 21, № 3, 2012. – С.49-53.
3. Волгушева Н.Э., Прокофьев Н.А., Бляхарский Д.П. Технология расчета вегетационного индекса на основании данных беспилотной аэрофотосъемки // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. Т. 60, № 2, 2016. – С.71 – 76.
4. Кривичев А.И., Залецкий А.В. Развитие технологий социо-эколого-экономического мониторинга арктической зоны России с применением беспилотных летательных аппаратов // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. Т. 60, № 2, 2016. – С. 77-82.
5. Воробьева Н.Г., Журбин И.В., Князева Л.Ф. Исследование возможностей БПЛА SUPERCAM S350-F в задачах изучения и сохранения археологического наследия // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. Т. 60, № 2, 2016. – С. 83-90.
6. Сингатулин Р.А. Особенности применения стереофотограмметрического мультиспектрального мониторинга в полевых археологических исследованиях // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. Т. 60, № 2, 2016. – С. 90 – 93.
7. Алябьев А.А., Кобзева Е.А., Струнина Е.Н. Стереофотограмметрия и комплексные кадастровые работы // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. Т. 60, № 2, 2016 – С. 99 – 101.
8. Журавлев В.Н., Журавлев П.В. Применение беспилотных летательных аппаратов в отрасли экономики: состояние и перспективы // Научный вестник МГТУ ГА. №226, 2016. – С. 156-164.

9. Hellsten H. Subsurface imaging radar // EP 1 965 223, 03.09.2008.
10. Тригубович Г.М., Саленко С.Д., Обуховский А.Д., Шатилов К.А. Устройство для аэрогеофизической разведки (варианты) // RU 2201603, заявл. 27.05.2002, опубл. 27.03.2003
11. Дикарев В.И., Шубарев В.А., Иванов Н.Н., Калинин В.А. Мобильный георадар для дистанционного поиска местоположения подземных магистральных коммуникаций и определения их поперечного размера и глубины залегания в грунте // RU 2451954, заявл. 08.02.2011, опубл. 27.05.2012.
12. Дикарев В.И., Рогалев В.А., Карамзинов Ф.В., Гумен С.Г., Денисов Г.А. Вертолетная радиолокационная станция // RU 2207588, заявл. 3.04.2001, опубл. 27.06.2003.
13. Авраменко С.В., Лапшин В.С., Блинов И.В., Николаев В.А. Результаты летно-экспериментальных исследований многоцелевого многодиапазонного подповерхностного радиолокатора воздушного базирования // Материалы III Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь». ИРЭ РАН, 2009, С.341-343.
14. Туров В.Е., Кренев А.Н., Ильин Е.М., Селянская Е.А. Перспективные радиолокационные технологии подповерхностного зондирования с борта летательного аппарата // Вестник СибГУТИ. № 2, 2015. – С.122-131.
15. Анцелевич М. А., Карпов А. С., Удавихин А.В., Щербаков Г. Н. Обнаружение проводных линий управления террористическими взрывными устройствами // Спецтехника и связь. № 1, 2009. – С. 30-34.
16. Туров В. Е., Селянская Е. А., Киселева Ю. В., Полубехин А. И., Ильин Е. М. Обзор технических реализаций систем радиолокационного обнаружения объектов в приповерхностном слое грунта // Вестник СибГУТИ. № 3, 2016. – С. 155-163.
17. От А до Я локации и поиск повреждений подземных кабелей и труб для начинающих и специалистов. Авторизованный перевод ЗАО «ПЕРГАМ»// Radiodetection, 1999. – 163 с.
18. Лавров Г.А., Князев А.С. Приземные и подземные антенны. Теория и практика антенн, размещенных вблизи поверхности земли. М: Советское радио, 1965. – 472 с.
19. Иродов И.Е. Основные законы электромагнетизма. М: Высш. школа, 1991.-288 с.
20. Бурдин В.А. Способ определения места повреждения кабельной линии со сложной конфигурацией прокладки кабеля // SV 1765791, заявл. 26.07.1990, опубл. 30.09.1992.
21. Бурдин В.А. Способ определения трассы прокладки и локализации места повреждения кабеля // RU 2350974, заявл. 18.05.2007, опубл. 27.03.2009.
22. Бурдин В.А., Сивков В.С., Сподобаев М.Ю. Методы и алгоритмы поиска оптических кабелей в условиях сложной электромагнитной обстановки // Труды XII МНТК «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций». Казань, 2011. - С.314-315.
23. Бурдин В.А., Прокопьев В.И., Ромодин В.Г., Сивков В.С. Методы локализации поврежденных кабелей на трассах сложной конфигурации// T-Comm. № 8, 2013. - С.33 – 34.
24. Стрижевский И.В., Дмитриев В.И. Теория и расчет влияния электрифицированной железной дороги на подземные металлические сооружения // М.: Стройиздат, 1967. – 248 с.
25. Глазков В.И., Зиневич А.М., Котик В.Г., Никольский К.К., Стрижевский И.В. Защита от коррозии протяженных металлических сооружений. Справочник // М., Недра, 1969. – 311 с.
26. Михайлов М.И., Разумов Л.Д., Соколов С.А. Электромагнитные влияния на сооружения связи // М., Связь, 1979. – 264 с.
27. Вэнс Э.Ф. Влияние электромагнитных полей на экранированные кабели / /М., Радио и связь, 1982. – 120 с.
28. Воскресенский Д.И. Антенны и устройства СВЧ // М.: Советское радио, 1972. - 320 с.
29. Метелев Б., Кочеров А. Поиск повреждений трасс: кабелеискатель изобретен заново// Первая миля. №6, 2013. – С. 54-58.
30. Система электронной маркировки 3M™ Scotchmark™. Шаровые интеллектуальные маркеры. Инструкции по установке // URL: <http://multimedia.3m.com/mws/media/8838750/service-dynatel-image.pdf?fn=>.
31. Fesland S., Nigrón P. Method and device for the scattering of drones on curved paths around one or more reference points // US 5728965, заявл. 09.04.1996, опубл. 17.03.1998.
32. Леонов А.В., Чаплышкин В.А. Сети FANET // Омский научный вестник. № 3(143), 2015,. – С. 297-301.
33. Ким Н.В, Крылов И.Г. Групповое применение БЛА в задачах наблюдения. Сборник докладов IX Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов». М.: МАИ-ПРИНТ, 2012. – С.59-62.
34. Ерофеева В.А., Иванский Ю.В., Кияев В.И. Управление роём динамических объектов на базе мультиагентного подхода// Компьютер-

- ные инструменты в образовании. № 6, 2015. – С.34-42.
35. Tareque H., Hossain S., Atiquzzaman M. On the Routing in Flying Ad hoc Networks // IEEE Proceedings of the Federated Conference on Computer Science and Information Systems // ACSIS. – 2015. – vol. 5. – P. 1–9.
36. Singh S. K. A Comprehensive Survey on Fanet: Challenges and Advancements // International Journal of Computer Science and Information Technologies. – 2015. – vol. 6 (3). – P. 2010-2013.
37. Yadav K., Nain A., Maakar S. Routing Protocols in FANET: Survey // Proceedings of National Conference on Innovative Trends in Computer Science Engineering (ITCSE-2015). – 2015. – P. 175-177.
38. Леонов А.В., Чаплышкин В.А. Роевой интеллект для управления БПЛА в FANET // Молодой ученый. № 12(116), 2016. – С.314-317.
39. Алехин И.Н., Бурдин В.А., Онищенко С.Г. Способы герметизации оптических муфт для монтажа в экстремальных условиях // Вестник связи. №1, 2010. – С. 45-49.
40. ТУ 3587-005-43925010-98. Кабели оптические марки ОКЛЖ. Самара. ЗАО Самарская оптическая кабельная компания. 2006 – 37 с.
41. Alekhin I.N., Burdin V.A., Nikulina T.G. Method of measurement of optical cable stiffness at low temperatures // Proceedings of SPIE. – 2013. vol. 9156. – P. 91560O-1 – 91560O-6. doi: 10.1117/12.2054261
42. Baucom J.L., Wagman R.S., Quinn C.M. Ice in Stranded Loose Tube and Single-Tube Fiber Optic Cables // IWCS Proceedings. – 2003. – P. 472-477.
43. Mahieux C.A., Reifsnider, K.L. Property modeling across transition temperatures in polymers: a robust stiffness-temperature model // Proceedings of Polymer. – 2001. – vol. 42. – P.3281-3291. doi: 10.1016/S0032-3861(00)00614-5
44. Fakirov S. Handbook of Thermoplastic Polyesters, Homopolymers, Copolymers, Blends and Composites, Wiley-VCH, Weinheim. – 2002. – P.390-393.
45. Sutehall R., Davies M., Joslin T., Griffioen W., Heinonen J. Blowing Of Mini-Cables In Extreme Ambient Weather Conditions // IWCS Proceedings. – 2011. – P. 226-232.
46. Alekhin I.N., Burdin V.A., Nikulina T.G. Research of the loose-tube gel-filled optical cable stiffness at low temperatures // Proceedings of SPIE. – 2014. – vol. 9533. – P. 95330L-1 - 95330L-6. doi:10.1117/12.2180719
47. Temple K.D., Bringuier A., Seddon D.A., Wagman R.S. Update: Gel-Free Outside Plant Fiber-Optic Cable Performance Results in Special Testing // IWCS Proceedings. – 2007. – P. 561-566.

Получена 09.12.2016

Бурдин Владимир Александрович, д.т.н., профессор Кафедры линии связи и измерения в технике связи (ЛС и ИТС), ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики» (ПГУТИ). Тел. 8 (846) 332-21-61; E-mail: burdin@psati.ru

Кубанов Виктор Павлович, д.т.н., профессор Кафедры электродинамики и антенн ПГУТИ. Тел. 8 (846) 228-00-22. E-mail: kubanov@psati.ru

PROSPECTS AND PROBLEMS OF ELECTROMAGNETIC LOCATION OF ROUTES OF UNDERGROUND EXTENDED OBJECTS BY MEANS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

Burdin V.A., Kubanov V.P.

*Povolzhskiy State University of Telecommunication and Informatics, Samara, Russian Federation
E-mail: burdin@psati.ru*

In the article potential possibilities of the method of an electromagnetic location of routes of extended underground constructions by means of unmanned aerial vehicles (drones) are considered. Technology benefits with use of unmanned aerial vehicles are considered. Basic provisions of an electromagnetic location of routes of underground constructions are stated. The analysis of methods features of an electromagnetic location when using drones is provided. Problems of searching the route and determining the depth of an underground construction in case of measurement of levels distributions of electromagnetic field by means of unmanned aerial vehicles are considered in detail. Options of technical solutions to these problems are provided. It is

shown that use of unmanned aerial vehicles for an electromagnetic location is quite real, and the arising problems have technical solutions.

Keywords: unmanned aerial vehicle, drone, electromagnetic location, cable finder, underground construction, cable, pipeline, route, laying depth

DOI: 10.18469/ikt.2017.15.1.07

Burdin Vladimir Alexandrovich, Povolzhskiy State University of Telecommunication and Informatics, 23 L. Tolstoy str., Samara 443010, Russian Federation; vice-rector on science activity and innovation; Doctor of Technical Sciences, Professor. Tel.: +78463322161. E-mail: burdin@psati.ru.

Kubanov Viktor Pavlovich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moscovskoe shosse, Samara 443090, Russian Federation; Professor of the Department of Electrodynamics and Antennas, Doctor of Technical Sciences, Professor. Tel.: +78462280022. E-mail: kubanov@psati.ru.

References

1. Pavlushenko M., Evstafev G., Makarenko I. Bepilotnye letatel'nye apparaty: istoriya, primeneniye, ugroza rasprostraneniya i perspektivy razvitiya [Unmanned aerial vehicles: history, application, threat of distribution and prospect of development]. *Nauchnye zapiski PIR-centra: nacional'naya i global'naya bezopasnost'*, 2004, no. 2, 611 p.
2. Yannikov I.M., Fomin P.M., Gabrichidze T.G., Zaharov A.V. Primeneniye bepilotnykh letatel'nykh apparatov pri razvedke trudnodostupnykh i masshtabnykh zon chrezvychajnykh situatsiy [Use of unmanned aerial vehicles at investigation of remote and large-scale zones of emergency situations]. *Vektor nauki TGU*, 2012, vol. 21, no. 3, pp. 49-53.
3. Volgusheva N.E., Prokofev N.A., Blyaharskiy D.P. Tekhnologiya rascheta vegetacionnogo indeksa na osnovanii dannykh bepilotnoj aehrofotos'emki [Technology of calculation of a vegetative index on the basis of data of pilotless aerial photography]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Geodeziya i aehrofotos'emka*, 2016, vol. 60, no. 2, pp. 71-76.
4. Krivichev A.I., Zaleckiy A.V. Razvitie tekhnologiy socio-ehkologo-ehkonomicheskogo monitoringa arkticheskoy zony Rossii s primeneniem bepilotnykh letatel'nykh apparatov [Development of technologies of sotsio-ekologo-economic monitoring of the Arctic zone of Russia using unmanned aerial vehicles]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Geodeziya i aehrofotosemka*, 2016, vol. 60, no. 2, pp. 77-82.
5. Vorobeva N.G., Zhurbin I.V., Knyazeva L.F. Issledovanie vozmozhnostej BPLA SUPERCAM S350-F v zadachah izucheniya i sohraneniya arheologicheskogo naslediya [Research of opportunities of the SUPERCAM S350-F UAV in problems of studying and preservation of archaeological heritage]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Geodeziya i aehrofotosemka*, 2016, vol.60. no. 2, pp.83-90.
6. Singatulin R.A. Osobennosti primeneniya stereofotogrammetricheskogo mul'tispektral'nogo monitoringa v polevykh arheologicheskikh issledovaniyakh [Features of application of stereophotogrammetric multispectral monitoring in field archaeological researches]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Geodeziya i aehrofotosemka*, 2016, vol. 60, no. 2, pp. 90-93.
7. Alyab'ev A.A., Kobzeva E.A., Strunina E.N. Stereofotogrammetriya i kompleksnye kadaastrovye raboty [Stereofotogrammetriya and complex cadastral works]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Geodeziya i aehrofotosemka*, 2016, vol. 60, no. 2, pp. 99-101.
8. Zhuravlev V.N., Zhuravlev P.V. Primeneniye bepilotnykh letatel'nykh apparatov v otraslyakh ehkonomiki: sostoyanie i perspektivy [Use of unmanned aerial vehicles in economy industries: condition and prospects]. *Nauchnyy vestnik MGTU GA*, 2016, no. 226, pp. 156-164.
9. Hellsten H. *Subsurface imaging radar*. EP 1 965 223, 03.09.2008.
10. Trigubovich G.M., Salenko S.D., Obuhovskiy A.D., Shatilov K.A. *Ustrojstvo dlya aehrogeofizicheskoy razvedki* [The device for aero geophysical investigation]. Patent RF, no. 2201603, 27.03.2003.
11. Dikarev V.I., Shubarev V.A., Ivanov N.N., Kalinin V.A. *Mobil'nyj georadar dlya distancionnogo poiska mestopolozheniya podzemnykh magistral'nykh kommunikatsiy i opredeleniya ih poperechnogo razmera i glubiny zaleganiya v grunte* [The mobile georadar for distant search of location of underground trunk communications and determination of their cross size and a depth in soil]. Patent RF, no. 2451954, 27.05.2012.
12. Dikarev V.I., Rogalev V.A., Karamzinov F.V., Gumen S.G., Denisov G.A. *Vertoletnaya radiolokatsionnaya stantsiya* [Helicopter radar station]. Patent RF, no. 2207588, 27.06.2003.

13. Avramenko S.V., Lapshin V.S., Blinov I.V., Nikolaev V.A. Results of flight pilot studies of the multi-purpose multirange subsurface radar of air basing. *Materialy III Vserossijskoj konferencii «Radiolokaciya i radiosvyaz'»* [Proc. 3th Int. Symp. "Radar-location and radio communication"]. 2009, pp.30-34. (In Russian).
14. Turov V.E., Krenev A.N., Il'in E.M., Selyanskaya E.A. Perspektivnye radiolokacionnye tekhnologii podpoverhnostnogo zondirovaniya s borta letatel'nogo apparata [Perspective radar technologies of subsurface sounding from an aircraft board]. *Vestnik SibGUTI*, 2015, no. 2, pp. 122-131.
15. Ancelevich M.A., Karpov A.S., Udavihin A.V., Sherbakov G.N. Obnaruzhenie provodnyh linij upravleniya terroristicheskimi vzryvnymi ustroystvami [Detection of wire lines of control of terrorist explosive devices]. *Spektekhnika i svyaz*, 2009, no. 1, pp. 30-34.
16. Turov V.E., Selyanskaya E.A., Kiseleva Yu.V., Polubekhin A.I., Il'in E.M. Obzor tekhnicheskikh realizacij sistem radiolokacionnogo obnaruzheniya ob'ektov v pripoverhnostnom sloe grunta [The review of technical realization of systems of radar detection of objects in a near-surface layer of earth]. *Vestnik SibGUTI*, 2015, no. 3, pp. 155-163.
17. *Ot A do Ya lokacii i poisk povrezhdenij podzemnyh kabelej i trub dlya nachinayushchih i specialistov. Avtorizovannyj perevod ZAO "PERGAM"* [From A to I locations and search of damages of underground cables and pipes for beginners and experts]. Radiodetection, 1999, 163 p.
18. Lavrov G.A., Knyazev A.S. *Prizemnye i podzemnye anteny. Teoriya i praktika antenn, razmeshchennyh vblizi poverhnosti zemli* [Ground and underground antennas. The theory and practice of the antennas placed near the Earth's surface]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1965. 472 p.
19. Irodov I.E. *Osnovnye zakony ehlektromagnetizma* [Fundamental laws of electromagnetism]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1991. 288 p.
20. Burdin V.A. Sposob opredeleniya mesta povrezhdeniya kabel'noj linii so slozhnoj konfiguraciej prokladki kabelya [Way of definition of the place of damage of the cable line with a difficult configuration of laying of a cable]. AC 1765791, 1992, БИ № 36.
21. Burdin V.A. *Sposob opredeleniya trassy prokladki i lokalizacii mesta povrezhdeniya kabelya* [Way of definition of the route of laying and localization of the place of damage of a cable]. Patent RF, no. 2350974, 2009.
22. Burdin V.A., Sivkov V.S., Spodobaev M.YU. Methods and algorithms of search of optical cables in the conditions of a difficult electromagnetic situation. *XII MNTK «Problemy tekhniki i tekhnologii telekommunikacij»* [Proc. 13th Int. Symp. "Problems of the equipment and technology of telecommunications"]. Kazan, 2011, pp. 314-315. (In Russian).
23. Burdin V.A., Prokopev V.I., Romodin V.G., Sivkov V.S. Metody lokalizacii povrezhdenij kabelej na trassah slozhnoj konfiguracii [Methods of localization of damages of cables on routes of a difficult configuration]. *T-Comm*, 2013, no.8, pp. 33-34.
24. Strizhevskij I.V., Dmitriev V.I. *Teoriya i raschet vliyaniya ehlektroficirovannoj zheleznoj dorogi na podzemnye metallicheskie sooruzheniya* [The theory and calculation of influence of the electrified railroad on underground metal constructions]. Moscow, Strojizdat Publ, 1967. 248 p.
25. Glazkov V.I., Zinevich A.M., Kotik V.G., Nikolskij K.K., Strizhevskij I.V. *Zashchita ot korrozii protyazhennyh metallicheskih sooruzhenij*. [Protection against corrosion of extended metal constructions]. Moscow, Nedra Publ., 1969. 311 p.
26. Mihajlov M.I., Razumov L.D., Sokolov S.A. *Ehlektromagnitnye vliyaniya na sooruzheniya svyazi* [Electromagnetic influences on communication constructions]. Moscow, Svyaz Publ., 1979. 264 p.
27. Vehns E.F. *Vliyanie ehlektromagnitnyh polej na ehkranirovannye kabeli* [Influence of electromagnetic fields on screened cables]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1982. 120 p.
28. Voskresenskij D.I. *Anteny i ustrojstva SVCH* [Antennas and microwave ovens devices]. Moscow, Sovetskoe radio, 1972. 320 p.
29. Metelev B., Kocherov A. Poisk povrezhdenij trass: kabeleiskatel' izobreten zanovo [Search of damages of routes: the kabeleiskatel is invented anew]. *Pervaya milya*, 2013, no. 6, pp. 54-58.
30. Sistema ehlektronnoj markirovki 3M™ Scotchmark™. *Sharovye intellektual'nye markery. Instrukcii po ustanovke* [System of electronic marking 3M™ Scotchmark™. Spherical intellectual markers. Instructions for installation]. Available at: <http://multimedia.3m.com/mws/media/8838750/service-dynatel-image.pdf?fn=>.
31. Fesland S., Nigron P. *Method and device for the scattering of drones on curved paths around one or more reference points*. Patent US, no. 5728965, 17.03.1998.
32. Leonov A.V., Chaplyshkin V.A. Seti FANET [FANET networks]. *Omskij nauchnyj vestnik*, 2015, no. 3, pp. 297-301.

33. Kim N.V., Krylov I.G. Group application of BLA in problems of observation. *Trudy 9 Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii «Problemy sovershenstvovaniya robototekhnicheskikh i intellektual'nyh sistem letatel'nyh apparatov»* [Proc. 9th All-Russian scientific and technical conference "Problems of improvement of robotic and intellectual systems of aircraft". Moscow, MAI-PRINT Publ., 2012, pp.59-62.
34. Erofeeva V.A., Ivanskij Yu.V., Kiyayev V.I. Upravlenie roem dinamicheskikh ob"ektov na baze mul'tiagentnogo podhoda [Management of a swarm of dynamic objects on the basis of multiagentny approach]. *Kompyuternye instrumenty v obrazovanii*, 2015, no.6, pp. 34-42.
35. Tareque H., Hossain S., Atiquzzaman M. On the Routing in Flying Ad hoc Networks. *IEEE Proceedings of the Federated Conference on Computer Science and Information Systems*. ACSIS, 2015, vol. 5, pp. 1–9.
36. Singh S. K. A Comprehensive Survey on Fanet: Challenges and Advancements. *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, 2015, vol. 6 (3), pp. 2010-2013.
37. Yadav K., Nain A., Maakar S. Routing Protocols in FANET: Survey. *Proceedings of National Conference on Innovative Trends in Computer Science Engineering (ITCSE-2015)*, 2015, pp. 175-177.
38. Leonov A.V., CHaplyshkin V.A. Roevoj intellekt dlya upravleniya BPLA v FANET [Royeva intelligence for management of the UAV in FANET]. *Molodoj uchenyj*, 2016, no. 12, pp.314-317.
39. Alekhin I.N., Burdin V.A., Onishchenko S.G. Sposoby germetizacii opticheskikh muft dlya montazha v ehkstremaal'nyh usloviyah [Methods of sealing of optical sleeves for mounting in extremal conditions]. *Vestnik svyazi*, 2010, no. 1, pp.45-49.
40. TU 3587-005-43925010-98. Kabeli opticheskie marki OKLZH. Samara. ZAO Samarskaya opticheskaya kabel'naya kompaniya, 2006, 37 p.
41. Alekhin I.N., Burdin V.A., Nikulina T.G. Method of measurement of optical cable stiffness at low temperatures. *Proceedings of SPIE*, 2013, vol. 9156, 91560O. doi: doi:10.1117/12.2054261
42. Baucom J.L., Wagman R.S., Quinn C.M. Ice in Stranded Loose Tube and Single-Tube Fiber Optic Cables. *IWCS Proceedings*, 2003, pp. 472-477.
43. Mahieux C.A., Reifsnider, K.L. Property modeling across transition temperatures in polymers: a robust stiffness-temperature model. *Proceedings of Polymer*, 2001, vol. 42, pp. 3281-3291. doi: 10.1016/S0032-3861(00)00614-5
44. Fakirov, S. *Handbook of Thermoplastic Polyesters, Homopolymers, Copolymers, Blends and Composites*. Wiley-VCH, Weinheim. 2002. pp. 390-393.
45. Sutehall, R., Davies, M., Joslin, T., Griffioen, W., Heinonen, J. Blowing Of Mini-Cables In Extreme Ambient Weather Conditions. *IWCS Proceedings*, 2011, pp. 226-232.
46. Alekhin I.N., Burdin V.A., Nikulina T.G. Research of the loose-tube gel-filled optical cable stiffness at low temperatures. *Proceedings of SPIE*, 2014, vol. 9533, 95330L. doi:10.1117/12.2180719
47. Temple, K.D., Bringuier, A., Seddon, D.A., Wagman, R.S. Update: Gel-Free Outside Plant Fiber-Optic Cable Performance Results in Special Testing, *IWCS Proceedings*, 2007, pp. 561-566.

Received 09.12.2016

УДК 681.518: 339.13

**ВЛИЯНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ
НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ СТАТИСТИЧЕСКОГО ИМИТАЦИОННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕРЕФЛЕКТОРНОЙ СИСТЕМЫ.
ЧАСТЬ 2. ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ СТОХАСТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ
ПО ВЛИЯНИЮ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СИМ-МОДЕЛИ**

Ваулина К.В., Маслов О.Н.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

E-mail: maslov@psati.ru

Во второй части статьи представлены методика и результаты исследования статистической имитационной модели (СИМ) бизнес-процесса «Предоставление государственных и муниципальных услуг» Многофункционального Центра областного уровня, реализованной в среде AnyLogic.

Ключевые слова: нерелекторные системы, статистическое имитационное моделирование, метод Димова-Маслова, неопределенность исходных данных, эффективность модели