

Способ построения «субоптимальных» маршрутов мониторинга разнотипных источников беспилотным летательным аппаратом

Тимошенко А.В.^{1*}, Балдычев М.Т.^{2}, Маренков И.А.^{2**}, Пивкин И.Г.^{2**}**

*¹Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца,
ул. 8 марта, 10, стр. 1, Москва, 127083, Россия*

*²Череповецкое высшее военное инженерное ордена Жукова училище
радиоэлектроники, ЧВВИУРЭ, Советский проспект, 126, Череповец, Вологодская
область, 162622, Россия*

**e-mail: atimosenko@rti-mints.ru*

***e-mail: cvviur6@mil.ru*

Статья поступила 11.02.2020

Аннотация

В статье рассматривается способ построения «субоптимальных» маршрутов мониторинга разнотипных источников беспилотным летательным аппаратом. Под «субоптимальными» маршрутами, в статье, понимаются маршруты обеспечивающее локальный экстремум в области минимизации времени перемещения БЛА между заданными районами оптического мониторинга в условиях влияния динамически изменяемого движения воздушных масс и при фиксированной производительности силовой установки БЛА. Показано влияние геометрии маршрута на точность определения координат ИРИ. По результатам имитационного моделирования оценено влияние указанных факторов на построение маршрутов мониторинга. Сравнение результатов продолжительности полета по маршрутам, построенным в соответствии с разработанным способом, относительно маршрутов построенных без

учета рассмотренных факторов демонстрирует выигрыш в сокращении продолжительности полета в среднем на 5–7 %, при сохранении допустимого уровня влияния геометрического фактора на определение координат ИРИ.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, средства оптического мониторинга, средства радиомониторинга, навигационный ветер, маршрут мониторинга.

Введение

В настоящее время для решения задачи поиска, обнаружения и определения координат различных объектов, в том числе источников радиоизлучения (ИРИ), в труднодоступных районах используются беспилотные летательные аппараты (БЛА), оснащенные средствами оптического мониторинга и радиомониторинга. Это обусловлено возможностью их непосредственного барражирования над районами предполагаемого размещения объектов поиска. Решение данных задач требует оптимальности маршрута передвижения БЛА, ввиду ограниченности ресурса его энергоносителей. Очевидно, что чем меньше время следования между i -м и j -м районом мониторинга, тем большее количество районов можно обследовать за ограниченное время, следовательно, выше вероятность того, что будет обнаружено большее количество объектов поиска и выше эффективность мониторинга в целом. Наряду с этим, при выполнении задач радиомониторинга, построение маршрутов должно осуществляться с учетом обеспечения допустимого уровня влияния геометрического фактора на точность определения координат ИРИ [1,2,3]. В свою очередь, известно, что на продолжительность полета оказывает влияние

перемещения воздушных масс на маршруте следования БЛА, а на геометрический фактор - последовательность облета районов мониторинга (создание базы пеленгования) [4,5,6,7,8,9]. Однако, большинство научных и научно-исследовательских работ посвященных вопросам повышения эффективности применения комплексов мониторинга с БЛА [10,11,12,13] данный вопрос рассматривает поверхностно или не рассматривает вовсе. В связи с этим, исследование вопросов оптимизации маршрутов полета БЛА при мониторинге источников является достаточно актуальной задачей.

Цель работы – разработать способ построения «субоптимальных» маршрутов мониторинга разнотипных источников беспилотным летательным аппаратом в условиях влияния параметров движения воздушных масс, направленный на повышение эффективности мониторинга за счет минимизации времени перемещения БЛА между заданными районами мониторинга и обеспечения допустимого уровня влияния геометрического фактора на точность определения координат ИРИ.

Под «субоптимальными» маршрутами, в статье, понимаются маршруты обеспечивающее локальный экстремум в области минимизации времени перемещения БЛА между заданными районами оптического мониторинга, а также допустимый уровень влияния геометрического фактора на точность определения координат ИРИ, в условиях фиксированной производительности силовой установки БЛА и влияния параметров движения воздушных масс.

Поставленная в работе цель достигается разработкой способа построения «субоптимальных» маршрутов мониторинга разнотипных источников беспилотным летательным аппаратом, в рамках которого полет БЛА начинается из пункта отправления в заданные районы оптического мониторинга и обратно, с минимальными затратами времени перемещения по маршруту и расхода энергоресурса при условии обеспечения требуемого уровня влияния геометрического фактора (ГФ) на точность определения координат ИРИ. Основными факторами, влияющими на время полета, расход энергоресурса и обеспечение геометрического фактора, являются порядок облета заданных районов оптического мониторинга и вариация движения воздушных масс на пути следования БЛА. В аэронавигации различают два вида ветра: навигационный и метеорологический. Навигационным направлением ветра (НВ) называется угол, заключенный между северным направлением магнитного меридиана и направлением в точку, куда дует ветер [14]. При расчетах будем использовать навигационное направление ветра.

Способ в виде блок-схемы представлен на рисунке 1.

В блоке 1 осуществляется анализ исходных данных. Необходимыми исходными данными для работы способа являются: координаты точек маршрута, где, x_i – широта, y_i – долгота, z_i – высота i -й точки; район предполагаемого нахождения ИРИ; воздушная скорость полета БЛА V ; скорость U и направление навигационного ветра; максимальное время полета T_{max} .

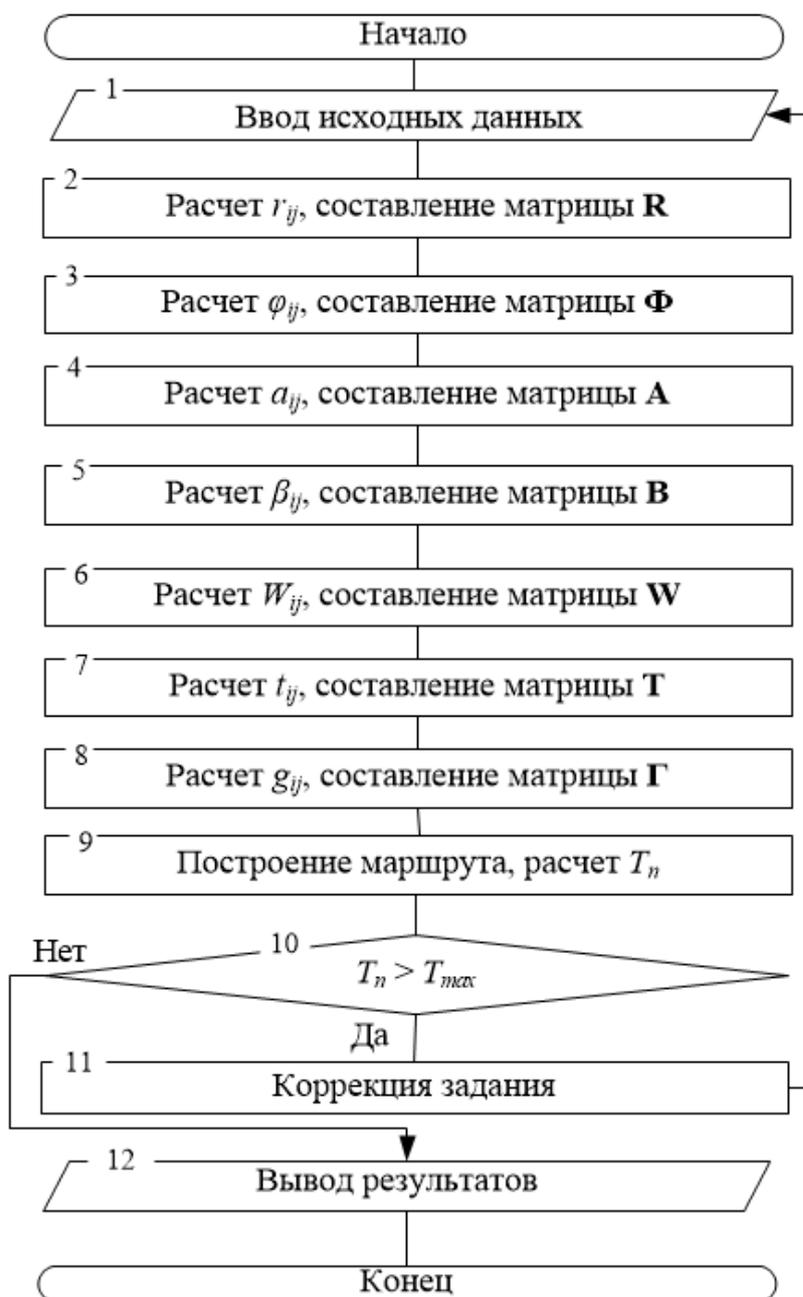


Рисунок 1 Блок-схема способа построения «субоптимальных» маршрутов мониторинга источников радиоизлучения беспилотным летательным аппаратом

В блоке 2 производится расчет расстояний r_{ij} между всеми позиционными районами мониторинга и составляется матрица расстояний. Расчет расстояний между точками производится с помощью сферической теоремы косинусов:

$$\Delta\delta_{ij} = \arccos(\sin x_i \cdot \sin x_j + \cos x_i \cdot \cos x_j \cdot \cos \Delta\lambda) \quad (1)$$

где x_i, x_j – широта i -й и j -й точек в радианах;

$\Delta\lambda = \lambda_i + \lambda_j$ – разница координат по долготе;

$\Delta\delta_{ij}$ – угловая разница (угловое расстояние) между двумя точками.

Для перевода углового расстояния в метрическое $\Delta\delta_{ij}$, угловая разница умножается на коэффициент k , где $k=6372795$ метров (радиус Земли) [15]. Таким образом, расстояние между двумя точками будет определяться как:

$$r_{ij} = \Delta\delta_{ij} \cdot k \quad (2)$$

Для более точного определения расстояния между двумя точками находят наклонное расстояние (M), которое учитывает высоту БЛА в этих точках. Исходя из этого формула примет вид:

$$M = \sqrt{r_{ij}^2 + h_{ij}^2} \quad (3)$$

В блоке 3 производится расчет путевых углов φ_{ij} и составляется матрица путевых углов Φ .

Для расчета путевых углов воспользуемся следующей формулой:

$$\varphi_{ij} = \arctan \left(\frac{y_j - y_i}{\ln \left(\tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{x_j}{2} \right) \right) - \ln \left(\tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{x_i}{2} \right) \right)} \right) = \arctan \left(\frac{y_j - y_i}{\ln \left(\frac{(\sin x_i - 1) \cos x_j}{(\sin x_j - 1) \cos x_i} \right)} \right), \quad (4)$$

где φ_{ij} – путевой угол полета БЛА из точки i в j ;

x_i, x_j – широта i -й и j -й точек в радианах;

y_i, y_j – долгота i -й и j -й точек в радианах;

e – эксцентриситет сфероида.

Эксцентриситет сфероида (степень отклонения от окружности)

рассчитывается по формуле:

$$e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}, \quad (5)$$

где a – длина большой полуоси;

b – длина малой полуоси;

В блоке 4 производится расчет углов ветра β_{ij} и составляется матрица углов ветра **В**.

Угол ветра равен разности навигационного ветра и путевого угла (формула 7) [14].

$$\beta_{ij} = HB - \phi_{ij} \quad (7)$$

где HB – значение угла навигационного ветра,

ϕ_{ij} – значение путевого угла.

В блоке 5 рассчитываем угол сноса α_{ij} и составляем матрицу углов сноса **А**.

Угол сноса α_{ij} – угол, заключенный между направлениями вектора воздушной скорости V и путевой скорости W . Отсчитывается угол сноса от направления вектора V , которое в свою очередь совпадает с направлением продольной оси БЛА [14].

Угол сноса определяется по формуле:

$$\alpha_{ij} = \arcsin\left(\frac{U \cdot \sin(\beta_{ij})}{V}\right) \quad (8)$$

В блоке 6 рассчитывается путевая скорость W_{ij} и составляется матрица скоростей **W**.

Путевая скорость W_{ij} – скорость БЛА относительно земной поверхности. На значение путевой скорости влияет как параметры навигационного ветра, так и значение выходной мощности двигателей БЛА.

Путевая скорость определяется по формуле:

$$W_{ij} = V \cdot \cos \alpha_{ij} + U \cdot \cos \beta_{ij} \quad (9)$$

В блоке 7 происходит расчет времени полета t_{ij} между всеми точками и составляется матрица времени \mathbf{T} . Время полета рассчитывается по формуле:

$$t_{ij} = \frac{r_{ij}}{W_{ij}} \quad (10)$$

В блоке 8 производится определение уровня влияния геометрического фактора g_{ij} между всеми точками на точность местоопределения ИРИ.

В рамках статьи в качестве способа определения координат ИРИ рассматривается способ, основанный на разностно-дальномерных измерениях в условиях применения одного воздушного пункта приема – БЛА [16,17]. Основой определения местоположения в данном способе является измерение разности расстояний от ИРИ до разных точек пространства – точек маршрута полета БЛА. Расстояние от ИРИ до i -ой точки маршрута в пространстве описывается выражением:

$$r_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}, \quad (11)$$

где (x, y, z) – координаты ИРИ, (x_i, y_i, z_i) – координаты i -ой позиции БЛА в пространстве, $i = 1, \dots, N$ – номер точки маршрута, N – количество точек маршрута.

Для разностно-дальномерных измерений погрешность определения местоположения в пространстве рассчитывается в соответствии с выражением:

$$\frac{\sigma}{\sigma_{\Delta r}} = \left[\text{tr} \left((\Gamma^T \Gamma)^{-1} \right) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (12)$$

где $\sigma_{\Delta r}$ – погрешность определения разности расстояний, $\text{tr}(\)$ – след матрицы, рассчитывающийся как сумма элементов главной диагонали матрицы, Γ – матрица частных производных от r_i , $(\)^T$ – транспонированная матрица, $(\)^{-1}$ – обратная матрица.

Матрица $(\Gamma^T \Gamma)^{-1}$ является ковариационной матрицей погрешностей определения местоположения, а элементы ее главной диагонали представляют собой дисперсии ошибок пространственных координат $(\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2)$ [18].

Матрица частных производных по $\frac{\partial r_i}{\partial x}$, $\frac{\partial r_i}{\partial y}$, $\frac{\partial r_i}{\partial z}$ для разностно-дальномерных

измерений имеет вид:

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \frac{x-x_2}{r_2} - \frac{x-x_1}{r_1} & \frac{y-y_2}{r_2} - \frac{y-y_1}{r_1} & \frac{z-z_2}{r_2} - \frac{z-z_1}{r_1} \\ \frac{x-x_3}{r_3} - \frac{x-x_1}{r_1} & \frac{y-y_3}{r_3} - \frac{y-y_1}{r_1} & \frac{z-z_3}{r_3} - \frac{z-z_1}{r_1} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{x-x_N}{r_N} - \frac{x-x_1}{r_1} & \frac{y-y_N}{r_N} - \frac{y-y_1}{r_1} & \frac{z-z_N}{r_N} - \frac{z-z_1}{r_1} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Из анализа выражения (13) следует, что погрешность определения местоположения ИРИ, без учета погрешности определения разности расстояний, зависит только от количества измерений и вариации прохождения точек маршрута относительно района размещения ИРИ. Это обуславливает необходимость учета

геометрии маршрута полета БЛА, с целью максимального снижения погрешности определения местоположения ИРИ.

В блоке 9 определяется маршрут с минимальным временем прохождения и допустимым уровнем влияния геометрического фактора.

Маршрут находится решением задачи коммивояжера. Классическая постановка задачи коммивояжера сводится к построению маршрута, имеющего минимальную протяженность R . Однако, в случае построения маршрута перемещения БЛА в условиях воздействия навигационного ветра минимальная дальность не гарантирует минимального времени перемещения [3,4]. С учетом этого, было скорректировано классическое выражение задачи коммивояжера, в котором переменная возвращающая расстояние между i и j районом оптического мониторинга интерпретирована в переменную, возвращающую время перемещения БЛА между соответствующими районами с поправкой на воздействие навигационного ветра и внесен весовой коэффициент, отвечающий за уровень влияния ГФ. Модифицированная задача коммивояжера описывается выражением (14) и заключается в нахождении маршрута имеющего минимальную продолжительность полета при соответствующих параметрах навигационного ветра и обеспечения допустимого уровня влияния геометрического фактора:

$$R' = \min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ij} \cdot x_{ij} \cdot g_{ij} \quad (14)$$

где t_{ij} – время полета между точками i и j ;

n – количество точек, через которые проходит маршрут;

x_{ij} – весовой коэффициент, принимающий значение «1» при перемещении из

точки i в j , значение «0» в противном случае;

g_{ij} – весовой коэффициент, принимающий значение «1» при обеспечении требуемого уровня ГФ при перемещении из точки i в j , значение «0» в противном случае.

S – множество всех точек n .

Решение задачи коммивояжера осуществляется эволюционным методом, базирующимся на генетических алгоритмах, основанных на методах естественной эволюции [19].

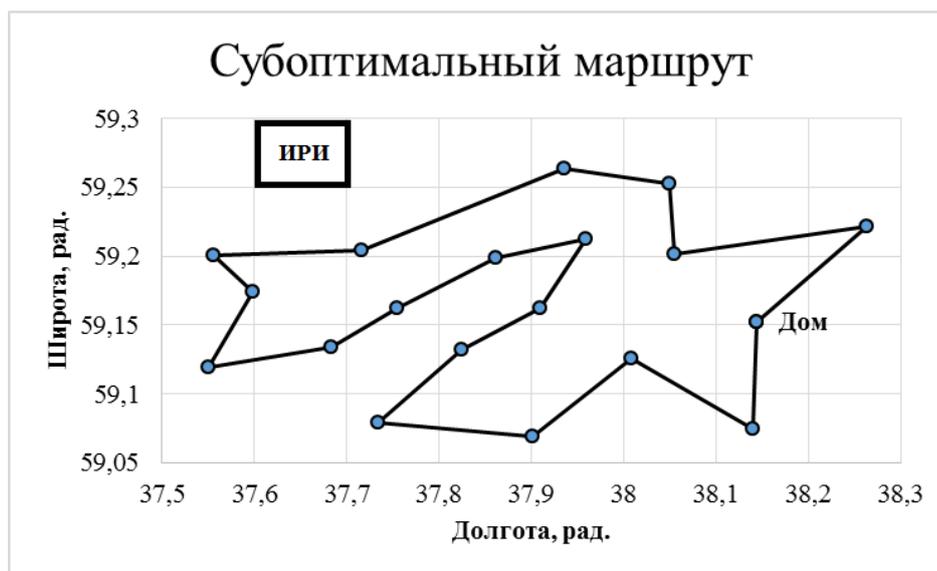


Рисунок 2 Смоделированный «субоптимальный» маршрут полета БЛА в отсутствии навигационного ветра

В блоке 10 проверяется условие неравенства, в котором время полета не должно превышать заданного. Если время полета не превышает допустимого значения, то происходит окончание работы, в противном случае осуществляется переход к блоку 11. В этом блоке происходит коррекция задания (сокращается количество районов оптического мониторинга, остаются самые приоритетные

районы) и цикл построения «субоптимального» маршрута БЛА с учетом навигационного ветра продолжается до момента выполнения условия в блоке 10.

Влияние параметров навигационного ветра (скорости и направления) и геометрического фактора на построение «субоптимальных» маршрутов мониторинга исследовано путем имитационного моделирования с использованием разработанного программного обеспечения [20]. В результате моделирования, были получены «субоптимальные» маршруты полета БЛА по заданным точкам (имитация районов оптического мониторинга) при различных входных параметрах навигационного ветра (таблица 1) и фиксированном районе расположения ИРИ. «Субоптимальные» маршруты, полученные в ходе имитационного моделирования, представлены на рисунках 2 – 3.

Таблица 1.

Входные параметры навигационного ветра и время прохождения маршрута

№ п/п	Направление НВ, град.	Скорость НВ, м/с.	Воздушная скорость БЛА, м/с.	Погрешность определения координат ИРИ при корректировке маршрута с учетом НВ, м.	Время полета по маршруту построенному без учета НВ (исходный маршрут), сек.	Время полета по маршруту построенному с учетом НВ, сек.
1.	0°	0	25	1,2	2480,6	
2.	40°	5		1,2	2528,3	2528,3
3.		10		1,2	2751,7	2751,7
4.		20		1,4	6108,8	5055,7
5.	150°	5		1,2	2492,6	2492,6
6.		10		1,2	2686,3	2686,3
7.		20		1,8	5251,4	4946,4

№ п/п	Направление НВ, град.	Скорость НВ, м/с.	Воздушная скорость БЛА, м/с.	Погрешность определения координат ИРИ при корректировке маршрута с учетом НВ, м.	Время полета по маршруту построенному без учета НВ (исходный маршрут), сек.	Время полета по маршруту построенному с учетом НВ, сек.
8.	245°	5		1,2	2749,3	2534,7
9.		10		1,4	4158,5	3240,3
10.		20		1,6	5829,5	4829,9

Анализ результатов моделирования показал, что увеличивая скорость ветра в пределах от 0 до 10 м/с начальный «субоптимальный» маршрут, полученный в условиях отсутствия навигационного ветра, оставался неизменным, однако при увеличении скорости ветра до 15 м/с и выше маршрут видоизменялся.

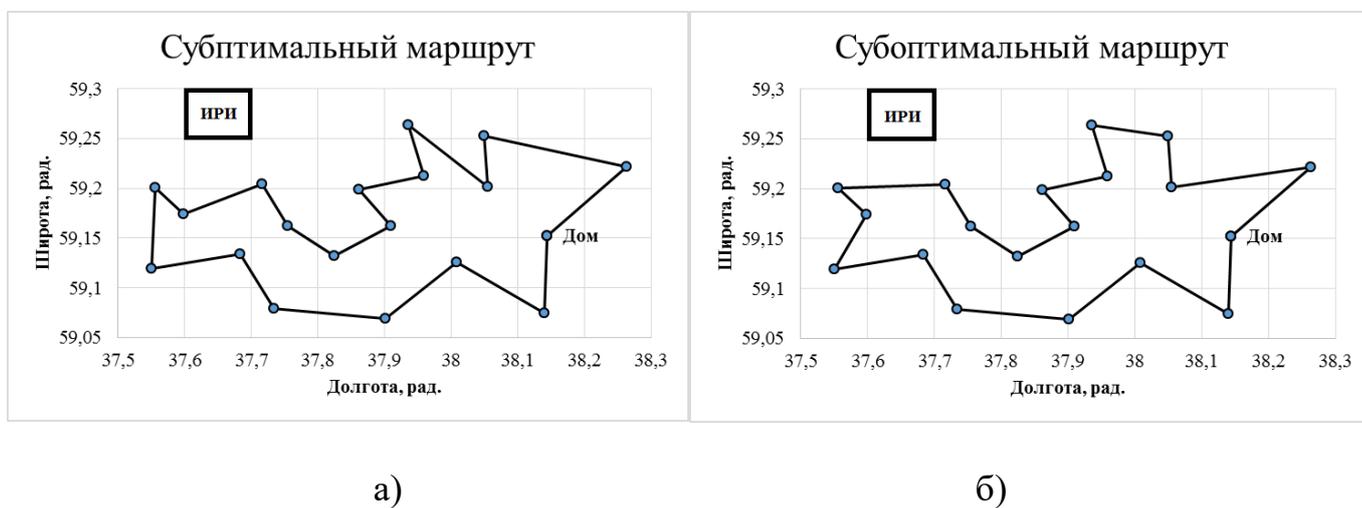


Рисунок 3 Смоделированный «субоптимальный» маршрут полета БЛА при скорости навигационного ветра 15 м/с и направлении: а) 150°; б) 245°.

Сравнение результатов длительности полета БЛА по адаптированным «субоптимальным» маршрутам относительно маршрутов полученных без учета

навигационного ветра (рисунок 4) позволило сделать вывод, что увеличение скорости ветра оказывает общее негативное влияние на время полета БЛА. Адаптация «субоптимальных» маршрутов к параметрам навигационного ветра позволяет минимизировать общее негативное влияние, затрачиваемое на преодоление маршрута при фиксированной производительности силовой установки БЛА (без изменения воздушной скорости БЛА), в среднем на 5–7 %, а, следовательно, и минимизировать расход его энергоресурса. В свою очередь, при адаптации маршрута к параметрам НВ снижался уровень оптимальности геометрического фактора, что отрицательно сказывалось на точности определения координат ИРИ. Однако, значения погрешности определения координат ИРИ полученные в ходе корректировки маршрута, относительно маршрута полученного в условиях отсутствия НВ, не являются значимыми и ими можно пренебречь.

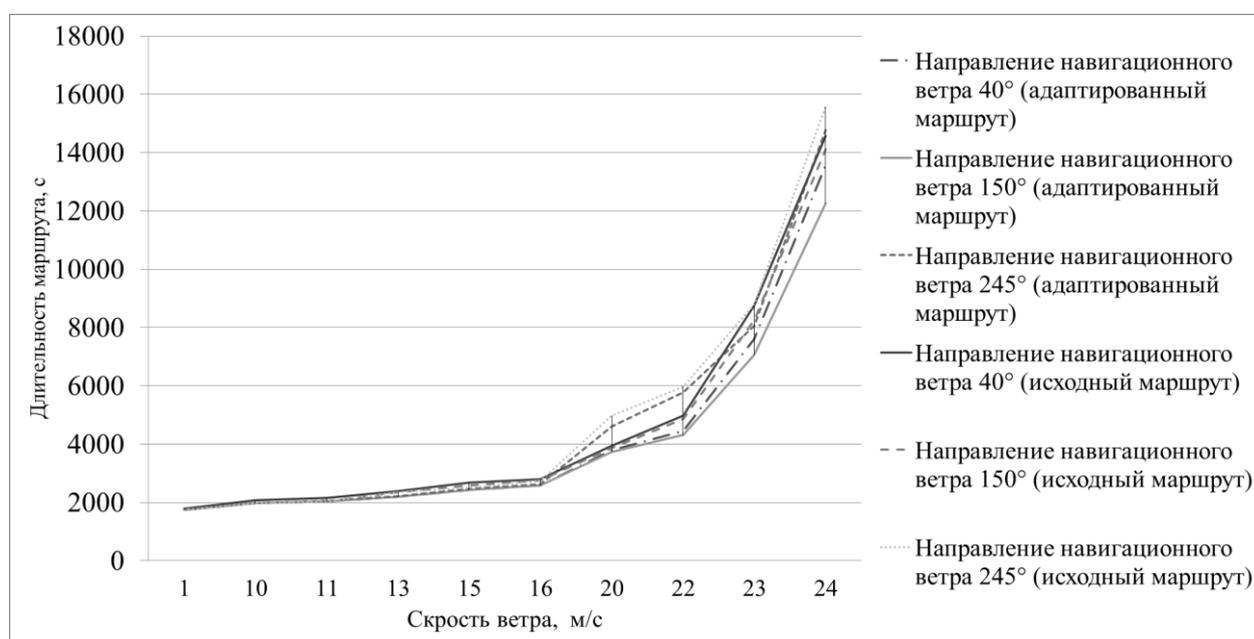


Рисунок 4 График изменения длительности полета БЛА относительно параметров навигационного ветра

Полученные результаты позволяют полагать, что предлагаемый способ, основанный на решении модифицированной задачи коммивояжера с учетом влияния параметров НВ и ГФ, позволит минимизировать время перемещения между районами оптического мониторинга и повысить их количество в условиях ограниченности энергоресурса БЛА, а определение координат ИРИ при радиомониторинге будет обеспечено с допустимым уровнем влияния ГФ.

Заключение

Таким образом, в рамках статьи, разработан способ построения «субоптимальных» маршрутов мониторинга разнотипных источников беспилотным летательным аппаратом, позволяющий повысить эффективность мониторинга за счет минимизации времени перемещения БЛА между заданными районами оптического мониторинга в условиях воздействия движения воздушных масс и ограниченности энергоресурса БЛА, а также обеспечить допустимый уровень влияния геометрического фактора на точность определения координат ИРИ при радиомониторинге.

Библиографический список:

1. Кондратьев В.С., Котов А.Ф., Марков Л.Н. Многопозиционные радиотехнические системы / Под ред. проф. В.В. Цветнова. – М.: Радио и связь, 1986. – 264 с.
2. Гайчук Ю.Н., Печурин В.В., Серебряков Ю.И. Исследование погрешности определения местоположения источников радиоизлучения группой беспилотных летательных аппаратов // Научные технологии. 2016. Т. 17. № 12. С. 34 - 40.

3. Чинь В.М. Задача маршрутизации полета легкого беспилотного летательного аппарата при различных моделях ветра. // 13 Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения -2017»: Тезисы докладов. (Москва, 05-19 апреля 2017). – М.: Изд-во МАИ, 2017. С. 136 - 137.
4. Фам С.К., Моисеев Д.В. Свойства оптимальных замкнутых маршрутов полета легкого самолета с учетом прогноза ветра // Труды МАИ. 2012. № 52. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=29420>
5. Чинь Ван Минь. Планирование маршрута полета легкого беспилотного летательного аппарата с учетом действия ветра: дис. ... канд. техн. наук. - М.: МАИ, 2017. URL: <https://studizba.com/files/show/pdf/25352-1-dissertaciya.html>
6. Подлипьян П.Е., Максимов Н.А. Многофазный алгоритм решения задачи планирования полета группы беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2011. № 43. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=24769>
7. Моисеев Д.В., Чинь В.М., Мозолев Л.А. и др. Маршрутизация полета легкого беспилотного летательного аппарата в поле постоянного ветра на основе решения разновидностей задачи коммивояжера // Труды МАИ. 2015. № 79. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=55782>
8. Моисеев Д.В., Чинь В.М. Вычислительные аспекты и прикладное программное обеспечение оптимальной маршрутизации полета легкого беспилотного летательного аппарата в поле постоянного ветра // Наукоедение. 2017. Т. 9. № 3. URL: <http://naukovedenio.ru/PDF/102TVN317.pdf>

9. Моисеев В.С., Абсалямов М.Н., Хакимуллина А.Р. Оптимизация траекторий летательного аппарата, выполняющего контроль наземной обстановки // Известия Вузов. Авиационная техника. 2001. № 1. С. 16 - 23.
10. Кишалов А.Е., Галимзянова Р.Р. Применение БПЛА в задачах подразделений МЧС // Молодежный вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2015. № 1(13). С. 74 - 79.
11. Балдычев М.Т., Ганиев, А.Н., Серебряков, Ю.И. и др. Способ контроля воздушного пространства. Патент на изобретение RU 2677367, 16.01.2019.
12. Борсук Н.А., Дерюгина Е.О., Лацин С.М. и др. Адаптивная система управления питанием семейства мобильных бортовых вычислительных комплексов // Электромагнитные волны и электронные системы. 2019. Т. 24. № 3. С. 55 – 61.
13. Кокуев А.А., Макаров К.В., Тимошенко А.В. Управление воздушными комплексами метеорологического мониторинга с учетом слепых зон радиолокационных станций // Труды МАИ. 2016. № 89. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=73332>
14. Черный М.А., Кораблин В.И. Самолетовождение. – М.: Транспорт, 1973. - 368 с.
15. Дубинин М. Вычисление расстояний и начального азимута между двумя точками на сфере. URL: <https://gis-lab.info/qa/great-circles.html>
16. Чеботарь И.В., Пивкин И.Г., Балдычев М.Т. и др. Определение координат источника импульсных радиосигналов на основе разностно-дальномерных измерений в условиях применения одного воздушного приемного пункта //

Электромагнитные волны и электронные системы. 2019. Т. 24. № 8. С. 35 – 39.

17. Балдычев М.Т., Пивкин И.Г., Гайчук Ю.Н., Печурин В.В., Лаптев И.В. Способ определения местоположения источника импульсных радиосигналов // Патент на изобретение RU 2695321, 23.07.2019.

18. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц / Под ред. Д.П. Желобенко. – М.: Наука, 1966. – 576 с.

19. Росс К. Генетические алгоритмы: почему они работают? когда их применять? // Компьютера. 1999. № 11. С. 13 – 18.

20. Пивкин И.Г., Печурин В.В, Балдычев М.Т. и др. Модель однопозиционной системы определения местоположения источников радиоизлучений. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019613634, 20.03.2019.