

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ МАЛОРАЗМЕРНОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

**Л.А. Мартынова, М.Б. Розенгауз (Санкт-Петербург)**

**Введение.** В настоящее время доступность приобретения недорогих малогабаритных беспилотных воздушных судов (БВС) [1] требует контроля их применения. Опасность появления малоразмерных БВС над морской акваторией заключается в возможном ведении с их борта несанкционированной фото- и видеосъемки [2], доставке полезной нагрузки к объектам морской инфраструктуры [3], как и у всякого автономного робота – ненадежности БВС [4] и его алгоритмов управления [5] в нештатных ситуациях [6]. Одной из задач контроля в прибрежном районе (рис.1) является определение местоположения БВС.

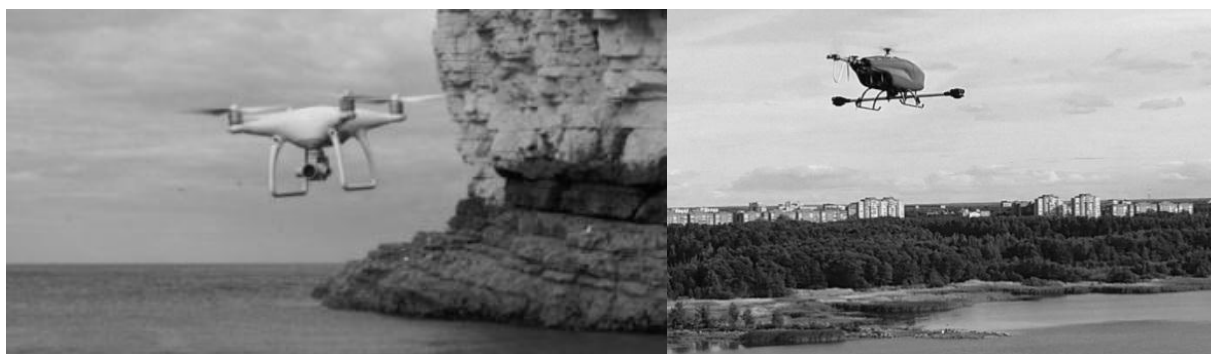


Рис. 1. Применение малоразмерных БВС в прибрежной зоне [7]

При обнаружении в режиме шумопеленгования сигнала, передаваемого с борта БВС, с информацией о телеметрии или видеоизображении определение местоположения БВС происходит с применением разностно-дальномерного метода [8].

Для этого система контроля включает в свой состав четыре пространственно-разнесенных пункта приема излучаемых БВС радио- и телевизионных сигналов и пункт обработки и отображения положения БВС на электронной карте местности.

Для функционирования системы определения координат положения БВС необходимо, чтобы:

- пространственно-распределенными приемниками осуществлялся прием сигнала БВС;
- на пункте обработки информации определялась разность моментов прихода на пункты приема сигналов;
- на пункте обработки информации по разности моментов прихода сигналов определялось местоположение БВС разностно-дальномерным методом.

Схема последовательности определения местоположения БВС приведена на рис. 2.

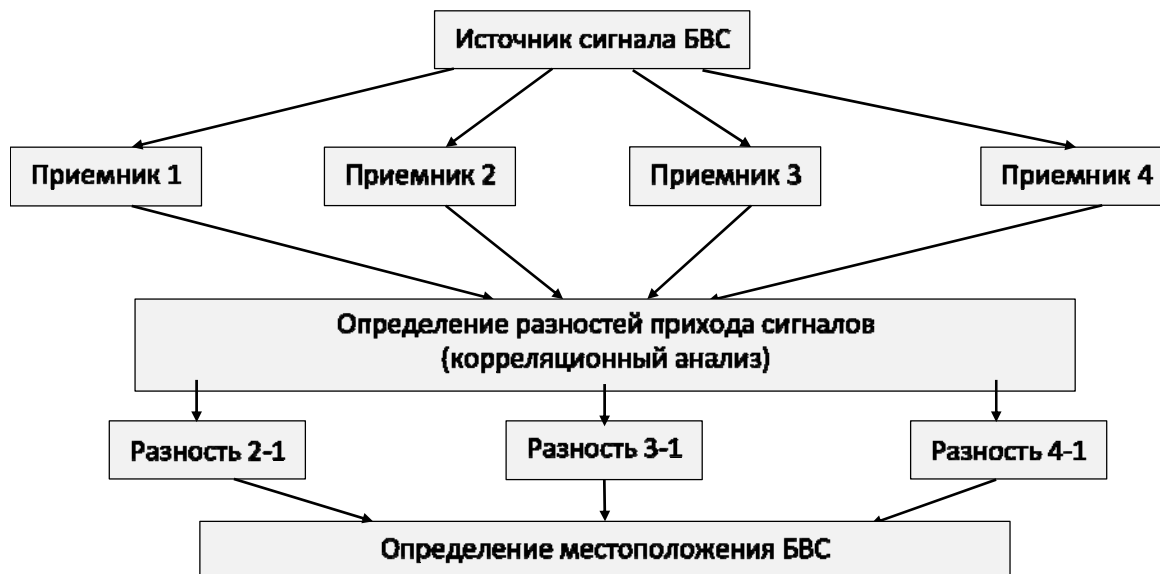


Рис. 2. Схема пространственно-разнесенного программно-аппаратного комплекса

Решение задач из приведенного перечня зависит от:

- параметров сигнала БВС;
- состояния фона, оказывающего влияние на затухание сигнала БВС;
- положения объектов, создающих зоны затенения и переотражение излучаемого сигнала.

Перечисленные факторы оказывают влияние на:

- возможность приема слабого сигнала;
- возможность определения разности моментов прихода принятых слабых сигналов;
- возможность определения местоположения БВС;
- погрешность определения местоположения БВС.

В связи с этим потребовалась разработка «цифрового двойника» системы контроля положения БВС – имитационной системы определения местоположения малоразмерного робототехнического комплекса для оценки влияния сигнала БВС на входе приемников – на возможность получения разности сигналов и погрешности определения местоположения БВС.

Ввиду отсутствия в литературе [8–19] публикаций по имитационному моделированию такой системы **целью работы** явилась имитация системы определения местоположения БВС в зависимости от сигнала БВС и условий его приема.

Структурная схема разработанной имитационной системы определения местоположения малоразмерного робототехнического комплекса приведена на рис. 3.

При имитации сигналов учитывалось влияние:

- фоновой обстановки;
- параметров приемников;
- многолучевости распространения сигналов и зоны тени, зависящих от положения объектов с отражающими и затеняющими поверхностями;
- положения приемников.



Рис. 3. Структурная схема системы определения местоположения БВС

Рассмотрим подробнее учет перечисленных факторов при имитации работы системы определения местоположения БВС.

**Имитация типовых сигналов на различных частотах.** За основу имитируемых сигналов примем традиционный сигнал вида:

$$s(t) = A \cos(\omega t + \phi),$$

где  $A$  – амплитуда;

$\omega$  – частота;

$\phi$  – начальная фаза.

Поскольку сигнал БВС – информационный, то он является модулированным сигналом. В связи с этим в качестве имитируемых сформированы сигналы с различной модуляцией и манипуляцией:

- амплитудной модуляцией  $A=f(t)$ ;
- частотной модуляцией  $\omega=f(t)$ ;
- фазовой модуляцией  $\phi=f(t)$ ;
- фазовой манипуляцией.

**Имитация влияния фоновой обстановки.** Для имитация затухания принимаемых сигналов на входе приемников 1, 2, 3, 4 учтено влияние фоновой обстановки. Особенность принимаемых сигналов заключается в том, что при распространении сигнала от источника он затухает, особенно в условиях сложного рельефа береговой черты. Наилучшей моделью оценки затухания в сложных рельефных условиях признана модель Уолфиша-Икегами [20]. Согласно модели Уолфиша-Икегами, медианное значение затухания  $L_b$  определяется по эмпирической формуле, как сумма потерь распространения волн в свободном пространстве, потерь за счет отражений от зданий и потерь за счет дифракции:

$$L_b = \begin{cases} L_0 + L_{rts} + L_{msd}, & L_{rts} + L_{msd} \geq 0 \\ L_0 & L_{rts} + L_{msd} < 0 \end{cases} \quad (1)$$

где  $L_0=32,45+20\lg d_{km}+20\lg f_{MHz}$  – потери распространения волн в свободном пространстве, дБ; (2)

$L_{rts} = -16,9 - 10 \lg f_{MHz} + 20 \lg(h_r - h_2) + L_{ori}$  – потери за счет отражений от зданий;

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0,35\varphi & 0 \leq \varphi < 35 \\ 2,5 + 0,075(\varphi - 35) & 35 \geq \varphi < 55 \\ 4,0 - 0,114(\varphi - 55) & 55 \leq \varphi \leq 90 \end{cases}, \quad (3)$$

потери, обусловленные ориентацией улиц относительно направления прихода сигнала (здесь  $\phi$  – ориентация улицы относительно направления прихода волны);

$$L_{msd} = L_{dch} + k_a + k_d \lg d_{km} + k_f \lg f_{MHz} - 9 \cdot \lg b \quad \text{– потери за счет дифракции}; \quad (4)$$

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \lg(1 + h_1 - h_r), & \text{for } h_1 > h_r \\ 0, & \text{for } h_1 \leq h_r \end{cases}, \quad (5)$$

$$k_a = \begin{cases} 54, & h_1 > h_r \\ 54 - 0,8(h_1 - h_r) & \text{for } d_{km} \geq 0,5, h_1 \leq h_r \\ 54 - 1,6d_{km}(h_1 - h_r), & \text{for } d_{km} < 0,5, h_1 \leq h_r \end{cases}, \quad (6)$$

$$k_d = \begin{cases} 18, & h_1 > h_r \\ 18 - 15(h_1 - h_r) / h_r, & h_1 \leq h_r \end{cases}, \quad (7)$$

$$k_f = \begin{cases} -4 + 0,7(f_{MHz} / 925 - 1) & \text{для слабопересеченного рельефа} \\ -4 + 1,5(f_{MHz} / 925 - 1) & \text{для сильнопересеченного рельефа} \end{cases} \quad (8)$$

В качестве примера затухания по результатам расчетов получены зависимости потери уровня сигнала с увеличением расстояния при его изменении от 0 до 25 км на наиболее характерных частотах телевизионных сигналов (рис. 4): 1,080 ГГц (сплошная линия), 711,25 МГц (точечная линия), 191,25 МГц (пунктирная линия).

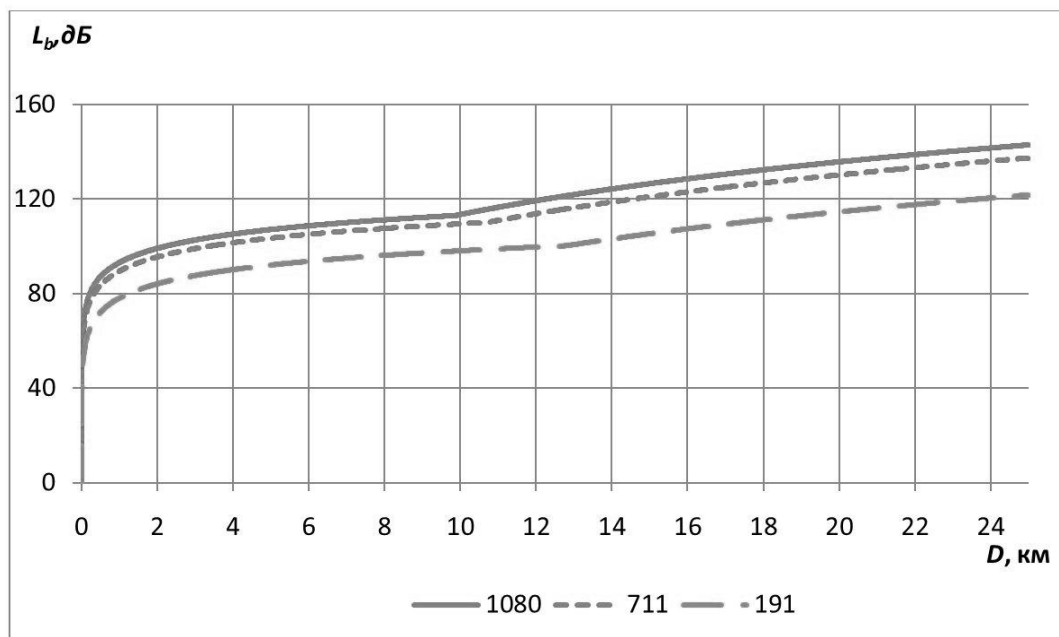


Рис. 4. Изменение потерь с увеличением расстояния

### Имитация влияния параметров приемника на результат приема сигнала.

Для имитации влияния чувствительности приемника на уровень принимаемого сигнала использовано выражение [21], учитывающее мощность излучателя БВС, потери на трассе БВС-приемника и параметры излучателя БВС, приемника и запаса мощности на замирание:

$$P_{inMS} = P_{outMS} - L_p - I + G_A^{MS} - L_{CMS} - L_{FMS} \quad (9)$$

где  $P_{inMS}$  – мощность на входе приемника, дБмВт;

$P_{outMS}$  – максимальная мощность на выходе излучателя БВС, дБмВт;

$L_p$  – потери на трассе, дБ;

$G_A^{MS}$  – коэффициент усиления приемника, дБ;

$L_{CMS}$  – потери в изоляторе, комбайнере и фильтре приемника, дБ;

$L_{FMS}$  – потери в фидере и соединителях приемника, дБ;

$I$  – запас на покрытие в зданиях (замирания и взаимные препятствия), дБ.

**Имитация влияния многолучевости и зон тени.** Для имитации многолучевости и зон тени наряду с моделью Уолфиша-Икегами были сформированы «зашумленные» сигналы, степень зашумления определялась по результатам расчетов с использованием геометрической оптики.

На рис. 5 представлено взаимное расположение плоскости антенны приемника, излучателя, лучей и зон тени.

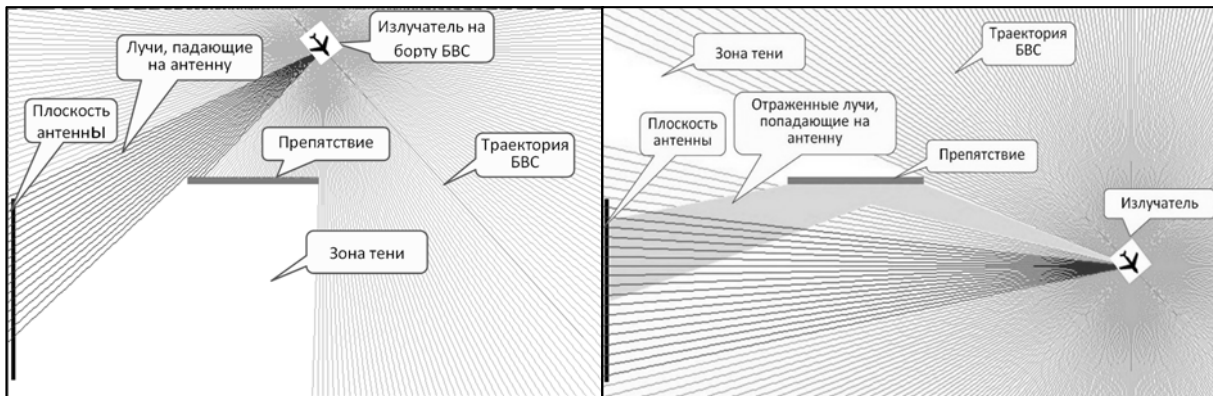


Рис. 5. Схема перемещения излучателя и распространения лучей на плоскость антенны

На рис. 5 в виде линии черного цвета слева показано положение плоскости одной из антенн приемника, в верхней части схемы в виде линии серого цвета – положение препятствия, создающего отражение лучей и зону тени, справа по диагонали сверху вниз – положение траектории перемещения БВС, формирующего всенаправленное излучение. При отсутствии препятствий все лучи попадают на плоскость антенны (рис. 5, слева). Наличие препятствия экранирует прохождение лучей к плоскости антенны, вследствие чего возникают зоны тени (область белого цвета). При дальнейшем движении излучателя возникает переотражение лучей от плоскости препятствия (рис. 5, справа), и лучи переотраженного сигнала попадают на плоскость антенны – наряду с прямыми лучами. Отражение лучей от препятствия приводит к формированию многолучевости распространения сигнала.

Для оценки расстояний, проходимых лучами при переотражении, при имитации использованы подходы геометрической оптики.

Угол направления прихода центрального луча на плоскость антенны определяется выражением:

$$Q_{pr} = \operatorname{arctg} \frac{Y_a - Y_b}{X_a - X_b} \quad \text{при } X_a \neq X_b, \quad (10)$$

где  $X_a, Y_a$  – координаты середины плоскости антенны;

$X_b, Y_b$  – координаты БВС.

Расстояние, проходимое центральным лучом, определяется выражением:

$$L_{pr} = \sqrt{(X_a - X_b)^2 + (Y_a - Y_b)^2} \quad . \quad (11)$$

Остальные попадающие на плоскость антенны лучи слева–справа, сверху–снизу проходят расстояние:

$$L_{pr} = \sqrt{(X_a^* - X_b)^2 + (Y_a^* - Y_b)^2} \quad , \quad (12)$$

где  $X_a^*, Y_a^*$  определяются в полярной системе координат из выражений:

$$\begin{aligned} X_a^* &= X_a + L_a \sin Q_a \\ Y_a^* &= Y_a + L_a \cos Q_a \end{aligned} \quad , \quad (13)$$

где  $Q_a$  – угол ориентации плоскости антенны относительно направления на Север;

$L_a$  – полудлина плоскости антенны.

При наличии препятствия координаты положения точки, от которой происходит отражение луча излучаемого сигнала, определяются для всех точек  $X_p$  препятствия из диапазона  $X_p = L_{pp}$  и  $Y_{ot} = Y_p + H_{pp}$  при ориентации препятствия под углом  $90^\circ$  по направлению на север. Здесь  $X_p, Y_p$  – координаты положение середины препятствия;  $X_p$  определяется выражением

$$X_p = (Y_p - Y_a) \frac{X_b - X_a}{Y_b - Y_a} + X_a$$

где  $L_{pp}$  – протяженность препятствия;  $H_{pp}$  – ширина препятствия.

Координаты точки отражения от препятствия определяются выражениями:

$$Y_{ot} = Y_p + H_{pp} \quad (14)$$

$$X_{ot} = \frac{Y_{ot} - (2Y_p - Y_a)(X_b - X_a)}{Y_b - (2Y_p - Y_a)} + X_a, \quad (15)$$

направление прихода отраженного сигнала на плоскость антенны  $A$ :

$$Q_{ot} = \operatorname{arctan} \frac{Y_a - Y_{ot}}{X_a - X_{ot}} \quad . \quad (16)$$

Пройденное отраженным лучом расстояние определяется суммой расстояний, пройденных прямым и отраженным лучами:

$$L_{pr} = \sqrt{(X_a - X_b)^2 + (Y_a + Y_b)^2} \quad . \quad (17)$$

При ориентации антенны на угол  $Q_a$  пройденные отраженными лучами расстояния определяются аналогично выражениям (12) – (13).

Определение затухания сигнала и расстояния, пройденного отраженными лучами при явном отражении, позволяют имитировать уровень сигнала на входе приемника.

**Имитация разности моментов прихода сигналов и погрешности определения местоположения.** Имитация разности моментов прихода сигналов происходит с использованием корреляционного анализа. Смысл корреляционного анализа состоит в количественном измерении степени сходства различных сигналов, принятых приемниками 1,2,3,4. Для этого используется взаимная корреляционная функция, которая позволяет измерить степени сходства различных сигналов для сдвинутых экземпляров двух разных сигналов [22].

Задача состояла в оценке с помощью имитаторов сигналов возможности определения разности прихода сигналов с применением корреляционного анализа. Для этого на вход корреляционной функции подавались сигналы разной степени зашумленности, сформированные на предыдущих этапах имитации.

**Имитация влияния сигнала БВС на погрешность определения местоположения БВС.** При использовании разностно-дальномерного метода для определения координат  $(x_r, y_r, z_r)$  положения излучателя решается система уравнений вида [3]:

$$\begin{cases} \sqrt{(x_2 - x_r)^2 + (y_2 - y_r)^2 + (z_2 - z_r)^2} - \sqrt{(x_1 - x_r)^2 + (y_1 - y_r)^2 + (z_1 - z_r)^2} = \Delta r_{21} \\ \sqrt{(x_3 - x_r)^2 + (y_3 - y_r)^2 + (z_3 - z_r)^2} - \sqrt{(x_1 - x_r)^2 + (y_1 - y_r)^2 + (z_1 - z_r)^2} = \Delta r_{31} , \\ \sqrt{(x_4 - x_r)^2 + (y_4 - y_r)^2 + (z_4 - z_r)^2} - \sqrt{(x_1 - x_r)^2 + (y_1 - y_r)^2 + (z_1 - z_r)^2} = \Delta r_{41} \end{cases} \quad (18)$$

где  $\Delta r_{21}$  ,  $\Delta r_{31}$  ,  $\Delta r_{41}$  – значения трех разностей дальностей от приемников до положения излучателя с неизвестными координатами  $(x_r, y_r, z_r)$ .

Полученные погрешности определения разности моментов прихода сигналов подставлялись в систему (18), и по результатам ее решения оценивалась погрешность определения положения БВС.

Имитация функционирования системы определения местоположения БВС реализована в среде LabVIEW на аппаратных средствах, аналогичных кейтам National Instruments.

Для имитации работы системы определения местоположения малоразмерного робототехнического комплекса задавались различные тактические эпизоды, характеризующиеся:

- трассой полета БВС;
- положением объектов, создающих зону тени и многолучевость;
- средой, приводящей к затуханию сигнала;
- размещением пунктов приема сигнала БВС;
- возможностью задания различных сигналов БВС из предлагаемого меню.

Результатом имитации является возможность получения оценки погрешности определения положения БВС в зависимости от качества излучаемого с его борта сигнала.

Полученные с использованием разработанной имитационной системы результаты позволили определить места размещения пунктов приема у береговой черты в условиях плотной городской застройки (рис. 6).

**Результаты натурального эксперимента.** Для проведения натурального эксперимента в расчетных местах, полученных с использованием имитации работы системы определения местоположения БВС, были размещены приемники, в качестве излучателя использован сигнал телевизионной башни, аналогичный видеопотоку, передаваемому с борта БВС.

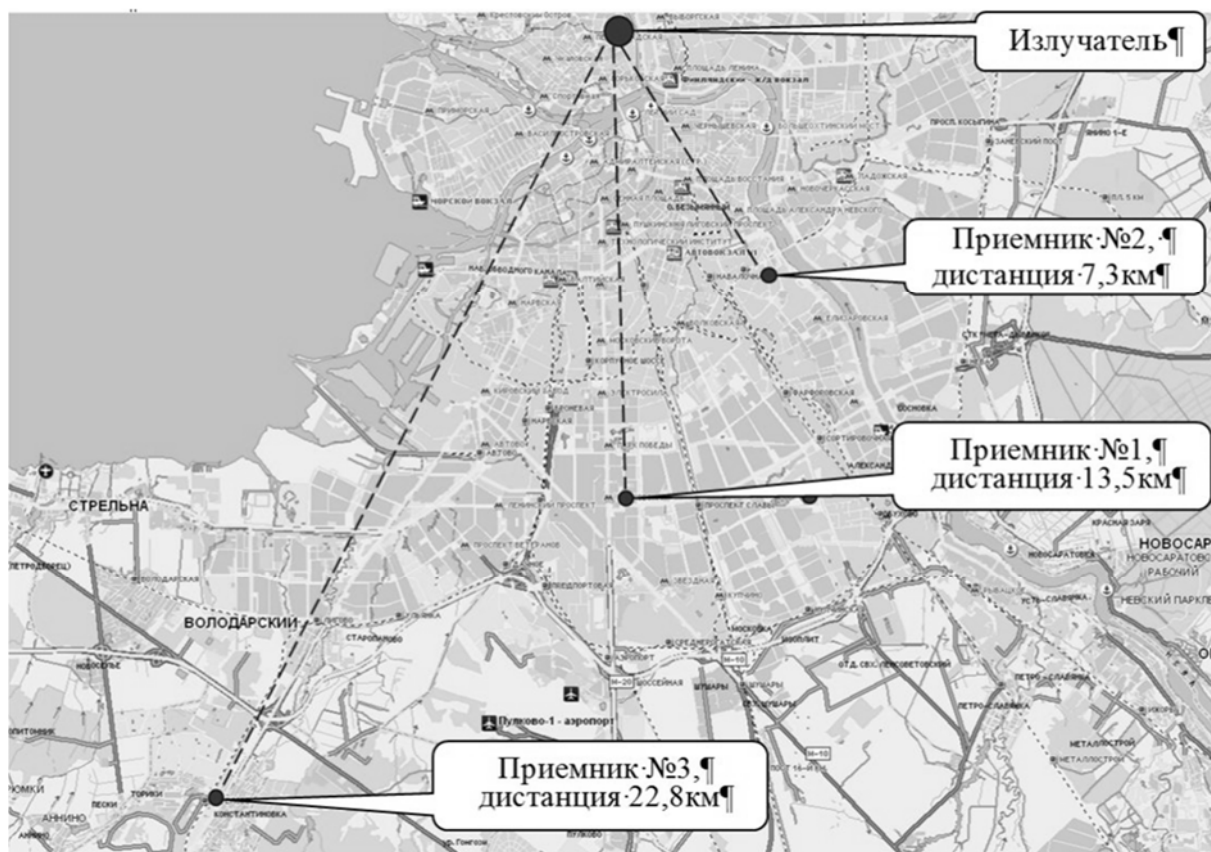


Рис. 6. Схема размещения излучателя и приемников

В ходе эксперимента осуществлялась синхронная с погрешностью 0,5 мкс запись сигнала на каждом пункте приема, после чего по модему сотовой связи в автоматическом режиме записанные файлы передавались в пункт обработки информации для оценки разности прихода сигналов и определения местоположения излучателя.

По результатам проведения имитационного эксперимента оказалось, что при высокой степени зашумленности определение разности с использованием корреляционного анализа оказалось невозможным, так как появлялось несколько локальных максимумов, равных по величине. При средней степени зашумленности разность прихода сигналов определялась, однако с погрешностью. При этом затухание сигнала полностью соответствовало расчетным значениям, определение разности произошло с погрешностью в 1 отсчет длительностью 0,5 мкс из-за отражения сигнала от стены противоположного дома, что привело к погрешности определения местоположения источника сигнала 50 м.



Проведение натурального эксперимента по определению местоположения источника реального телевизионного сигнала подтвердило правильность имитации сигналов, потерь при распространении и влиянии частоты и дальности до источника, отражающих поверхностей и многолучевости распространяемые в реальных условиях сигналов. Выбор места размещения приемников сигналов также подтвердил расчетное затухание в зависимости от частоты сигнала.

### **Заключение**

Разработан программно-аппаратный комплекс имитации работы системы определения местоположения малоразмерного робототехнического комплекса по сигналу, излучаемому с его борта. При имитации учтено затухание сигнала, его пропадание из-за попадания приемника в зону тени, отражение сигнала от поверхностей. Реализованы корреляционный анализ имитируемых сигналов для получения разности прихода сигналов и определение местоположения БВС разностно-дальномерным методом. Имитация затухания и переотражения сигналов позволила оценить допустимые дальности расположения пунктов приема от прогнозируемой трассы движения БВС при различных вероятных частотах сигнала БВС, прогнозировать погрешности определения разности моментов прихода сигналов и погрешности определения местоположения БВС. Результаты натуральных испытаний подтвердили адекватность имитационного моделирования.

Работа выполнена при поддержке РНФ, проект 23-29-00803.

Авторы выражают благодарности Константину Ланцову и Валентину Ланцову за программную реализацию имитации системы определения местоположения малоразмерного робототехнического комплекса, а также организацию и проведение натурального эксперимента.

### **Литература**

1. Классификация БПЛА по летным характеристикам // Электронный ресурс: <https://docs.geoscan.aero/ru/master/database/const-module/classification/classification.html> (дата обращения 13.05.2022).
2. Взрыв на территории штаба Черноморского флота в Севастополе был маломощным. Электронный ресурс <https://www.interfax.ru/russia/854605> (дата обращения 24.03.2023).
3. **Мартынова Л.А., Koryakin A.V., Lantsov K.V., Lantsov V.V.** Determination of coordinates and parameters of a moving object by image processing // *Computer Optics*. 2012. Vol. 36. № 2. P. 266–273.
4. **Мартынова Л.А., Розенгауз М.Б.** К вопросу о надежности автономного необитаемого подводного аппарата с мультиагентной архитектурой системы управления // *Информационно-управляющие системы*. 2016. № 5 (84). С. 25–34.
5. **Быкова В.С., Мартынова Л.А., Машошин А.И., Пашкевич И.В.** Диспетчер мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата: структура, алгоритмы, результаты моделирования // *Гироскопия и навигация*. 2020. Т. 28. № 3 (110). С. 109–121.
6. **Мартынова Л.А., Машошин А.И.** Особенности оценки эффективности функционирования автономных необитаемых подводных аппаратов в нештатных ситуациях // *Экстремальная робототехника*. 2016. Т. 1. № 1. С. 86–91.
7. Аэромагнитная съемка с БАС и геологоразведка. Электронный ресурс <https://radar-mms.com/product/magnitometrisheskie-sistemy/monitoring-magnit/> (дата обращения 25.04.2023).

8. **Волков Р.В., Дворников С.В., Саяпин В.Н., Симронов А.Н.** Основы построения и функционирования разностно-дальномерных систем координатометрии источников радиоизлучений. СПб.: ВАС, 2013. 115 с.
9. Drones/UAV Simulation Software and Solutions. Электронный ресурс <https://mosimtec.com/industries/drone-simulation/>.
10. Simulate drone algorithms in a virtual environment. Электронный ресурс: <https://www.mathworks.com/discovery/drone-simulation.html>.
11. **Juan A. Besada, Ivan Campaña, David Carramiñana, Luca Bergesio and Gonzalo de Miguel.** Management Review and Simulation of Counter-UAS Sensors for Unmanned Traffic. Электронный ресурс: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/1/189>.
12. Improving real-time drone detection for counter-drone systems. Электронный ресурс: [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/359189/improving\\_realtime\\_drone\\_detection\\_for\\_counterdrone\\_systems.pdf?sequence=1](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/359189/improving_realtime_drone_detection_for_counterdrone_systems.pdf?sequence=1).
13. UAV Modeling and Testing. Электронный ресурс <https://www.speedgoat.com/solutions/industries/aerospace/uav-modeling-and-testingю>.
14. Simulation of compressed sensing based passive radar for drone detection. Электронный ресурс <https://ieeexplore.ieee.org/document/8270552>.
15. Drone Radar Simulation. Электронный ресурс: [https://play.google.com/store/apps/details?id=de.afapps.droneradar&hl=en\\_US](https://play.google.com/store/apps/details?id=de.afapps.droneradar&hl=en_US).
16. **Payal Mittal, Akashdeep Sharma, Raman Singh.** A Simulated Dataset in Aerial Images using Simulink for Object Detection and Recognition Author links open overlay panel Электронный ресурс: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666307422000146>.
17. New VR simulator for airspace traffic management to showcase skies of tomorrow. Электронный ресурс: <https://dronedj.com/2023/03/01/drone-airspace-traffic-management-simulator/>.
18. **Yun-Taek Ima, and Young-San Choi.** A Dual-Mode Radar Signal Controller for a Drone Detection System. Электронный ресурс [https://www.kns.org/files/pre\\_paper/46/21A-265-%EC%9E%84%EC%9C%A4%ED%83%9D.pdf](https://www.kns.org/files/pre_paper/46/21A-265-%EC%9E%84%EC%9C%A4%ED%83%9D.pdf).
19. Ray-Tracing Analysis and Simulator Design of Unmanned Aerial Vehicle Communication and Detection System in Urban Environment. Электронный ресурс <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1699665/FULLTEXT01.pdf>.
20. **Jukka Lempinen, Matti Manninen.** “Radio interface system planning for GSM/GPRS/UMTS”, Kluwer Academic publishers, New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow/ 2004.
21. **Сундучков К. С., Мальчук М А., Кобзарь Л.С.** Методика определения оптимальной топологии сети GSM для городского микрорайона. Электронный ресурс: <https://pandia.ru/text/77/132/891.php> (дата обращения 03.11.2022).
22. **Сергиенко А.Б.** Цифровая обработка сигналов. / Учебник для вузов. СПб.: Питер, 2003. 608 с.