

## Литература

1. Алдошина И.Т. Основы психоакустики // Звукорежиссер: сб. статей. М., 2010. С. 235–315.
2. Аудиоредактор // Википедия. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Аудиоредактор> (дата обращения: 20.09.2019).
3. Бидерман В.А. Теория механических колебаний. М.: Высшая школа, 1980. 408 с.
4. Влияние музыки, звука и вибрации на психику и сознание человека // Иисиидеология. URL: <http://iisiiideology.net/ru/publikatsii/22-mekhanizmu-raboty-samosoznaniya/25> (дата обращения: 04.03.2019).
5. Назаров Д.В., Ахмедзянов В.Р. Медико-психологическое воздействие инфразвука на организм человека // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2005. № 1 (11). С. 123–126.
6. Bretherton F.P. Resonant Interactions Between Waves // Journal of Fluid Mechanics. 1964. Vol. 20. P. 457–479.
7. Richardson L.F. Weather Prediction by Numerical Process. Cambridge, 1922.

## Literatura

1. Aldoshina I.T. Osnovy psikhoakustiki // Zvukorezhisser: sb. statej. M., 2010. S. 235–315.
2. Audioredaktor // Vikipediya. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Audioredaktor> (data obrashcheniya: 20.09.2019).
3. Biderman V.L. Teoriya mekhanicheskikh kolebanij. M.: Vysshaya shkola, 1980. 408 s.
4. Vliyanie muzyki, zvuka i vibratsii na psikhiku i soznanie cheloveka // Iisiiideologiya. URL: <http://iisiiideology.net/ru/publikatsii/22-mekhanizmu-raboty-samosoznaniya/25> (data obrashcheniya: 04.03.2019).
5. Nazarov D.V., Akhmedzyanov V.R. Mediko-psikhologicheskoe vozdejstvie infrazvuka na organizm cheloveka // Vestnik Rossijskogo universiteta družby narodov. Seriya: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. 2005. № 1 (11). S. 123–126.
6. Bretherton F.P. Resonant Interactions Between Waves // Journal of Fluid Mechanics. 1964. Vol. 20. P. 457–479.
7. Richardson L.F. Weather Prediction by Numerical Process. Cambridge, 1922.

DOI: 10.25586/RNU.V9I187.20.01.P031

УДК 621.396.96

Н.И. Алимов, А.Л. Пономарев, Д.А. Шубин

МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
БОРТОВОГО РАДИОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА  
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Исследованы возможности увеличения дальности обнаружения объекта наблюдения пассивным бортовым радиотехническим комплексом за счет комплексирования информации о наземной обстановке, полученной с помощью радиотехнических средств, функционирующих на различных физических принципах. Описана методика повышения качества получаемой информации о наземной обстановке путем комплексирования входящих в состав бортового радиотехнического комплекса радиотехнической и радиотеплолокационной систем и дается оценка эффективности комплексирования информации измерительных каналов различной физической природы.

*Ключевые слова:* пассивная радиолокация, радиотеплолокация, дистанционное зондирование Земли.

N.I. Alimov, A.L. Ponomarev, D.A. Shubin

## EFFECIENCE EVALUATION METHOD OF ON-BORD RADIO ENGINEERING COMPLEX OF EARTH REMOTE SENSING

Explored the possibility of increasing detection range of the observation object by passive onboard radio engineering complex by combining information about ground environment, which is obtained by means of radio equipment operating on various physical principles. The method of improving quality of information about ground environment by consolidation of onboard radiotechnical are described and radioinfrared detection systems and describes an evaluation of summation efficiency information of measuring channels of different physical nature.

*Keywords:* passive radar, radiometry, Earth remote sensing.

Применение систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) показало, что в условиях сложной фоноцелевой обстановки данные системы должны решать ряд специфических задач, среди которых обнаружение и распознавание типа целей, определение координат обнаруженных объектов и параметров их движения. Одним из вариантов решения подобных задач является комплексирование информационных каналов различной физической природы, что позволяет одновременно повысить помехозащищенность, точность и достоверность получаемых данных [3]. В качестве радиотехнических систем, подлежащих комплексированию, в работе рассматриваются многопозиционная радиотехническая и радиотеплолокационная (РТЛ) системы. Принцип работы таких систем основан на фиксации контраста радиоизлучения объектов, который возникает из-за различных коэффициентов поглощения и отражения материалов. Преимуществом РТЛ систем над инфракрасными (ИК) является всепогодность, т.е. способность получать изображения объектов независимо от погодных условий и времени суток. Так, дождь или туман ведут лишь к небольшой потере контраста радиоизображений, но являются серьезной проблемой для ИК приборов. В таблице 1 представлены эффективные температуры земных покровов и объектов [2].

Таблица 1

## Эффективные температуры земных покровов и объектов

Наименование объекта	$T_{об}, K$
Здания	230–250
Металлические конструкции	~50
Реки и озера	170–200
Почвы и растительность	260–275
Лесные массивы	270–285

Радиотепловой контраст объекта по отношению к фону  $\Delta T_k$  создается за счет разности яркостных температур фона  $T_\phi$  и объекта  $T_{об}$ , таким образом, радиотепловой контраст металлических объектов на фоне растительности составляет 210–225 K (см. табл. 1).

Чувствительность радиометрического датчика определяется известным выражением

$$\Delta T_{\min} = \frac{\alpha T_{ш. \min}}{v \sqrt{2 \Delta F_{вч} t_c}}, \quad (1)$$

Алимов Н.И., Пономарев А.Л., Шубин Д.А. Методика оценивания эффективности...

где  $\alpha$  – коэффициент, определяемый типом радиометра ( $\alpha = 1 \dots 2$ );  $T_{ш.мин}$  – минимальная шумовая температура, достижимая величина порядка  $5^\circ\text{C}$ ;  $\nu$  – коэффициент использования ДНА ( $\approx 0,5$ ); [7].

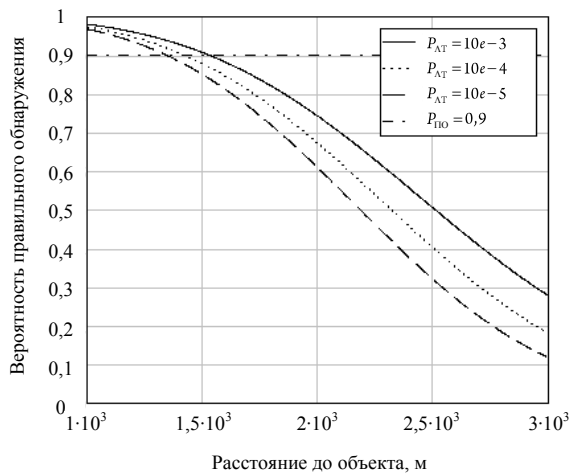
Пороговое обнаружение малоразмерных целей возможно при условии  $\Delta T_k \geq T_{ш.мин}$ . Исходя из заданных вероятностей правильного обнаружения  $P_{ПО}$  и ложной тревоги  $P_{ЛТ}$ , требуемое соотношение сигнал/шум выходного сигнала по напряжению  $q$  определяется выражением

$$q = \frac{u_c}{u_{ш}} = \Delta T_k \frac{\sqrt{2\Delta F_{вч} t_c}}{\alpha T_{ш.мин}}. \tag{2}$$

Для определения возможности обнаружения объектов радиометрическим средством наблюдения была применена модель, рассмотренная в работе [9]. Исследуемым параметром в ней является вероятность правильного обнаружения при заданной вероятности ложной тревоги, определяемая согласно критерию Неймана – Пирсона:

$$P_{ПО} = P_{ЛТ}^{\frac{1}{1+q^2/2}}. \tag{3}$$

На рисунке 1 представлен график зависимости вероятности правильного обнаружения наземных объектов  $P_{ПО}$  от расстояния до объекта (цели) наблюдения при различных значениях радиотепловой контрастности объектов.

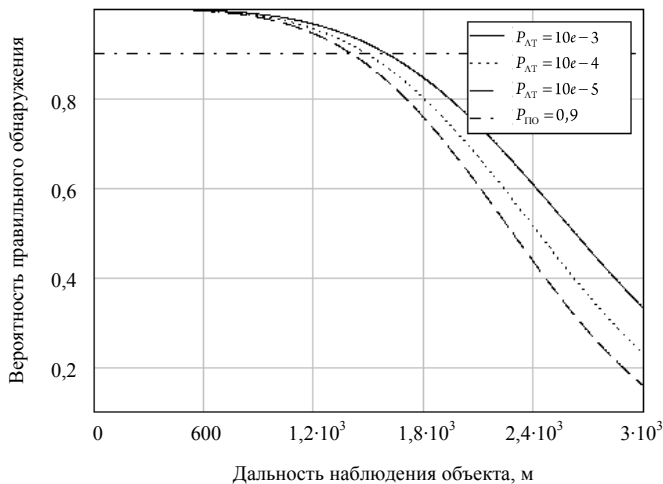


**Рис. 1.** Зависимость вероятности правильного обнаружения наземных объектов от их дальности при различных значениях радиотеплового контраста

Из анализа графика следует, что дальность действия радиотеплолокатора является недостаточной для современных радиотехнических систем мониторинга при требуемом уровне вероятности обнаружения. Одним из путей повышения показателя вероятности правильного обнаружения является интеграция пассивных систем. В настоящее время большой интерес в области радиолокации получили бистатистические радиолокационные системы, использующие сигналы глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) в целях ДЗЗ и др. Данный вид пассивной радиолокации имеет ряд преимуществ

перед классической схемой построения наземного бистатического радара. Во-первых, сложность обнаружения за счет пассивного приема; во-вторых, простота конструкции; в-третьих, сигналы спутниковых систем покрывают всю поверхность Земли. В работах [9; 10; 11] рассматривался вопрос приема отраженных радионавигационных сигналов ГНСС ГЛОНАСС.

На рисунке 2 представлен график зависимости вероятности правильного обнаружения  $P_{\Pi O}$  от расстояния до объекта (цели) наблюдения при приеме отраженных сигналов ГНСС при различных вероятностях ложной тревоги.



**Рис. 2.** Зависимость вероятности правильного обнаружения наземных объектов от расстояния до них при приеме отраженных сигналов ГНСС

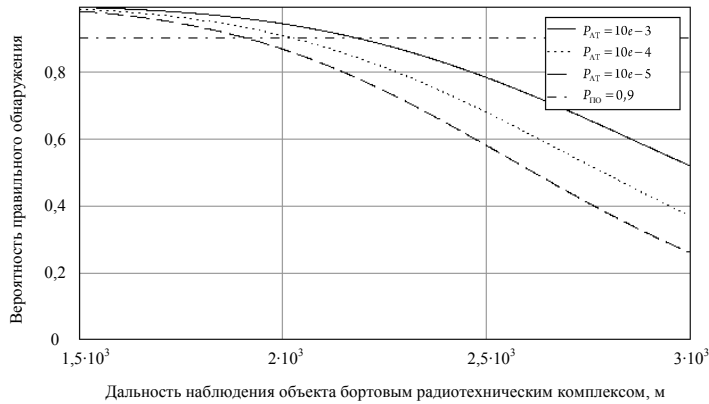
Повышение эффективности бортового радиотехнического комплекса состоит в комплексном объединении всех доступных результатов измерений сигнальной и координатной информации об объектах наблюдения от нескольких датчиков в единый вектор измерений с комплексной многомерной оптимальной обработкой информации.

В случае комплексирования радиометрической системы с радиотехнической, принимающей отраженные сигналы ГЛОНАСС в единый бортовой радиотехнический комплекс (БРТК), повышаются такие частные показатели эффективности функционирования БРТК, как вероятность правильного обнаружения объекта наблюдения и точность определения координат.

1. Интеграционная вероятность правильного обнаружения  $P_{\Pi O \Sigma}$  будет определяться выражением

$$P_{\Pi O \Sigma} = 1 - (1 - P_{\Pi O, PM})(1 - P_{\Pi O, PT}). \quad (4)$$

В результате объединения информации от радиотехнических средств (РТС) (рис. 3), работающих на различных физических принципах, требование современных систем обнаружения по вероятности правильного обнаружения ( $P_{\Pi O} = 0,9$ ) обеспечивается на расстоянии более 2000 м.



**Рис. 3.** Зависимость вероятности правильного обнаружения наземных объектов от расстояния до них при объединении информации от радиотехнических средств

В таблице 2 представлены сравнительные данные о дальности действия средств обнаружения.

Таблица 2

**Сравнительные данные о дальности действия средств обнаружения**

Дальность обнаружения при P <sub>ПО</sub> = 0,9	Средство обнаружения		
	Теплорадиолокационное	Радиотехническое (ГНСС ГЛОНАСС)	БРТК
P <sub>ЛМ</sub> = 10 <sup>-3</sup>	1530	1600	2200
P <sub>ЛМ</sub> = 10 <sup>-4</sup>	1420	1500	2000
P <sub>ЛМ</sub> = 10 <sup>-5</sup>	1350	1400	1900

2. При объединении информации от РТС значение комплексированной оценки координаты при некоррелированных измерениях, согласно [1; 8], примет вид

$$Z_{\Sigma} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\sigma_{Z_{PT}}^2} + \frac{1}{\sigma_{Z_{PM}}^2}\right)\sigma_{Z_{PT}}^2} \hat{Z}_{PT} + \frac{1}{\left(\frac{1}{\sigma_{Z_{PT}}^2} + \frac{1}{\sigma_{Z_{PM}}^2}\right)\sigma_{Z_{PM}}^2} \hat{Z}_{PM} = \frac{\hat{Z}_{PT} \sigma_{Z_{PM}}^2 + \hat{Z}_{PM} \sigma_{Z_{PT}}^2}{\sigma_{Z_{PT}}^2 + \sigma_{Z_{PM}}^2}, \quad (5)$$

а дисперсия определения координат объекта наблюдения при разноточных некоррелированных измерениях определяется как

$$\sigma_{\Sigma}^2 = \frac{\sigma_{Z_{PT}}^2 \sigma_{Z_{PM}}^2}{\sigma_{Z_{PT}}^2 + \sigma_{Z_{PM}}^2}. \quad (6)$$

Целесообразность комплексирования РТС по точности и по степени подавления помехами определяется как

$$\Lambda = \begin{cases} \left| \sigma_{Z_i}^2 - \sigma_{Z_j}^2 \right| \leq \Delta \Rightarrow \lambda_i = 1, \lambda_j = 1; \\ \sigma_{Z_i}^2 \leq \sigma_{Z_j}^2 \Rightarrow \lambda_i = 1, \lambda_j = 0. \end{cases} \quad (7)$$

На рисунке 4 представлена структурная схема оценки координат при объединении данных от РТЛ и РТС наблюдений.

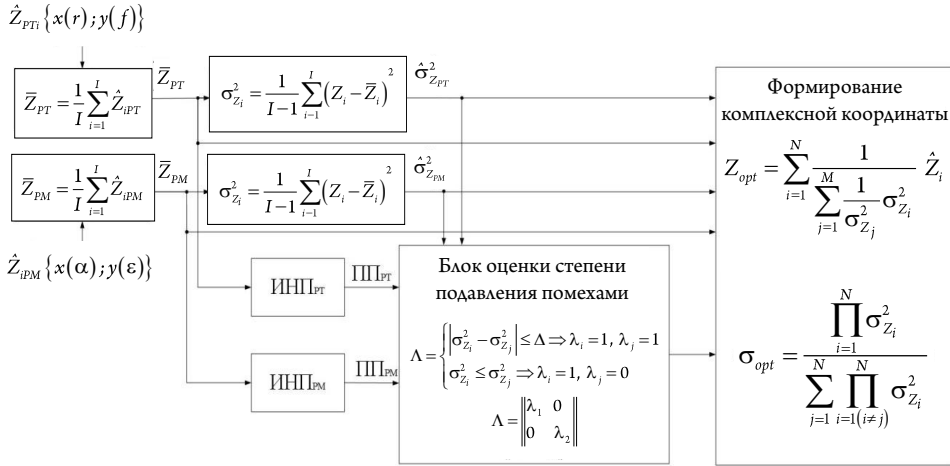


Рис. 4. Схема оценки координат в БРТК по результатам измерений независимых радиотехнических средств

Результаты моделирования зависимости значения среднеквадратичного отклонения (СКО) ошибки комплексированной системы от времени при комплексировании данных и воздействии помех показаны на рисунке 5. Примером такой помехи может быть использование ложных целей – ловушек, на время действия которых в ряде случаев пеленгатор отслеживает положение энергетического центра ловушки, что приводит к отклонению линии визирования от направления на объект [5; 6]. Воздействие этой помехи приводит к резкому (скачкообразному) изменению сигнала на входе средства измерения, но при правильно выбранном времени формирования оценки дисперсий результирующее влияние на комплексированную систему нивелируется [4; 12].

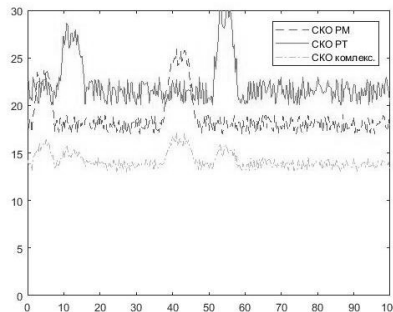


Рис. 5. СКО измерения координат объекта наблюдения БРТК

Анализ графика позволяет сделать вывод о том, что применение комплексирования дает возможность, помимо увеличения точности отслеживания координаты, повысить помехозащищенность БРТК при воздействии помехи на одно из радиотехнических средств.

\*\*\*

Объединение информации о наземной обстановке от источников, функционирующих на различных физических принципах, позволяет добиться значительного увеличения дальности пассивными радиотехническими средствами обнаружения наземных объектов с требуемыми характеристиками – до 2000 м.

Комплексирование датчиков различной физической природы, отслеживающих изменение одного и того же процесса, позволяет уменьшить СКО ошибки оцениваемой координаты в условиях как одинаковой, так и различной точности первичных измерений датчиками. Применение индикаторов неинформативных параметров при комплексировании информации измерителей координаты в бортовой системе наблюдения летательного аппарата позволяет добиться нейтрализации действия помехи по одному из информационных каналов и минимизации ее воздействия на систему наблюдения.

В результате комплексирования разнородных средств измерения в БРТК были повышены следующие характеристики обнаружения:

- 1) на 20% вероятность обнаружения на дальности до 2000 м (с 0,75 до 0,95);
- 2) на 42% точность определения координат (с 20 до 14 м).

### Литература

1. Анцев Г.В., Борисов Е.Г., Турнецкий Л.С. Интеллектуальные комплексированные системы самонаведения с координаторами различной физической природы // Вопросы оборонной техники. Серия 9: Специальные системы управления, следящие приводы и их элементы. 2011. № 1–2. С. 124–128.
2. Быстров Р.П., Загорин Г.К., Соколов А.В., Федорова Л.В. Пассивная радиолокация: методы обнаружения объектов: монография / под ред. Р.Л. Быстрова, А.В. Соколова. М.: Радиотехника, 2008. 320 с.
3. Иванов Ю.П., Синяков А.Н., Филатов И.В. Комплексирование информационно-измерительных устройств летательных аппаратов. Л.: Машиностроение, 1984. 207 с.
4. Нечай А.А. Моделирование системы управления робототехническим комплексом ликвидации чрезвычайных ситуаций на основе многомерных копула-функций // Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники: сборник статей III Всероссийской научно-практической конференции. СПб., 2016. С. 287–292.
5. Нечай А.А. Формирование безопасной информационной среды // Актуальные проблемы современности: наука и общество. 2019. № 4 (25). С. 43–44.
6. Нечай А.А., Борисов А.А., Борисова Ю.И. Точечный анализ данных дистанционного зондирования Земли средствами языка программирования Python // Вестник Российского нового университета. Серия «Сложные системы: модели, анализ и управление». 2019. Вып. 1. С. 49–55.
7. Николаев А.Г., Перцев С.В. Радиотеплокация. М.: Советское радио, 1964. 335 с.
8. Тейлор Дж. Введение в теорию ошибок. М.: Мир, 1985. 272 с.
9. Филиппов А.А. и др. Бортовые пассивные системы наблюдения земной поверхности с использованием сигналов спутниковых радионавигационных систем // Радиолокационное исследование природных сред: труды XXIX Всероссийского симпозиума. СПб., 2016. С. 175–182.
10. Филиппов А.А., Разумов А.В., Пономарев А.Л., Погребская С.В. Объединение информации о наземной обстановке средств наблюдения различной физической природы // Во-

просы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2015. № 7–8. С. 90–94.

11. Филиппов А.А., Шуватов А.В., Пономарева Э.В. Повышение дальности обнаружения объектов наблюдения пассивными средствами за счет комплексирования датчиков, работающих на различных физических принципах // Актуальные проблемы защиты и безопасности: сборник трудов 19-й Всероссийской научно-практической конференции (Санкт-Петербург, 4–7 апреля 2016 г.). СПб.: НПО Спецматериалов, 2016. Т. 5. С. 258–265.

12. Шаймарданов А.М., Нечай А.А., Лепехин С.В. Математические модели систем автоматического управления с широтно-импульсной модуляцией // Вестник Российского нового университета. Серия «Сложные системы: модели, анализ и управление». 2019. Вып. 2. С. 27–39.

### Literatura

1. Antsev G.V., Borisov E.G., Turnetskij L.S. Intellektual'nye kompleksirovannye sistemy samonavedeniya s koordinatorskimi razlichnoj fizicheskoj prirody // Voprosy obronnoj tekhniki. Seriya 9: Spetsial'nye sistemy upravleniya, sledyashchie privody i ikh elementy. 2011. № 1–2. S. 124–128.

2. Bystrov R.P., Zagorin G.K., Sokolov A.V., Fedorova L.V. Passivnaya radiolokatsiya: metody obnaruzheniya ob"ektov: monografiya / pod red. R.L. Bystrova, A.V. Sokolova. M.: Radiotekhnika, 2008. 320 s.

3. Ivanov Yu.P., Sinyakov A.N., Filatov I.V. Kompleksirovanie informatsionno-izmeritel'nykh ustrojstv letatel'nykh apparatov. L.: Mashinostroenie, 1984. 207 s.

4. Nechaj A.A. Modelirovanie sistemy upravleniya robototekhnicheskimi kompleksami likvidatsii chrezvychajnykh situatsij na osnove mnogomernykh kopula-funktsij // Sovremennye problemy sozdaniya i ekspluatatsii vooruzheniya, voennoj i spetsial'noj tekhniki: sbornik statej III Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferentsii. SPb., 2016. S. 287–292.

5. Nechaj A.A. Formirovanie bezopasnoj informatsionnoj sredy // Aktual'nye problemy sovremennosti: nauka i obshchestvo. 2019. № 4 (25). S. 43–44.

6. Nechaj A.A., Borisov A.A., Borisova Yu.I. Tochechnyj analiz dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli sredstvami yazyka programmirovaniya Python // Vestnik Rossijskogo novogo universiteta. Seriya "Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie". 2019. Vyp. 1. S. 49–55.

7. Nikolaev A.G., Pertsev S.V. Radioteplokatsiya. M.: Sovetskoe radio, 1964. 335 s.

8. Tejlor Dzh. Vvedenie v teoriyu oshibok. M.: Mir, 1985. 272 s.

9. Filippov A.A. i dr. Bortovye passivnye sistemy nablyudeniya zemnoj poverkhnosti s ispol'zovaniem signalov sputnikovyx radionavigatsionnykh sistem // Radiolokatsionnoe issledovanie prirodnykh sred: trudy XXIX Vserossijskogo simpoziuma. SPb., 2016. S. 175–182.

10. Filippov A.A., Razumov A.V., Ponomarev A.L., Pogrebskaya S.V. Ob"edinenie informatsii o nazemnoj obstanovke sredstv nablyudeniya razlichnoj fizicheskoj prirody // Voprosy obronnoj tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskie sredstva protivodejstviya terrorizmu. 2015. № 7–8. S. 90–94.

11. Filippov A.A., Shuvatov A.V., Ponomareva E.V. Povyshenie dal'nosti obnaruzheniya ob"ektov nablyudeniya passivnymi sredstvami za schet kompleksirovaniya datchikov, rabotayushchikh na razlichnykh fizicheskikh printsipakh // Aktual'nye problemy zashchity i bezopasnosti: sbornik trudov 19-j Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferentsii (Sankt-Peterburg, 4–7 aprelya 2016 g.). SPb.: NPO Spetsmaterialov, 2016. T. 5. S. 258–265.

12. Shajmardanov A.M., Nechaj A.A., Lepexhin S.V. Matematicheskie modeli sistem avtomaticheskogo upravleniya s shirotno-impulsnoj modulyatsiej // Vestnik Rossijskogo novogo universiteta. Seriya "Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie". 2019. Vyp. 2. S. 27–39.