

УДК 621.396

DOI: [10.26102/2310-6018/2023.41.2.025](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.41.2.025)

Анализ возможностей пассивной радиолокации при работе в диапазоне ультракоротких волн

А.Ю. Унгер

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация
coerbi@mail.ru✉

Резюме. В статье предложен анализ радиопередатчиков, работающих в диапазоне ультракоротких волн, в качестве удобного источника сигнала для определения дальности обнаружения в пассивном бистатическом радиолокационном измерителе координат. Представлен теоретический анализ основных специфических особенностей бистатической пассивной радиолокационной станции, рассмотрены ее энергетические характеристики, а также воздействие различных видов шума при мгновенном приеме сигнала прямой подсветки и слабых сигналов, отраженных от объекта. Проведена оценка бистатических характеристик пассивной технологии при проектировании таких радиолокационных станций дальнего обнаружения объектов, а также исследован динамический диапазон приемного устройства пассивного радиолокационного измерителя координат при воздействии на него шума и мощность отраженного сигнала, которая базируется на эффективной площади рассеяния, что позволяет создать более эффективную бистатическую технологию пассивного обнаружения. Экспериментальные данные представлены в виде математического моделирования, которые включают в себя сканирование спектра диапазона ультракоротких волн в различных условиях для дальнего обнаружения объектов, рассмотрены несколько вариантов воздействия на диапазон различных условий местности и ландшафта. Результаты математического моделирования сопоставлены с теоретическим анализом специфических особенностей пассивного бистатического радиолокационного измерителя координат.

Ключевые слова: дальность обнаружения, диапазон, сигнал, радиолокационная станция (РЛС), бистатическая технология, помеха.

Для цитирования: Унгер А.Ю. Анализ возможностей пассивной радиолокации при работе в диапазоне ультракоротких волн. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2023;11(2). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1354> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.41.2.025

Analysis of passive radar capabilities when operating in the ultrashort wave range

A.Yu. Unger

MIREA – Russian Technological University, Moscow, the Russian Federation
coerbi@mail.ru✉

Abstract. The article proposes an analysis of radio transmitters operating in the ultrashort wave range as a convenient signal source for determining the detection range in a passive bistatic radar. A theoretical analysis of the main specific features of a bistatic passive radar is presented; its energy characteristics are considered along with the impact of various types of noise during instantaneous reception of a direct illumination signal and weak reflections from an object. The bistatic characteristics of the passive technology were evaluated when designing such radar for long-range object detection. Additionally, the dynamic range of the passive radar receiver when exposed to noise and the power of the reflected signal based on the effective scattering area, which makes it possible to create a more effective bistatic passive detection technology, was investigated. Experimental evidence is presented in the form of the mathematical modeling, which includes scanning the spectrum of the ultrashort wave range under

various conditions for long-range detection of objects. Several options for influencing the range of different terrain and landscape conditions are considered. The results of the mathematical modeling are compared with the theoretical analysis of the specific features of a passive bistatic radar.

Keywords: detection range, band, radar, bistatic technology, interference.

For citation: Unger A.Yu. Analysis of passive radar capabilities when operating in the ultrashort wave range. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2023;11(2). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1354> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.41.2.025 (In Russ.).

Введение

Целью данного исследования является анализ работы радиопередатчиков пассивного бистатического радиолокационного измерителя координат (ПБРИК) в диапазоне ультракоротких волн (УКВ), что является довольно прогрессивной задачей при проектировании бистатических пассивных радиолокационных станций (РЛС), так как ПБРИК представляет собой активно развивающуюся радиолокационную технологию на протяжении последнего десятилетия. Низкая себестоимость, защита от перехвата, скрытность и другие преимущества стали основой в исследованиях пассивной технологии радиолокационного обнаружения, результаты научных исследований в области пассивной радиолокации [1-2] вынудили ученых со всего мира разрабатывать новые алгоритмы моделирования для обнаружения объектов, используя различные передатчики, такие как радиосигналы связи, сигналы телевизионного вещания, сигналы мобильного телефона и Wi-Fi связь. При этом выбор подходящего источника сигнала, который будет использовать ПБРИК, сильно зависит от эксплуатационных требований, таких как максимальная дальность обнаружения, разрешающая способность по дальности, точность локализации, точность определения места и т. д. Основным же параметром является определение максимальной дальности обнаружения объекта. Ввиду высокой передаваемой мощности радиопередатчиков и большой длине волны, ПБРИК, используя УКВ диапазон, представляет собой лучшего кандидата для пассивной РЛС с возможностью дальнего обнаружения. На данный момент в мире разработано не так много пассивных РЛС с радиопередатчиками, способных работать в УКВ диапазоне, при этом согласно техническим отчетам испытаний таких систем можно сделать выводы, что определение дальности источника излучения в бистатическом диапазоне возможно только до 400 км. При этом согласно теоретическим расчетам уравнения дальности, можно сделать вывод, что при использовании мощных радиопередатчиков в пассивных РЛС (например, 100 кВт) дальность обнаружения в бистатическом диапазоне может достигать до 600 км.

Теоретический анализ

Энергетические характеристики передатчика потребляют энергию как пассивной РЛС, так и объекта обнаружения [3]. При этом мощность прямого сигнала, который принимается опорной антенной пассивной РЛС, может быть выражена формулой:

$$P_c = \frac{P_{\text{изл}} G_{\text{прд}} G_{\text{прм}} \lambda^2}{(4\pi)^2 D^2 L_{\text{сп}}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{изл}}$ – эффективная мощность, излучаемая передающей антенной, $G_{\text{прм}}$ и $G_{\text{прд}}$ – коэффициент усиления приемной и передающей антенны, D – расстояние между антеннами передатчика и приемника, λ – длина волны, а $L_{\text{сп}}$ – потери в свободном пространстве. Мощность, отраженная от объекта, зависит в основном от эффективной площади рассеивания (ЭПР) σ_c и геометрии расположения передатчик-объект-приемник.

В этом случае мощность отраженного сигнала, принятая пассивной РЛС, может быть выражена уравнением:

$$P_{\text{ПР}} = \frac{P_{\text{Изл}} G_{\text{ПРД}} G_{\text{ПРМ}} \sigma_{\text{ц}} \lambda^2}{(4\pi)^3 D_{\text{ПРД}}^2 D_{\text{ПРМ}}^2 L_{\text{СП}}}, \quad (2)$$

где $D_{\text{ПРД}}$ и $D_{\text{ПРМ}}$ означают расстояние от объекта до передатчика и приемника. Отраженный сигнал объекта может быть обнаружен, если после его обработки он сильнее принятого шума на параметр обнаружения q , который может быть определен по кривым обнаружения в зависимости от выбранного критерия обнаружения. Как правило, параметр обнаружения устанавливается на уровне 10-15 дБ для обеспечения низкой вероятности ложной тревоги (обычно на уровне 10^{-6}).

Обычно предполагается, что системный шум возникает в основном из-за теплового шума приемника [4]. В таком случае мощность помех на входе приемника можно рассчитать с помощью следующего уравнения:

$$P_{\text{Ш}} = kT_{\text{Ш}}\Delta f, \quad (3)$$

где $T_{\text{Ш}}$ – эквивалентная шумовая температура приемника, k – постоянная Больцмана, Δf – шумовая полоса пропускания приемника. Это предположение обычно справедливо для более высоких частотных диапазонов, таких как спутниковая связь, в которых работают классические активные РЛС. Однако большинство пассивных РЛС работают на более низких частотах, как правило, в диапазонах очень высоких (ОВЧ) и ультравысоких (УВЧ) радиочастот. На этих частотах в шумах системы могут преобладать помехи, которые принимает антенна, например, техногенный шум. Уровень внешнего шума сильно зависит от окружающей среды (например, городской, сельский), частоты и времени [5]. Тем не менее, параметр внешнего шума, определяемый как мера внешнего шума по сравнению с тепловым шумом, обычно достигает значений 10-50 дБ для диапазона радиочастот. По этой причине при анализе энергетических характеристик необходимо учитывать дополнительный внешний шум. Это может быть сделано, например, путем включения внешнего шума в эквивалентную шумовую температуру приемника $T_{\text{П}}$.

Теоретическая область бистатистического обнаружения в ПБРИК – это область, где мощность отраженного сигнала объекта $P_{\text{ПР}}$ превышает пороговое значение обнаружения $N_0 P_{\text{ШП}}$. При этом расстояние между объектом и передатчиком $D_{\text{ПРД}}$, объектом и приемником $D_{\text{ПРМ}}$ должно удовлетворять средним геометрическим этих расстояний:

$$D_{\text{ПРД}} D_{\text{ПРМ}} < \sqrt{\frac{P_{\text{Изл}} G_{\text{ПРД}} G_{\text{ПРМ}} \sigma_{\text{ц}} \lambda^2 t_i}{(4\pi)^3 L_{\text{СП}} N_0 k T_{\text{Ш}}}}, \quad (4)$$

где t_i – время интегрирования, N_0 – эффективный коэффициент шума приемника В приведенной выше формуле учитывается интегральный коэффициент усиления, равный $K t_i$.

Основываясь на теории моностатической РЛС, можно рассчитать максимальную дальность обнаружения для бистатистической РЛС, когда $D_{\text{ПРД}}$ и $D_{\text{ПРМ}}$ равны и являются средним геометрическим этих двух расстояний $D_{\text{max}} = \sqrt{D_{\text{ПРД}} D_{\text{ПРМ}}}$. Этот параметр соответствует максимальной дальности обнаружения моностатической РЛС, если базовая линия между $D_{\text{ПРД}}$ и $D_{\text{ПРМ}}$ равны. Ожидаемая максимальная моностатическая дальность обнаружения в свободном пространстве, D_{max} , в зависимости от мощности

излучения передатчика представлена на Рисунке 1. При этом основываясь на теоретических значениях, которые характерны для систем ПБРИК в УКВ диапазоне равны: $G_{ПРД} = 2,15$ дБи, $G_{ПРМ} = 10$ дБи, $\lambda = 3$ м и $N_0 = 11,4$ дБ соответственно (соответствует вероятности ложной тревоги на однократное интервал интегрирование 10^{-6} с использованием распределения Рэлея для амплитуды шума и нефлуктуирующего объекта; представленный анализ показывает, что время флуктуации для дальних объектов составляет порядка сотен секунд), при этом $t_i = 1$ с, $L_{СП} = 8$ дБ, $T_{П} = 12$ дБ дополнительного внешнего шума. Таким образом, из теории пассивной радиолокации видно, что при условии движения объекта на высоты более 10 км дифракционные потери излучения, вызванные земной поверхностью, видны на расстоянии более 400 км, тогда как потери на приеме начинают проявляться на расстоянии 300 км, достигая 5 дБ на 350 км в соответствии с моделью Буллингтона. При изучении случая с небольшой дальностью объекта видимость сильно ограничена кривизной Земли, и для расчета потерь при распространении необходимо использовать сложные модели распространения (Дейгоут и Эпштейн-Петерсон).

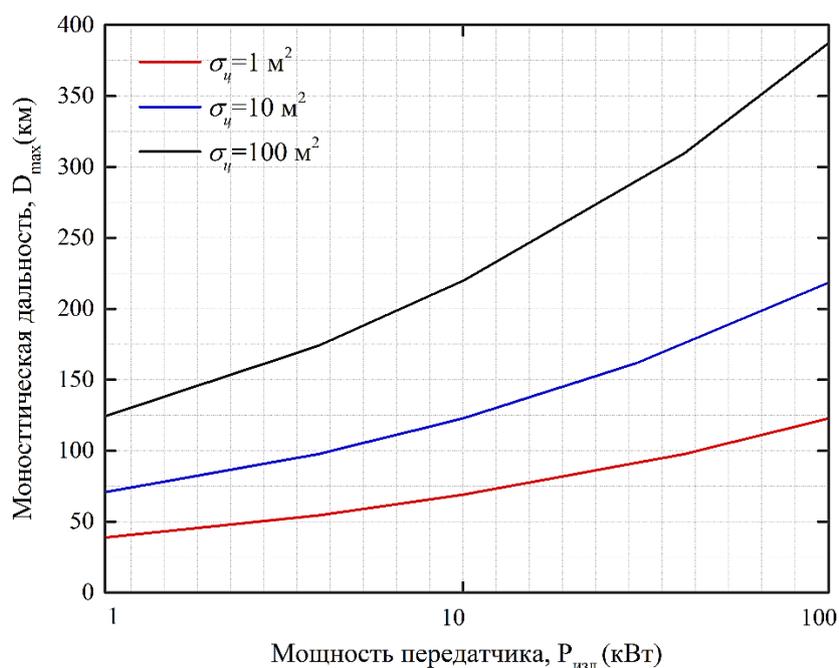


Рисунок 1 – Теоретическая дальность обнаружения в свободном пространстве для ПБРИК в УКВ диапазоне для различных ЭПР объекта в зависимости от мощности излучения передатчика

Figure 1 – Theoretical detection range in free space for PBR in the VHF band for various RCS of an object depending on the power of the transmitter radiation

Теоретическая максимальная дальность обнаружения (4) может быть достигнута только в том случае, если пассивная РЛС обеспечивает достаточный динамический диапазон на аналогово-фронтальной части системы и достаточно хорошая когерентность канала, которая достигается в процессе проектирования, разработки и производства.

Для ПБРИК можно определить два требования к динамическому диапазону. Первый – это отношение прямой мощности (вызванной прямым излучением от передатчика) к уровню шума системы, а второй – отношение прямой мощности к минимальной мощности отраженного сигнала от обнаруживаемого объекта. Первое можно легко вычислить из (1) и (3) как:

$$\frac{P_C}{P_{\text{ш}}} = \frac{P_{\text{изл}} G_{\text{ПРД}} G_{\text{ПРМ}} \lambda^2}{(4\pi)^2 D^2 k T_{\text{ш}} \Delta f L_{\text{СП}}} \quad (5)$$

Второй представляет собой отношение прямой мощности (1) к минимальной обнаруживаемой мощности отраженного сигнала от источника излучения, равное произведению мощности теплового шума и фактор шума приемника, зависящий от типа приемника, деленного на коэффициент интегрирования [6]. Принимая во внимание, что интегральный коэффициент усиления равен $K_i t_i$, а минимальная обнаруживаемая мощность эхо-сигнала от объекта равна $N_0 P_{\text{ш}} / K_i t_i = N_0 k T / t_i$, второй динамический диапазон можно выразить как:

$$\frac{P_C}{P_{\text{ПР min}}} = \frac{P_{\text{изл}} G_{\text{ПРД}} G_{\text{ПРМ}} \lambda^2 t_i}{(4\pi)^2 N_0 D^2 k T_{\text{ш}}} \quad (6)$$

Как видно из (4) и (6), дальность обнаружения и требуемый динамический диапазон зависят от времени интегрирования. Лучшая дальность обнаружения достигается за счет использования более длительного времени интегрирования. Однако при использовании классической функции перекрестной неоднозначности в качестве схемы обработки для ПБРИК время интегрирования ограничено двумя явлениями: дальностью и скоростью перемещения целевого эхо-сигнала. Изменение дальности происходит, когда объект перемещается радиально, тем самым изменяя свою бистатическую дальность. Изменение бистатического диапазона возникает из-за бистатической скорости v_{max} , которая составляет $v_{\text{max}} t_i$, и оно не должно превышать диапазон разрешения по дальности $c/(2\Delta f)$, где c – скорость света, поэтому ограничение по времени интегрирования имеет вид:

$$t_i \leq \frac{c}{2\Delta f v_{\text{max}}} \quad (7)$$

Изменение бистатического диапазона из-за бистатического ускорения a_{max} (максимальное предполагаемое бистатическое ускорение) равно $(a_{\text{max}} t_i^2)/2$, и это значение также не должно превышать диапазон разрешения по дальности, поэтому другое ограничение на время интегрирования можно сформулировать как:

$$t_i < \sqrt{\frac{c}{\Delta f a_{\text{max}}}} \quad (8)$$

Бистатическое ускорение также может вызвать явление перемещение скоростных ячеек [7]. Изменение бистатической скорости из-за бистатического ускорения a_{max} равно $a_{\text{max}} t_i$, и это значение не должно превышать размер ячейки разрешения скорости $\lambda/(2t_i)$. Поэтому третьим ограничением на время интегрирования является:

$$t_i < \sqrt{\frac{\lambda}{2a_{\text{max}}}} \quad (9)$$

При этом время интегрирования можно увеличить, используя обработку растяжения, если ограничивающим фактором является миграция дальности, или вычисление трехмерной функции неопределенности (дальность, скорость и ускорение), если время интегрирования ограничено доплеровской миграцией ячейки.

На Рисунке 2 показан требуемый динамический диапазон приемника ПБРИК в зависимости от расстояния до ближайшего передатчика (параметры системы были такими же, как на Рисунке 1).

Как видно из Рисунка 2, при мощности излучения 100 кВт и дальности между ПБРИК и объектом излучения 10 км, требуемый динамический диапазон приемника до шума составляет 50 дБ, а до эха объекта – 112 дБ. Увеличение расстояния от передатчика до ПБРИК на 40 км снижает требования к динамическому диапазону до 28 и 92 дБ. Если приемник не соответствует вышеуказанным требованиям, работа ПБРИК на большой дальности не может быть достигнута, и эффективные потери в системе будут увеличены на разницу между требуемым и достигнутым динамическим диапазоном приемника.

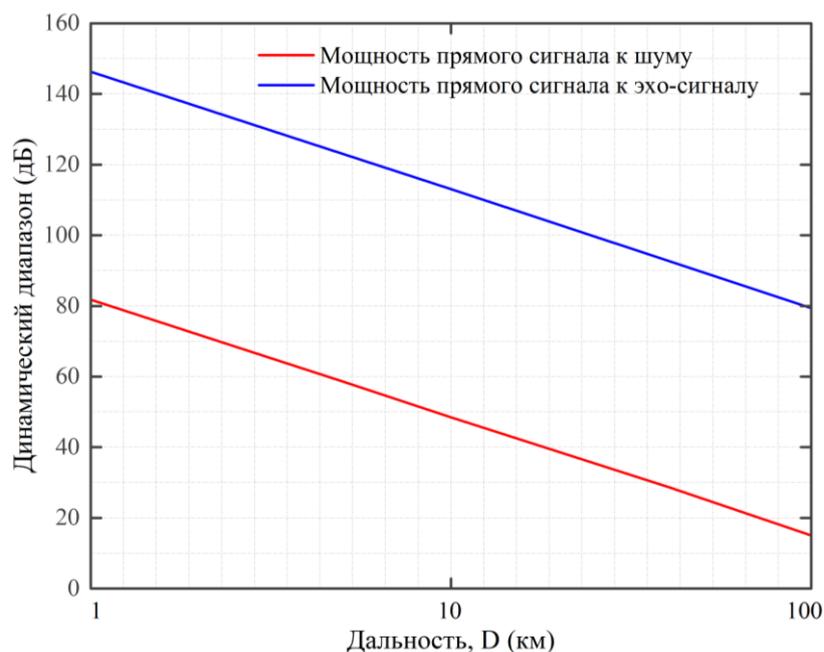


Рисунок 2 – Динамический диапазон приемника ПБРИК, необходимый для работы на большой дальности при мощности радиопередатчика 100 кВт

Figure 2 – Dynamic range of the PBR receiver required for long-range operation with a radio transmitter power of 100 kW

Уравнение (2) выражает мощность отраженного сигнала без учета обработки, которая обычно применяется в пассивных РЛС. А именно, очень часто применяется некое адаптивное удаление прямого сигнала и помех. Такая процедура состоит из вычитания взвешенного опорного сигнала из отраженного сигнала. Эта операция фактически вызывает изменение диаграммы направленности антенны канала наблюдения, поскольку отраженный сигнал объекта также принимается опорной антенной, которая может быть очищена с помощью алгоритма адаптивного удаления помех в полезном сигнале.

Технически реализовать ПБРИК удобнее всего с кольцевой антенной, которая состоит из одного опорного и семи обзорных лучей восьмиэлементной антенной решетки, что позволяет обеспечить покрытие на 360°.

Уравнение (4) можно изменить для расчета минимального значения эффективной площади рассеяния (ЭПР) радиолокационного объекта, которая используется для количественной оценки мощности отраженного сигнала. Следовательно, уравнение (4) можно преобразовать в вид:

$$\sigma_{\text{ц}} = \frac{(4\pi)^3 (D_{\text{ПРД}} D_{\text{ПРМ}})^2 L_{\text{СП}} N_0 k T_{\text{Ш}}}{P_{\text{ИЗЛ}} G_{\text{ПРД}} G_{\text{ПРМ}} \lambda^2 t_i}. \quad (10)$$

Пример минимального обнаруживаемого ЭПР, рассчитанный с использованием (10), показан на Рисунке 3. Значения, показанные на Рисунке 3, насыщены в диапазоне от -20 дБсм и +30 дБсм для лучшей визуализации. Данные соответствуют минимуму из семи лучей наблюдения, при этом при увеличении $\sigma_{\text{ц}}$ в направлении передатчика, это происходит непосредственно из-за нуля, созданного в лучах наблюдения с помощью процедуры адаптивного удаления помех. Также заметно влияние семи отдельных лучей наблюдения, что образует бистатическую технологию обнаружения.

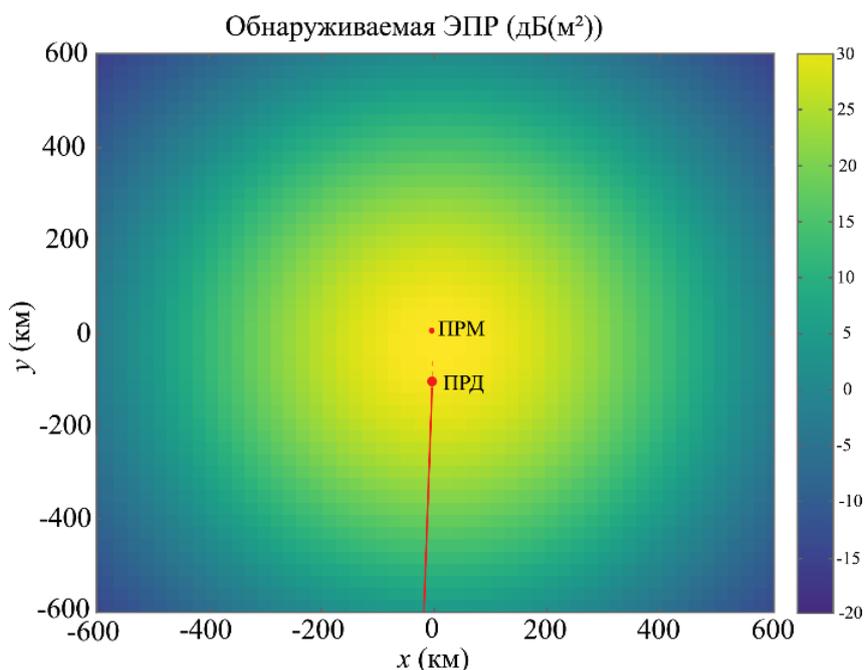


Рисунок 3 – Обнаруживаемая ЭПР, которая рассчитана с учетом обнуления в лучах наблюдения

Figure 3 – Detectable RCS which is calculated taking into account nulling in the observation beams

Экспериментальные данные и результаты

Теоретические данные, представленные в этой статье были подтверждены экспериментальными показаниями. В качестве эксперимента использовались результаты имитационного моделирования. Эксперимент заключался в построении модели ПБРИК, которая использует радиопередатчики, работающие в УКВ диапазоне в качестве источника излучения. Модель ПБРИК представляет собой антенну, которая состоит из восьмиэлементной круговой антенной решетки, при этом сигналы от элементов решетки когерентно дискретизируются в диапазоне ультракоротких волн при условии, что аналоговое преобразование с понижением частоты не используется. Сигналы после дискретизации обрабатываются в цифровой форме и передаются на компьютер.

На Рисунке 4 представлен спектр УКВ диапазон (65,9-74 МГц), который был смоделирован в городской среде. Из графика видно, что мощность показывает многочисленные пики, которые соответствуют различным радиопередатчикам. Минимальный измеренный уровень мощности, соответствующий промежуткам между различными передатчиками, достигает порядка 50 дБ. Этот уровень соответствует внешнему шуму, или что более вероятно техногенному шуму [8]. На рисунке уровень

шума аналого-цифровых преобразователей (АЦП) отмечен на уровне 22 дБ. При подключении специальных усилителей и полосовых фильтров к АЦП уровень шума приемника возрастает до 30 дБ, при этом измеренный уровень шума всей приемной схемы составляет порядка 8 дБ. Этот результат показывает, что обычно уровень внешнего шума намного выше уровня шума приемника, что на 30 дБ выше шума приемника и на 38 дБ выше теплового шума, рассчитанного с помощью теории. Уровень внешнего шума сильно различается в разных средах. При моделировании случая в условиях сельской местности измеренный уровень внешнего шума существенно ниже, и колеблется в пределах 15-20 дБ, а для моногородов измеренный внешний шум достиг уровня 30-45 дБ.

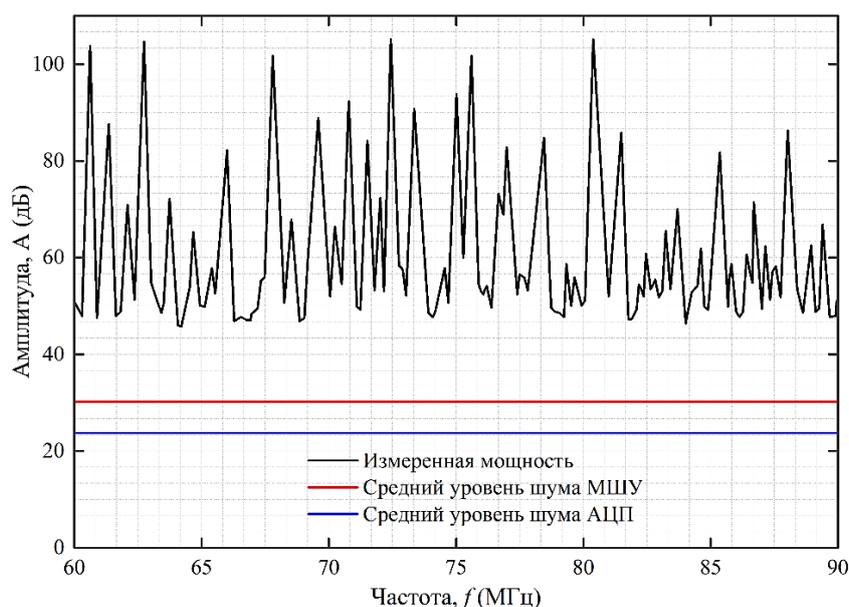


Рисунок 4 – Пример спектра, измеренного в городских условиях
 Figure 4 – Example of a spectrum measured in an urban environment

На Рисунке 5 показан результат обнаружения объекта с дальностью более 600 км. При этом за основу моделирования был взят случай, когда расстояние от приемника ПБРИК до мощного радиопередатчика составляла около 60 км. Высота передающей антенны около 500 м. Приемник размещался на ровной поверхности с уровнем техногенного шума на 15 дБ выше уровня теплового шума [9], и высотой 20 м. В результате экспериментальных данных были обнаружены объекты на бистатической дальности около 600 км., основным недостатком было выявлено, то что их отслеживание происходило в течение короткого времени и обнаружение не было подтверждено приемником автоматического зависимого наблюдения (АЗН-В), использовавшимся в качестве эталона. Крестиками обозначены графики, траекториями – треки объектов, а квадратами – позиции объектов, полученные с приемника АЗН-В, преобразованные в бистатические координаты. Как видно из графика, два объекта удалось отследить вблизи бистатической дальности 600 км. Причем для одного из отслеживаемых объектов моностатическая ЭПР составляет порядка 10-20 дБ(м²), но так как такая ситуация была похожа на квазимоностатическую, то и для бистатического ЭПР она совпадает.

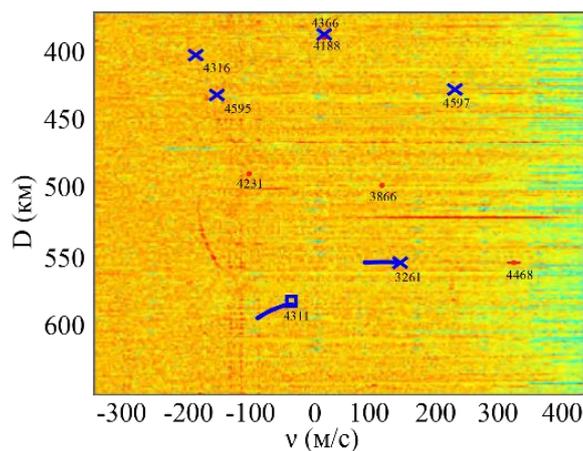


Рисунок 5 – Результаты обнаружения в бистатических координатах
Figure 5 – Detection results in bistatic coordinates

На Рисунке 6 показано отношение сигнал / шум (ОСШ) в зависимости от времени t . Значение ОСШ 0 дБ, что соответствует отсутствию обнаружения объекта. При этом по графику видно, что объект отслеживался в течение 5 мин, при этом случайное изменение ОСШ порядка 2-3 дБ, можно увидеть на медленном темпе изменения колебаний сигнала. Быстрый темп случайных колебаний в основном вызван фоновым шумом, медленный же темп возможно, вызван изменением условий многолучевого распространения и изменением угла обзора. Длительное время колебаний согласуется с теоретическими данными.

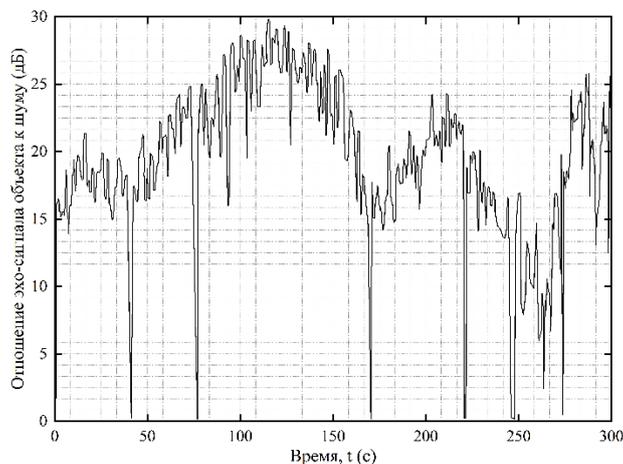


Рисунок 6 – ОСШ по сравнению со временем отслеживаемого объекта на бистатической дальности около 600 км
Figure 6 – SNR compared to the time of the tracked object at a bistatic range of about 600 km

Заключение

В данной статье представлен анализ, позволяющий определить возможности дальнего обнаружения ПБРИК. Ключевым элементом в такой РЛС является аналоговый входной каскад с чрезвычайно высоким динамическим диапазоном – на уровне 80-130 дБ по отношению к тепловым шумам и 130-150 дБ по отношению к более слабому эхосигналу обнаруженного объекта. При более низкой динамике приемника все еще возможно достичь большой дальности обнаружения, но необходимо очень тщательно

выбирать место дислокации на местности. Дальность обнаружения зависит от многих факторов. Одним из них является искусственный уровень помех, представленный в статье как внешний шум, который может варьироваться от нескольких дБ над тепловым шумом в ненаселенной местности и до 50 дБ в городской среде. При этом нужно учитывать, что ЭПР пассивной РЛС зависит от длины волны и его структуры, а работу радиопередатчиков в УКВ диапазоне [10] очень трудно контролировать в отличие от полос более высоких частот, где поперечное сечение пассивной РЛС можно уменьшать, и оно варьируется в типичном диапазоне 10-20 дБ(м²), в зависимости от излучения и наблюдения. Потери распространения, вызванных многолучевыми эффектами, являются очень важным фактором для низколетящих объектов, особенно на траектории объект-приемник. Пути излучения менее уязвимы для многолучевого распространения, поскольку передатчики обычно размещаются на высоких мачтах. Однако это также является проблемой для обнаружения высоколетящих объектов на малых дальностях, поскольку излучатели обычно сконструированы таким образом, чтобы обеспечивать хорошее излучение на уровне земли, а не на больших высотах.

Теоретические анализы показывают, что при использовании мощного передатчика, например, 100 кВт, крупные объекты с ЭПР 20 дБ(м²), могут быть обнаружены на дальностях в несколько сотен километров, что эквивалентно моностатической дальности (ок. 400 км). Этот результат может оказаться неожиданным, так как обычно предполагается, что дальность обнаружения радиолокационной системы в УКВ диапазоне составляет порядка 150 км. Теоретические анализы сравнивались с экспериментальными результатами, полученными с помощью моделирования. Модель была смоделирована для того, чтобы показать способность дальнего обнаружения и выполнить требования к динамическому диапазону. Эксперименты показывают, что имитационное моделирование способно отслеживать объект с высокой радиолокационной площадью на расстоянии порядка 350 км от ПБРИК (около 600 км в бистатическом диапазоне). Причем такие результаты были смоделированы для разных объектов в течение длительного периода времени, а также в разных местах и с использованием различных источников света. Однако следует отметить, что здесь анализируется дальность обнаружения для одной пары передатчик-приемник. Чтобы установить отслеживание объекта в декартовых координатах, объект должен быть обнаружен с помощью трех пар передатчиков-приемников. Это может быть ограничивающим фактором для дальности обнаружения ПБРИК (с точки зрения декартового слежения), поскольку такую систему реализовать на практике довольно трудно.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Griffiths H.D, Baker C.J. *An Introduction to Passive Radar*. London: Artech House; 2017. 212 p.
2. Budge M.C, German S.R *Basic Radar Analysis*. Norwood: Artech House, 2015. 784 p.
3. Гришин Ю.П., Ипатов В.П., Казаринов Ю.М., Коломенский Ю.А., Ульяницкий Ю.Д. *Радиотехнические системы*. М.: Высшая школа; 1990. 496 с.
4. Marcelo AS. Miacci and Mirabel C. Rezende. Basics on Radar Cross Section Reduction Measurements of Simple and Complex Targets Using Microwave Absorbers. *Applied Measurement Systems*. 2012:351-376. DOI: 10.5772/37195.
5. Козлов С.В., Ле Ван Кыонг. Алгоритмы длительного когерентного накопления отраженного сигнала при ненулевых высших производных дальности до радиолокационной цели в спектральной области. *Доклады БГУИР*. 2021;19:35-44.

6. Джиоев А.Л., Омельчук И.С., Тюрин Д.А., Фоминченко Г.Г., Фоминченко Г.Л. Способ пассивной однопозиционной угломерно-разностно-доплеровской локации, структура и алгоритм функционирования реализующей его радиолокационной системы. *Журнал радиоэлектроники*. 2017;9. Доступно по: <http://jre.cplire.ru/jre/sep17/13/text.pdf>. (дата обращения: 16.04.2023).
7. Фомин А.Н., Тяпкин В.Н., Дмитриев Д.Д., Андреев С.Н., Ищук И.Н., Купряшкин И.Ф., Гречкосеев А.К. *Теоретические и физические основы радиолокации и специального мониторинга*. Красноярск: Сибирский федеральный университет; 2016. 292 с.
8. Кочин В.Н. Математическая модель радиолокатора с обращенной синтезированной апертурой. 1. Постановка задачи. Режим обнаружения. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2009; 14(4): 403-412.
9. Фомин А.Н., Копылов В.А., Филонов А.А., Андронов А.В. *Общая теория радиолокации и радионавигации. Распространение радиоволн*. Красноярск: Сибирский федеральный университет; 2017. 318 с.
10. Кубанов В.П., Ружников В.А., Сподобаев М.Ю., Сподобаев Ю.М. *Основы теории антенн и распространения радиоволн: учебное пособие*. Самара: ИНУЛ-ПГУТИ; 2016. 258 с.

REFERENCES

1. Griffiths H.D, Baker C.J. *An Introduction to Passive Radar*. London: Artech House; 2017. 212 p.
2. Budge M.C, German S.R *Basic Radar Analysis*. Norwood: Artech House, 2015. 784 p.
3. Grishin Yu.P., Ipatov V.P., Kazarinov Yu.M., Kolomenskii Yu.A., Ul'yanitskii Yu.D. *Radiotekhnicheskie sistemy*. M.: Vysshaya shkola; 1990. 496 p. (In Russ.)
4. Marcelo AS. Miacci and Mirabel C. Rezende. Basics on Radar Cross Section Reduction Measurements of Simple and Complex Targets Using Microwave Absorbers. *Applied Measurement Systems*. 2012:351-376. DOI: 10.5772/37195.
5. Kozlov SV, Le Van Cuong. Long-time coherent accumulation algorithms for reflected signal with non-zero higher derivatives of the range to radar target in the spectral domain. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2021;19:35-44. (In Russ.)
6. Dzhioev AL, Omelchuk IS, Tyurin DA, Fominchenko GG, Fominchenko GL. Method of passive single-positioning angle-difference-doppler location, structure and algorithm of functioning of its radar location system. *Zhurnal Radioelektroniki = Journal of Radio Electronics* 2017; 9. Available from: <http://jre.cplire.ru/jre/sep17/13/text.pdf> (accessed on 16.03.2023).
7. Fomin A.N., Tyapkin V.N., Dmitriev D.D., Andreev S.N., Ishchuk I.N., Kupryashkin I.F., Grechkoseev A.K. *Teoreticheskie i fizicheskie osnovy radiolokatsii i spetsial'nogo monitoringa*. Krasnojarsk: Siberian Federal University; 2016. 292 p. (In Russ.)
8. Kochin VN. Mathematical Model of Inverse Synthetic Aperture Radar. 1. Problem Statement.Acquisition Mode. *Radiophysics and Radioastronomy = Radiophysics and Radioastronomy* 2009; 14(4): 403-412. (In Russ.)
9. Fomin A.N., Kopylov V.A., Filonov A.A., Andronov A.V. *Obshchaya teoriya radiolokatsii i radionavigatsii. Rasprostraneniye radiovoln*. Krasnojarsk: Siberian Federal University; 2017. 318 p. (In Russ.)
10. Kubanov V.P., Ruzhnikov V.A., Spodobaev M.Yu., Spodobaev Yu.M. *Osnovy teorii antenn i rasprostraneniya radiovoln: uchebnoe posobie*. Samara: INUL-PGUTI; 2016. 258 p. (In Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Унгер Алексей Юрьевич, ассистент, **Aleksei Yuryevich Unger**, Assistant Lecturer,
МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация. MIREA – Russian Technological University,
Moscow, the Russian Federation.
e-mail: coerbi@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 20.04.2023; одобрена после рецензирования 23.05.2023;
принята к публикации 21.06.2023.*

*The article was submitted 20.04.2023; approved after reviewing 23.05.2023;
accepted for publication 21.06.2023.*