

УДК 621.396.96+621.396.67+621.391.8

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ ОЦЕНИВАНИЯ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ ЦЕЛЕЙ В  
РАДИОЛОКАЦИОННОМ ИЗМЕРИТЕЛЕ СО СКАНИРУЮЩЕЙ  
МНОГОКАНАЛЬНОЙ АНТЕННОЙ СИСТЕМОЙ В УСЛОВИЯХ ПОМЕХ**

БУЛАВКО Д. Г., ВУ ТХАНЬ ХА, ГУСИНСКИЙ А. В, КОЗЛОВ С. В., КОПШАЙ А. А.,  
КОНДРАШОВ Д. А., ЛИСОВ Д. А., ЛУФЕРОВ А. Н., СВИРИД М. С.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)*

*E-mail: kozlov@bsuir.by*

**Аннотация.** Апробирована методика и проведены экспериментальные (полунатурные) исследования функционирования измерителей угловых координат с многоканальными приемными системами. Подтверждена работоспособность предлагаемых алгоритмов оценивания угловых координат целей в радиолокационном измерителе со сканирующей многоканальной антенной системой в условиях помех при отсутствии мешающих отражений. Получены оценки точностных характеристик радиолокационного измерителя со сканирующей многоканальной антенной системой в условиях внешних активных помех.

**Abstract.** The technique of experimental (semi-natural) research of angular coordinate meters with multichannel receiving systems has been tested; the efficiency of the proposed algorithms for estimating the angular coordinates of targets in a radar meter with a scanning multichannel antenna system in the presence of interference in the absence of interfering reflections has been confirmed; estimates of the accuracy characteristics of a radar meter with a scanning multichannel antenna system in conditions of external active interference are obtained.

Основной целью экспериментальных исследований являлось практическое подтверждение работоспособности адаптивных алгоритмов оценивания угловых координат целей в радиолокационном измерителе со сканирующей многоканальной антенной системой в условиях внешних помех [1] и их точностных характеристик [2].

**Состав и характеристики лабораторной установки, методика проведения исследований**

Для проведения экспериментальных исследований была разработана лабораторная установка, воспроизводящая функционирование многоканальной приемной системы с механическим обзором по азимуту в условиях помех. В состав лабораторной установки входили:

- макет многоканальной приемной системы обзорной радиолокационной станции со сканированием в азимутальной плоскости;
- имитатор полезных сигналов и помех.

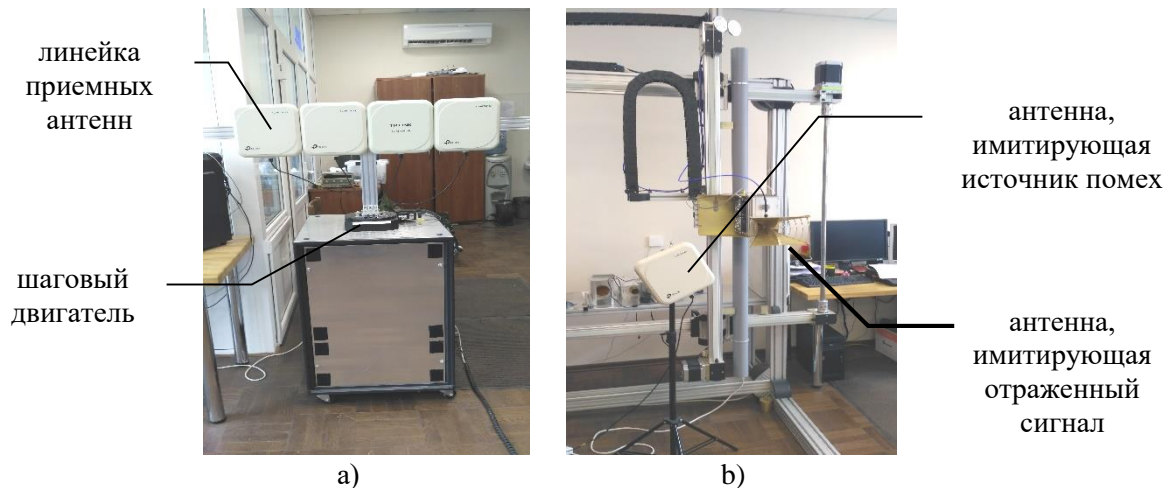
Макет приемной системы обзорной радиолокационной станции со сканированием в азимутальной плоскости в свою очередь включал: четырехканальную антенную систему в виде линейной антенной решетки на основе серийных Wi-Fi антенн; четырехканальную приемную систему с преобразованием сигнала в цифровой вид.

Для реализации четырехканальной антенной системы использованы приемные антенны типа TL-ANT2414A [3] с размерами 240x240 мм. Они устанавливались на несущем кронштейне, симметрично относительно оси вращения в азимутальной плоскости (рисунок 1а).

Положения фазовых центров по оси  $Ox$  (начало координат соответствует оси вращения) составляют  $\delta_1 = -360$  мм,  $\delta_2 = -120$  мм,  $\delta_3 = 120$  мм и  $\delta_4 = 360$  мм для первой – четвертой приемной антенны, соответственно. С учетом наличия четырех приемных каналов расчетная ширина главного лепестка приемной антенной решетки в синфазном режиме составляет около  $7,5^\circ$ .

Несущий кронштейн посредством вертикальной штанги (рисунок 1а) присоединялся к валу шагового двигателя. Шаговый двигатель обеспечивал перемещение антенной решетки в горизонтальной плоскости в диапазоне углов  $\pm 15^\circ$  относительно исходного значения с регулируемым шагом в пределах  $0,25^\circ \dots 1,0^\circ$ . Фазовый центр антенной системы располагался в точке пересечения оси вращения и оси несущего кронштейна.

Принимаемые антеннами сигналы через коаксиальные кабели поступали на вход четырехканальной приемной системы с идентичными приемными каналами. В аналоговой части приемной системы осуществлялась фильтрация сигналов в заданной полосе частот, усиление и перенос на промежуточную частоту  $F_{pr} = 125$  МГц. С выходов усилителей промежуточной частоты принимаемая реализация поступала на вход четырехканального синхронного бесквадратурного АЦП. На выходе АЦП формировались цифровые отсчеты мгновенных значений принимаемой реализации, которые накапливались с буферной памяти и далее, для каждого углового положения приемной антенной системы, записывались с выходной файл.



**Рис. 1.** Линейная антенная решетка на базе приемных Wi-Fi антенн типа TL-ANT2414A (a); расположение антенны отраженного сигнала и антенны источника помех (b)

Использовались два канала имитатора. В первом (целевом) канале воспроизводился отраженный сигнал в виде когерентной или некогерентной последовательности простых прямоугольных радиоимпульсов. Несущая частота составляла 2650 МГц, длительность импульса составляла 50 отсчетов АЦП (0,5 мкс). Полезный сигнал излучался через антенну Вивальди (рис. 1.б) с вертикальной поляризацией излучения, закрепляемой на антенном стенде.

Второй канал имитатора использовался для воспроизведения внешней активной шумовой помехи. Для излучения сигнала помехи использовалась антенна TL-ANT2414A, которая размещалась на заданном расстоянии от целевой антенны. Ширина спектра помехи составляла 30 МГц. Расстояние от антенны полезного сигнала до оси вращения приемной системы определялось размерами помещения и составляло  $r = 4,8$  м.

Мощность излучения канала полезного сигнала и помехи регулировалась аттенуаторами с цифровым управлением в диапазоне изменения отношения сигнал/шум и помеха/шум в пределах  $-10 \dots 40$  дБ.

При проведении измерений с использованием управляющей ПЭВМ и шагового двигателя антенная система устанавливалась в угловое положение «0», при этом нормаль к антенной системе была (в пределах точности установки на глаз) была ориентирована на центр целевой антенны. Антенна помехи устанавливалась на расстоянии  $d_{\Pi} = r \cdot \operatorname{tg} \alpha_{\Pi}$ , где  $\alpha_{\Pi}$  - требуемый угол между направлением на полезный сигнал и на источник помех. С использованием средств управления имитатором и шаговым двигателем устанавливались параметры полезного сигнала и помехи, задавалось начальное и конечное положение антенной системы и шаг изменения углового положения антенной системы. Начальное значение угла  $\alpha$  поворота приемной системы (угла между нормалью к приемной системы и линией «Ось вращения приемной системы – антенна полезного сигнала) устанавливается равным  $\alpha_{\min} = -15^{\circ}$  или  $\alpha_{\min} = -7^{\circ}$ , шаг  $\delta\alpha = 0,25^{\circ}; 1,0^{\circ}$ .

### Обработка результатов измерений

Отсчеты мгновенных значений принимаемого сигнала считывались из файла и преобразовывались в квадратурные значения с переносом на видеочастоту. Для этого отсчеты

мгновенных значений сигнала умножались на  $\cos(2\pi k F_{pr} / F_s)$  и  $-\sin(2\pi k F_{pr} / F_s)$ . Результат пропусклся через фильтр нижних частот 4-го порядка с аппроксимацией Баттерворта и длиной импульсной характеристики 16 отсчетов. Обработка результатов включала два этапа.

На первом этапе проводилось измерение амплитудных и фазовых рассогласований приемных каналов, в результате чего формировались корректирующие комплексные весовые коэффициенты. Эти коэффициенты запоминались и использовались в дальнейшем для коррекции комплексных коэффициентов передачи приемных каналов. По результатам измерений осуществляется построение амплитудных и фазовых ДН приемных элементов и их сравнение с теоретическими значениями.

На втором этапе осуществлялось построение решающих статистик для вариантов одноэтапного алгоритма [1] оценивания угловых координат для нефлуктуирующего и флуктуирующего сигнала. Отличием реализуемых в процессе измерений алгоритмов от изложенных в [1] являлось отсутствие модуляции ОС на передачу. Вид сигнала (когерентный или некогерентный) полагался неизвестным, поэтому при обработке результатов дополнительно оценивался коэффициент между периодной корреляции имитируемого ОС. Оценка проводилась путем максимизации решающей статистики по коэффициенту между периодной корреляции. В зависимости от результатов оценки выбирался соответствующий алгоритм обработки.

При проведении калибровки антенная система с шагом  $\delta\alpha = 1,0^\circ$  перемещалась от  $\alpha_{\min}$  до  $\alpha_{\max}$ . После Устранение амплитудно-фазовых различий приемных каналов проводилась юстировка антенной системы – определение смещения нормали антенной системы для условного нулевого положения шагового двигателя от направления на антенну полезного сигнала и оценка отношения сигнал/шум в беспомеховых условиях. На рис. 2. приведены мгновенные значения сигнала на выходах двух приемных каналов при отсутствии внешней помехи для положения антенны, соответствующего направлению на источник полезного сигнала и результат выравнивания комплексных частотных характеристик каналов в виде квадратурных значений сигналов этих же приемных каналов. Результат устранения амплитудно-фазовых различий является качественным – амплитуды квадратурных составляющих для полезного сигнала практически совпадают.

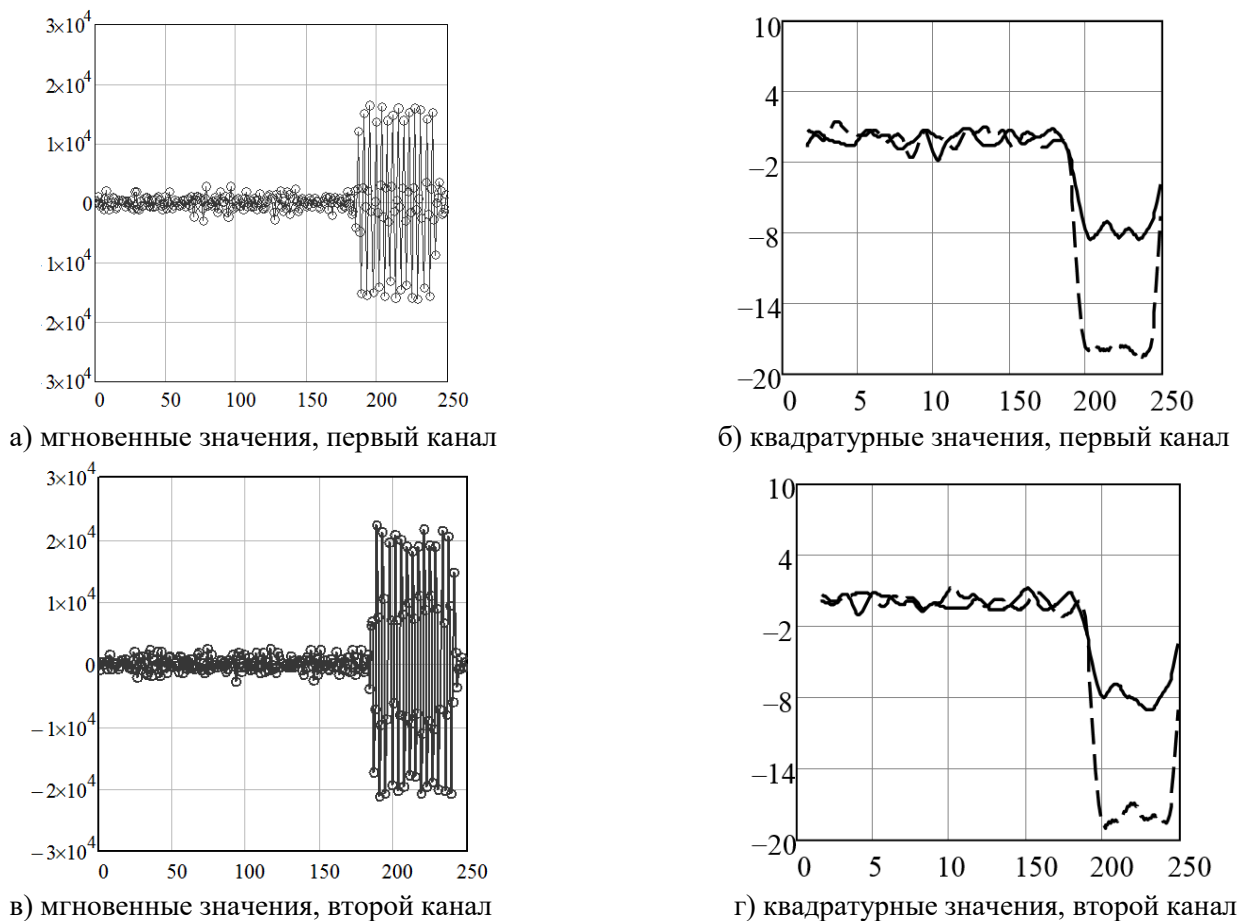
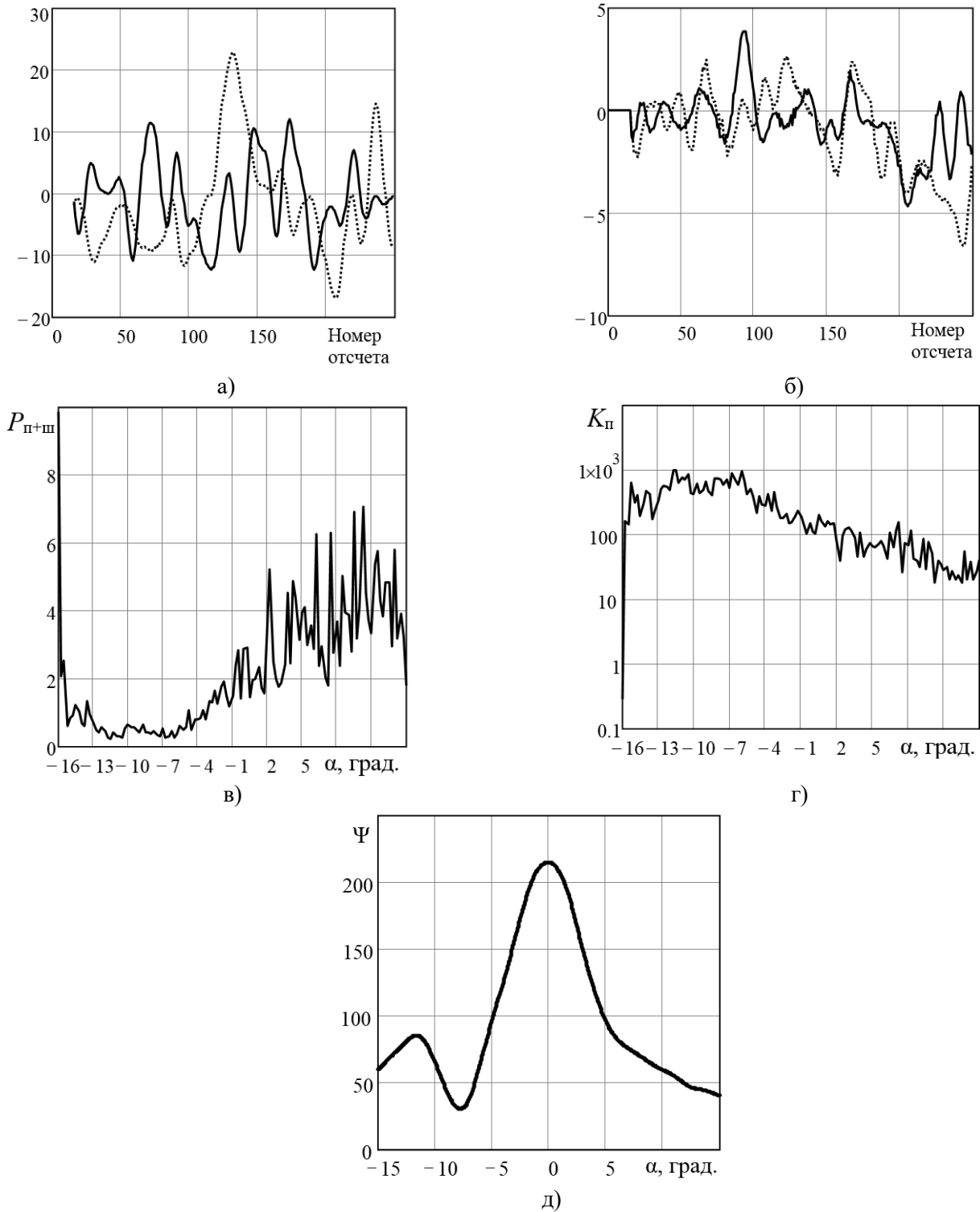


Рис. 2. Мгновенные и квадратурные значения сигналов приемных каналов

Результаты экспериментальных исследований

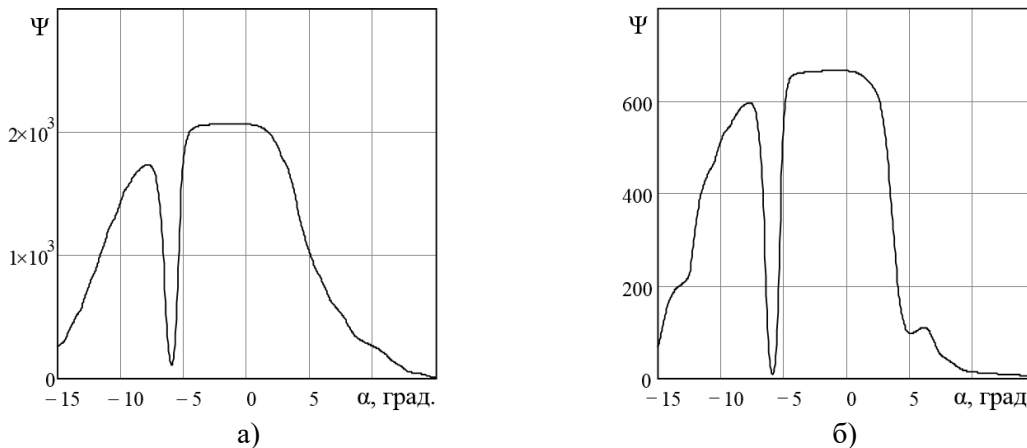
На рис. 3. приведен пример обработки принятых сигналов для ситуации воздействия одного источника помех с отношением помеха/шум в максимуме ДН 26 дБ с выносом  $-10,7^\circ$  относительно источника полезного сигнала. Полезный сигнал – когерентная пачка из 121 нефлуктуирующего импульса с отношением сигнал/шум по импульсу 2,6 дБ.



**Рис.3.** Отсчеты квадратурных компонент полезного сигнала до (а) и после (б) компенсации, зависимости мощности суммы некомпенсированных остатков помех и взвешенных шумов (с), коэффициента компенсации внешних помех (д) от углового положения антенной системы и зависимость решающей статистики от угла  $\alpha$  (е)

Как видно из рис. 3.а, полезный сигнал до компенсации визуально не обнаруживается, а после компенсации сигнал плохо выделяется на фоне некомпенсированных остатков помех и взвешенных внутренних шумов (рис. 3.б, начиная со 190 отсчета). Среднее значение коэффициента компенсации внешней помехи составляет 25...27 дБ, а его максимум имеет место при малом угловом рассогласовании между нормалью к антенной системе и направлением на источник помехи. Максимум решающей статистики сформирован в направлении, весьма близком к направлению на полезный сигнал – ошибка составила  $0,05^\circ$ .

Аналогичные результаты получены и для других сигнально-помеховых ситуаций с вариацией отношений сигнал/шум, помеха/шум, углового положения источника помех и вида (когерентный или некогерентный) отраженного сигнала. Для примера на рис. 4. приведена решающая статистика для некогерентной пачки при отношении сигнал/шум по импульсу пачки 11,9 дБ, выносе источника помех на  $4,8^\circ$  и отношениях помеха/шум 12 дБ (а) и 24 дБ. Вершина решающей статистики является плоской, что характерно для некогерентного сигнала.



**Рис.4.** Примеры решающей статистики для некогерентного сигнала

### Заключение

Основные результаты экспериментальных исследований заключаются в следующем:

- разработана и практически апробирована для случая приемной системы с механическим сканированием методика проведения экспериментальных (полунатурных) исследований измерителей угловых координат с многоканальными приемными системами;
- для случая отсутствия мешающих отражений подтверждена работоспособность предложенных одноэтапных алгоритмов оценивания угловых координат целей в радиолокационном измерителе со сканирующей многоканальной антенной системой в условиях помех для случаев нефлуктуирующего, флуктуирующего и некогерентного флуктуирующего полезного сигнала;
- получены экспериментальные оценки точностных характеристик радиолокационном измерителе со сканирующей многоканальной антенной системой в условиях внешних активных помех.

Результаты экспериментальных исследований подтверждают, что высокоточное измерение угловой координаты полезного сигнала при практически достижимых ошибках калибровки приемных трактов и диаграмм направленности антенн приемных каналов может быть достигнуто, в том числе, при малых угловых отклонениях помехи от полезного сигнала, когда помеха воздействует по главному лепестку диаграммы направленности приемного канала с относительным уровнем 0.5 и выше.

### Список использованных источников

1. Козлов, С. В. Алгоритмы обработки сигналов в радиолокационных измерителях угловых координат со сканирующей многоканальной антенной системой / С. В. Козлов, Ву Тхань Ха // Журнал радиоэлектроники. – 2019. – № 11. – С. 1–29. DOI 10.30898/1684-1719.2019.11.10
2. Козлов, С. В. Потенциальная точность квазиоптимальных радиолокационных измерителей угловых координат со сканирующей многоканальной антенной системой / С. В. Козлов, Ву Тхань Ха // Доклады БГУИР. – 2020. – № 3(Т18). – С. 5–13. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-3-5-13>.
3. Приемная антенна приемные антенны типа TL-ANT2414A. Режим доступа: <https://www.tp-link.com/ru/support/download/tl-ant2414a/>. Дата доступа 04.08.2020.