

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

Научная статья

УДК 621.396

DOI: [10.34759/trd-2021-120-10](https://doi.org/10.34759/trd-2021-120-10)

Повышение точности пеленга сигнала в цифровой антенной решётке

Виталий Иванович Орешкин^{1✉}, Юрий Михайлович Мелёшин², Вадим Константинович Цветков³

^{1,2,3}Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», Москва, Зеленоград, Россия

¹orshkinvi@gmail.com✉

²kykymberr@gmail.com

³tsvetkov_vk@mail.ru

Аннотация. Представлен метод повышения точности пеленгации принимаемого информационного сигнала. Метод использует возможности доступные при реализации приёмной антенны как цифровой антенной решётки, то есть с применением технологии цифрового формирования лучей (digital beamforming). Суть метода состоит в повышении необходимой точности пеленгации благодаря свертке принятого сигнала с ним же после детектирования. Представлены описание модели и результаты моделирования на примере малоразмерной цифровой антенной решётки для обеспечения космической связи.

Ключевые слова: пеленгация сигнала, космическая связь, цифровая антенная решётка, цифровое диаграммообразование

Для цитирования: Орешкин В.И., Мелёшин Ю.М., Цветков В.К. Повышение точности пеленга сигнала в цифровой антенной решётке // Труды МАИ. 2021. № 120.

DOI: [10.34759/trd-2021-120-10](https://doi.org/10.34759/trd-2021-120-10)

RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATION

Original article

Digital antenna array signal bearing accuracy improving

Vitaliy I. Oreshkin^{1✉}, Yuri M. Meleshin², Vadim K. Tsvetkov³

^{1,2,3}National Research University of Electronic Technology, Moscow, Zelenograd, Russia

¹orshkinvi@gmail.com✉

²kykymberr@gmail.com

³tsvetkov_vk@mail.ru

Abstract. This article discusses technical solutions for the development of receiving device for a spacecraft with a possibility of direction of arrival (DOA) estimation. The device must provide DOA) estimation of the incoming signal with a given accuracy and statistical characteristics under typical conditions for a spacecraft (weak signal, low consumption, small size). To solve this problem, it is proposed to use well-known sum-difference method of DOA estimation based on a small-size antenna array with digital diagramming (DBF). DBF antenna is a type of active antenna array, each channel is a separate receiver with digital signal processing. The formation of the phase and amplitude distribution in the antenna aperture is carried out in digital form. If we have information about the signals in separate channels of the antenna array, it is possible to use correlation algorithms for DOA estimation. For example, MUltiple Signal Classification algorithm (MUSIC). The essence

of the algorithm is to calculate the eigenvalues of the correlation matrix formed from signals in various channels of the antenna array. This algorithm makes it possible to use the total energy of a data packet, since the values of the correlation matrix contain the integral result averaging the thermal noise. However, this approach is computationally expensive. It is necessary to carry out several convolution operations to form the correlation matrix. Instead, it is proposed to use the phase-interferometry direction finding (DF) method with use an only one convolution operation per antenna array channel to improve DF accuracy. The convolution operation is performed on the received signal, stored in memory, and the detected data to accumulate energy and reduce the effect of noise on the DF result. Due to the very weak signal against noise background, signal processing is carried out in several stages. The receiving signal is filtering and Doppler shift is compensating. Then an approximate DOA estimation is made. The resulting direction estimate is used to form the main beam of the digital antenna array. The detected signal data is used as coefficients to compress the entire packet and increase the energy of the signal to increase DF accuracy.

Keywords: bearing signals, direction of arrival detection, space communication, digital antenna array, digital beamforming

For citation: Oreshkin V.I., Meleshin Yu. M., Tsvetkov V.K. Digital antenna array signal bearing accuracy improving. *Trudy MAI*, 2021, no. 120. DOI: [10.34759/trd-2021-120-10](https://doi.org/10.34759/trd-2021-120-10)

Постановка задачи

При создании систем космической связи возникает необходимость разработать для космического аппарата (КА) устройство одновременной пеленгации и приёма

сигнала наземного терминала. В условиях возможного вращения КА, устройство должно обеспечивать пеленгацию приходящего сигнала с заданной вероятностью обеспечения точности пеленгации, иначе говоря ошибка не должна превышать заданный угол пеленгации с заданной вероятностью. Для примера возьмём значения 1 градус допустимой ошибки с вероятностью 0,999. В качестве дополнительных условий, типичных для космоса, можно выделить малую мощность сигнала на приёме, небольшие габариты и малое потребление устройства.

Обеспечение пеленгации с заданной точностью методом простого сканирования лучом весьма проблематично: как для механического, так и для электронного сканирования потребуется достаточно большая антенна, обеспечивающая узкий луч диаграммы направленности (ДН), сравнимый по ширине с точностью пеленгации, что невозможно ввиду ограниченных габаритов устройства. Поэтому в качестве первого варианта рассматривалась реализация широко известной суммарно-разностной схемы пеленгации (рисунок1), позволяющей получить довольно высокую точность пеленгации. Поскольку необходимо детектировать сигнал по двум координатам (азимут и угол места), для реализации пеленгации потребуется как минимум три независимых приёмника сигнала и схема соединения антенных элементов с ними.

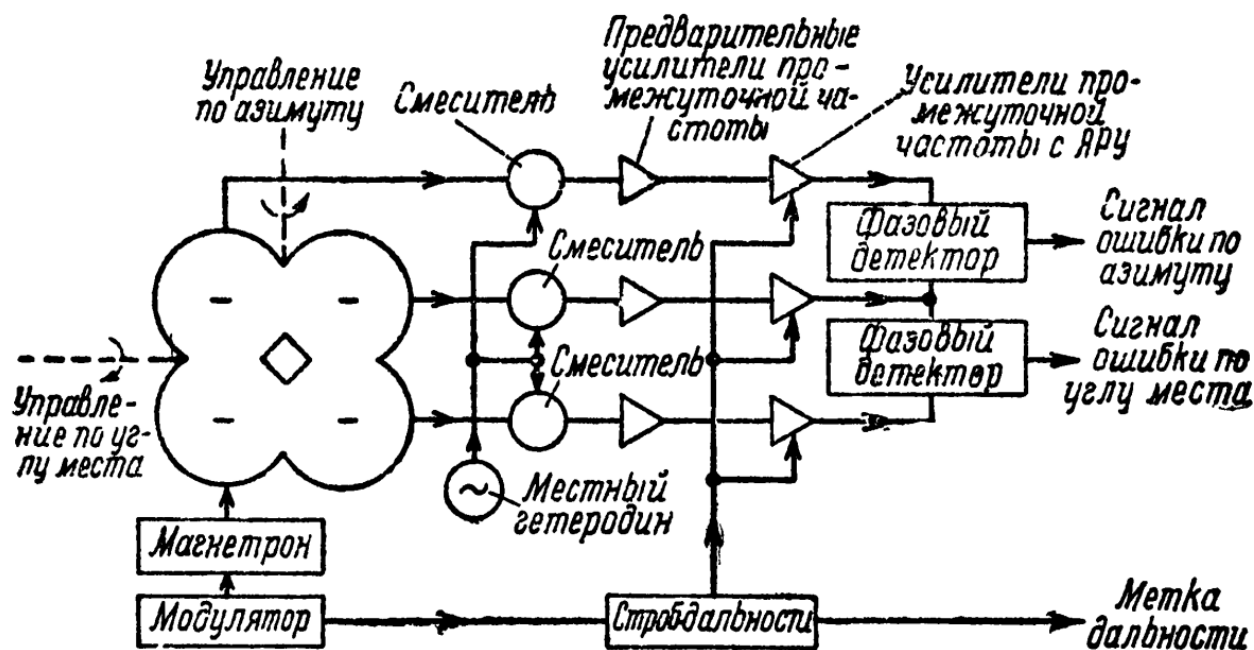


Рисунок 1 – Одна из первых моноимпульсных радиолокационных систем сопровождения в двух плоскостях с фазовым сравнением сигналов [1]

Учитывая современные тенденции и возросшие возможности современной элементной базы, для решения задач управления лучом антенны и пеленгации сигнала предлагается использовать принципы цифрового формирования луча (digital beamforming - DBF) [2].

Цифровые антенные решётки

Цифровые антенные решётки (ЦАР) являются разновидностью активных антенных решеток, отличающейся от АФАР отсутствием дискретных фазовращателей в каналах приема и передачи [3]. Каждый канал представляет собой приёмник и обладает устройством аналого-цифрового (цифро-аналогового) преобразования. Формирование фазового и амплитудного распределения в раскрыве антенны производится в цифровом виде. Разрядность ЦАП и АЦП, используемых в ЦАР, значительно превышает разрядность фазовращателей в ФАР и АФАР, что позволяет при адаптивном формировании диаграммы направленности формировать

более глубокие нули в направлении помех и обеспечивать большую точность при детектировании направления прихода сигнала [4,5]. Кроме того, так как каждый канал оцифровывается отдельно и сохраняется информация о фазе принятого сигнала [6], возможно применение корреляционных алгоритмов, определяющих направление прихода сигнала [7,8]. Поиск сигналов производится одновременно во всем пространстве, осматриваемом ЦАР, без необходимости проведения сканирования, но с сохранением углового разрешения.

В общем случае достаточно трёх каналов, но в целях резервирования, а также для усреднения показаний отдельных пар элементов рассматриваемое устройство содержит четыре когерентных приёмных канала с последующей параллельной цифровой обработкой сигналов. Пеленгация осуществляется по принципам моноимпульсной локации [9-10], формирование суммарно-разностной диаграммы антенной решётки и анализ дискриминационной характеристики будет осуществляться в цифровом виде. Подход имеет преимущество перед классической моноимпульсной локацией, поскольку не требует создания аналоговых суммарно-разностных диаграммообразующих схем, однако требует на один приёмный канал больше (четыре против трёх). Общая концепция представлена на рисунке 2. Для обеспечения когерентности обработки каналов в четырёх приёмных каналах используется единый гетеродин.

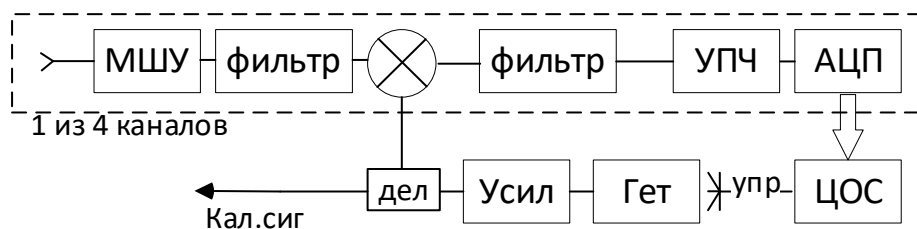


Рисунок 2 – Концепция построения устройства

Пеленгация

Как упоминалось ранее, подобный подход реализации системы на основе когерентных цифровых приёмников, позволяет применять корреляционные алгоритмы пеленгации сигналов. Помимо методов моноимпульсной локации [9], одним из эффективных алгоритмов пеленгации сигнала (оценки направления прихода сигнала, direction of arrival estimation - DOA) является алгоритм MUSIC [7], вкратце суть алгоритма состоит в вычислении собственных значений корреляционной матрицы, формируемой из сигналов в различных каналах ЦАР. Подобный подход позволяет выполнить «накопление» энергии сигнала на фоне шумов, поскольку в значениях корреляционной матрицы в итоге содержится интегральный результат, усредняющий тепловые шумы. Поэтому пеленгация таким методом тем точнее, чем больше выборки сигнала возможно накопить для анализа.

Однако подобный подход требует больших вычислительных затрат, даже для нашей весьма небольшой решётки из четырёх элементов потребуется корреляционная матрица размерности 4 на 4, что потребует проведения 10 свёрток длиной в принимаемый пакет, после чего потребуется вычислить собственные вектора данной матрицы. Результаты работы MUSIC-алгоритма для предлагаемого

устройства при обнаружении сигнала с направления (-15;10) градусов представлены на рисунках 3-4.

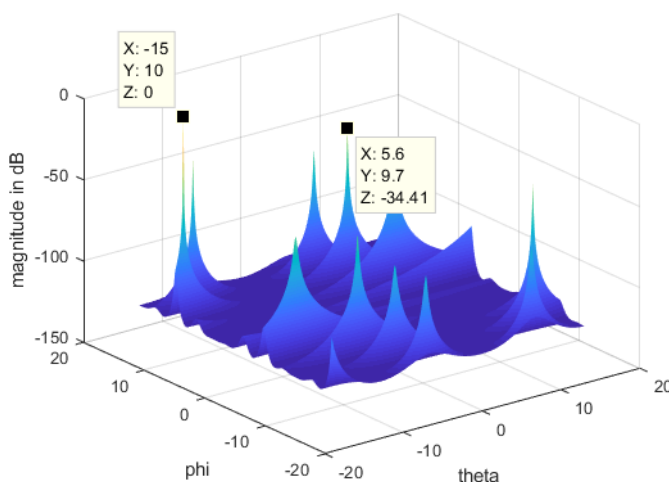


Рисунок 3 – Пространственный спектр

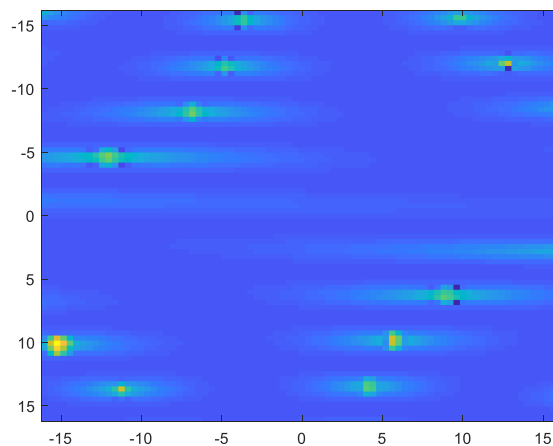


Рисунок 4 – Пространственный спектр

Рисунок 3 отражает результаты пеленгации в пространстве, максимум пространственного спектра находится в заданных для модели значениях (-15,10) по двум независимым координатам. На графике можно наблюдать паразитные максимумы пеленгации, однако все они значительно (на 20-40 дБ) слабее основного пеленгуемого значения. Точность пеленгации для данного алгоритма сложно оценить аналитически, возможно статистическое моделирование [13, 14], которое в рамках данной статьи не рассматривается, потому как предлагается отказаться от использования MUSIC-алгоритма в пользу метода, снижающего требования к вычислительной мощности.

Оценка требования точности пеленгации

Концепция реализации пеленгационного устройства на базе цифровой антенной решётки, предполагает определение направления прихода сигнала, исходя из определения разности фаз в каналах антенны (Рисунок 5).

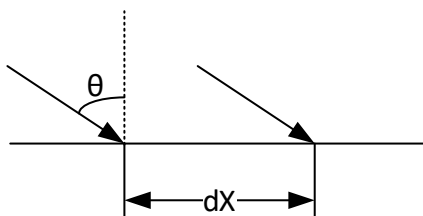


Рисунок 5 – Фазовый фронт

Принимаемый сигнал после квадратурной демодуляции представлен в виде квадратурных компонент I и Q, которые являются действительной и мнимой частями комплексного представления значения сигнала. Значение фазы в канале определяется из арктангенса отношения квадратурных компонент I и Q принятого сигнала. Далее для определения угла направления на наземный терминал абонента исходя из разности фаз в каналах используется формула:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{d\varphi \cdot \lambda}{2\pi \cdot dX}\right),$$

где θ – направление на наземный терминал, $d\varphi$ – разность фаз в каналах, λ – длина волны, dX – расстояние между фазовыми центрами элементов антенны.

Для оценки зависимости неоднозначности в определении угла направления от неоднозначности определения разности фаз представим данную функцию в виде степенного ряда из трех членов

$$\arcsin(x) = x + \frac{x^3}{6} + \frac{3x^5}{40}.$$

Для относительно небольшого сектора углов $\pm 15^\circ$ слагаемыми третьей и пятой степени можно пренебречь. Представим $\frac{d\varphi \cdot \lambda}{2\pi \cdot dX}$ как произведение $d\varphi \cdot a$, таким образом получаем:

$$\theta = d\varphi \cdot a,$$

Представим значение фаз сигналов различных элементов как $\varphi_1 = \varphi_{1уст} + e_1$ и $\varphi_2 = \varphi_{2уст} + e_2$, где $\varphi_{iуст}$ – истинное значение фазы, а e_i – ошибка фазы. Разность фаз будет иметь вид $d\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \varphi_{1уст} + e_1 - \varphi_{2уст} - e_2 = d\varphi_{уст} + e_1 - e_2$. В процессе моделирования было получено, что ошибки фазы являются случайными величинами с нормальным распределением и нулевым математическим ожиданием, разность ошибок фазы e_d будет иметь такое же распределение с дисперсией, равной удвоенной дисперсии ошибки фазы: $d\varphi = d\varphi_{уст} + e_d$. Здесь и далее рассматриваются только ошибки, возникающие в результате воздействия теплового шума, ошибки калибровки при этом считаются пренебрежимо малыми благодаря возможности точной калибровки устройства [14-16] при настройке и использования АЦП с разрядностью более 10 бит.

Перейдём от заданного условия достижения ошибки пеленгации менее 1° во всем пространственном секторе работы устройства, к более строгому требованию менее $0,7^\circ$ в двух взаимно перпендикулярных направлениях (рисунок б).

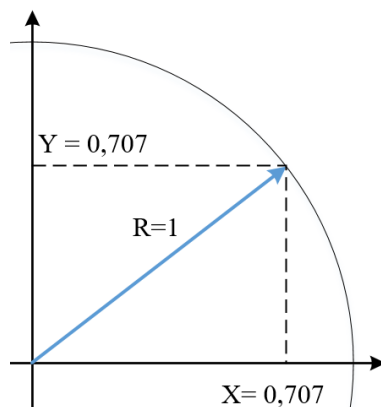


Рисунок 6 – Исходно допустима величина ошибки пеленгации

При заданном межэлементном расстоянии и длине волны для выполнения условия ошибки определения направления менее $0,7^\circ$ рассчитывается значение допустимой ошибки разности фаз e_d . Для достижения требуемой вероятности правильного определения пеленга 0,999 максимальная ошибка должна лежать в пределах $3,3\sigma$ (где σ - среднеквадратическое значение (СКО)), исходя из этого требования вычисляется значение допустимой СКО разности фаз $e_d/3,3$. Дисперсия разности ошибок фазы при этом равна σ^2 , а дисперсия ошибки определения фазы каждого канала не превышает $\sigma^2/2$. Данный результат используется как целевой в дальнейшем статистическом моделировании для определения требований к значению соотношения сигнал/шум (signal-to-noise ratio - SNR) в приёмных каналах решётки (рисунок 7).

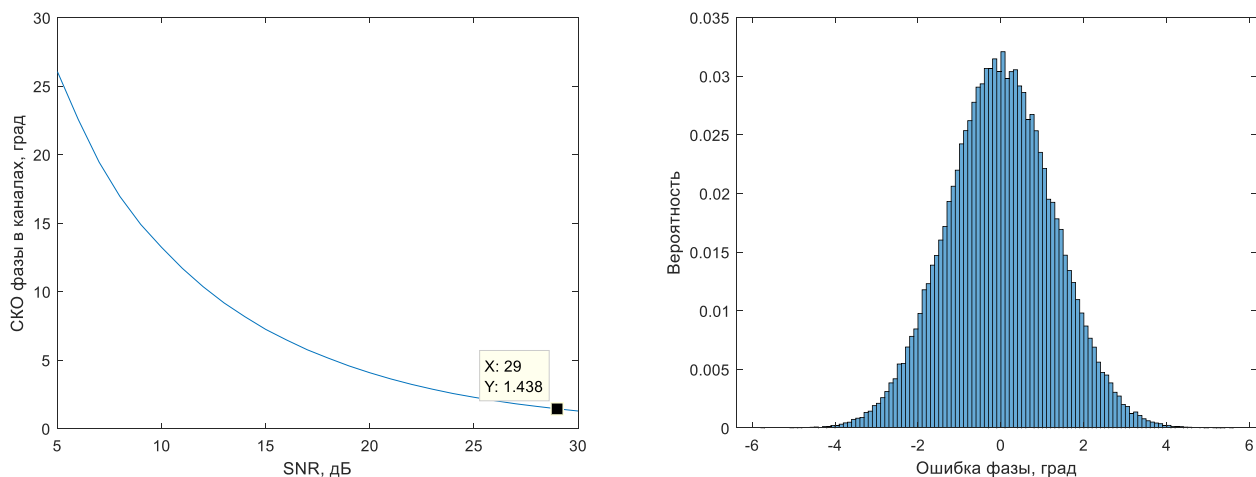


Рисунок 7 –Распределение ошибки фазы от SNR (слева),
плотность вероятности ошибки разности фаз (справа)

Это весьма жесткая оценка, поскольку, если учесть, что обе независимые координаты являются случайными величинами, то требования к допустимой СКО можно снизить. Ошибка определения направления может быть выражена как корень из суммы квадратов ошибок определения направления по двум отдельным осям. Так как ошибки определения направления по каждой из осей являются случайными величинами с гауссовым распределением и одинаковым СКО, результирующая ошибка определения направления подчиняется распределению Рэлея.[18]

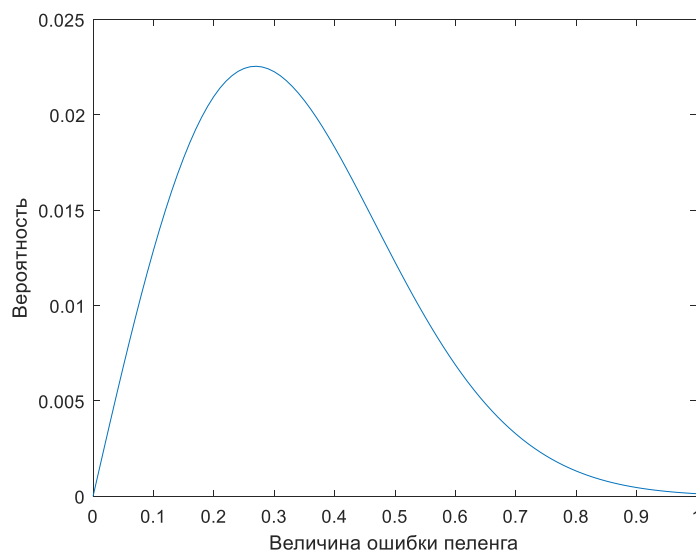


Рисунок 8 –Распределение Рэлея

Реализация алгоритма

Перейдём к основной теме данной статьи - методу повышения точности пеленгации. Сделаем допущение, что в структуру информационного пакета, передаваемого абонентом, внедрена какая-либо известная последовательность (предпочтительно псевдослучайная последовательность (ПСП)) для пакетной и/или битовой синхронизации. Согласованная фильтрация такой известной последовательности даст повышение SNR и позволит не только синхронизировать приём, но и с некой точностью пеленговать сигнал. Но такая последовательность не может быть слишком длинной – иначе значительно пострадает эффективная скорость передачи. Однако для ЦАР, позволяющей записать весь принятый сигнал в память в цифровом виде для каждого канала, такая согласованная фильтрация может быть применена ко всему пакету в целом, где в качестве коэффициентов согласованного фильтра используются детектированные значения принятых бит. Здесь уместна некая

аналогия с приведённым ранее MUSIC-алгоритмом, в котором корреляционная матрица строится с учётом накопления всего принятого сигнала.

Таким образом, можно условно разбить обработку сигнала в ЦАР на три последовательных этапа для достижения требуемого SNR (рисунок 9).

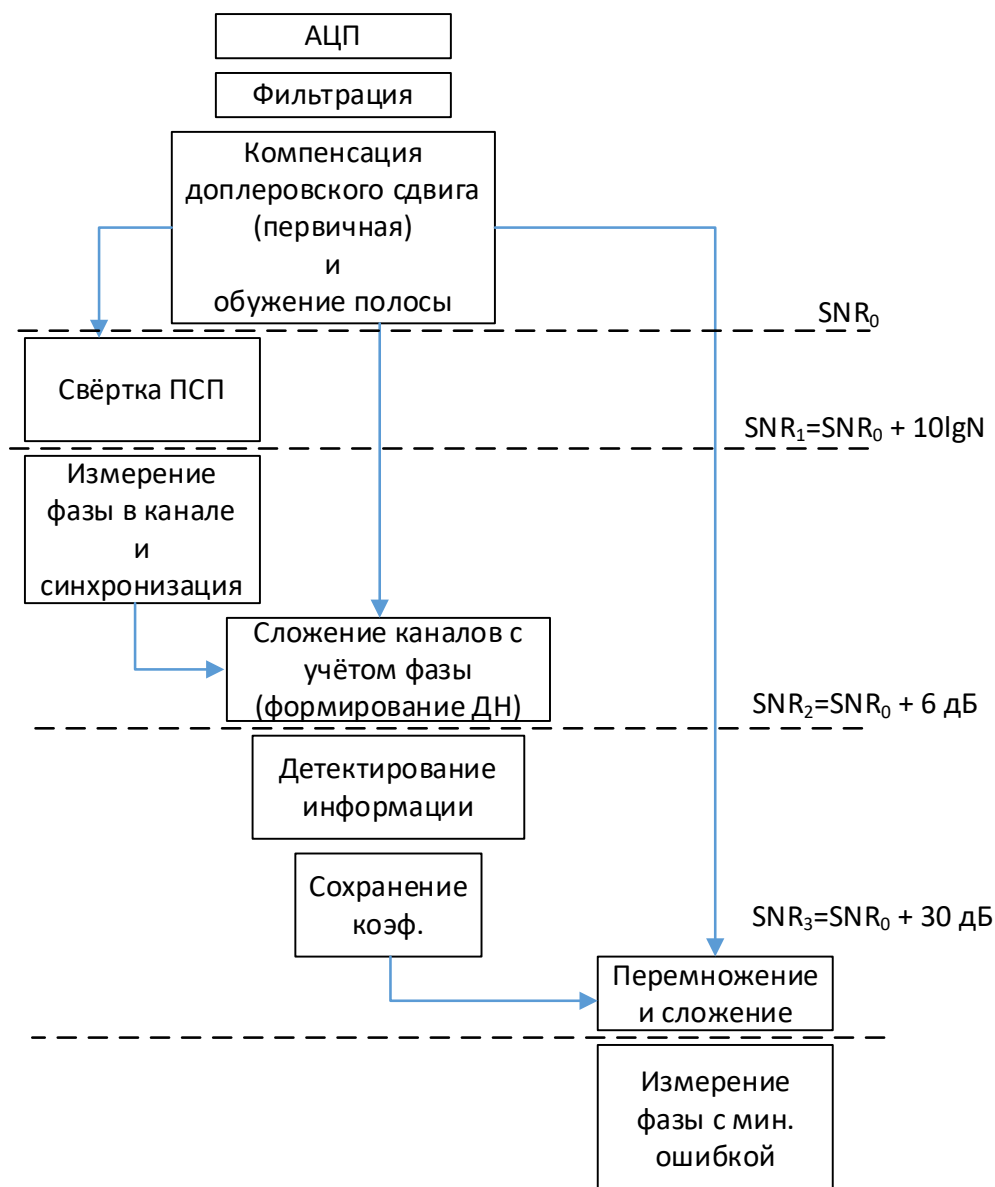


Рисунок 9 – Цифровая обработка сигнала

После оцифровки сигнала с частотой дискретизации, достаточной для захвата сигнала, смещённого за счёт доплеровского сдвига, сигнал подвергается цифровой фильтрации для дополнительного подавления соседнего канала и поступает в модуль

компенсации доплеровского сдвига. На этом этапе SNR информационного сигнала в каждом приёмном канале имеет некоторое значение SNR_0 . Сигнал сохраняется в память и будет трижды обрабатываться различными инструментами для повышения SNR и точной пеленгации.

1) Для первоначальной приблизительной пеленгации выполняется согласованная фильтрация известной заложенной в принимаемый сигнал псевдослучайной последовательности [19]. Сжатие последовательности длиной в $N=1000$ символов, позволяет получить увеличение SNR на $10 \cdot \lg(N) = 30$ дБ. Стоит оговориться, что для эффективного сжатия в условиях некомпенсированного доплеровского сдвига предполагается использование набора разных коэффициентов сжатия с учётом разной величины остаточного частотного сдвига [19]. После увеличения SNR сигнала определяется фаза сигналов в каналах решётки для последующего когерентного сложения сигналов - формирования ДН.

2) Будем считать, что сложение четырёх каналов нашей ЦАР даст прирост 6 дБ в SNR и позволит с некой вероятностью битовой ошибки (bit error rate - BER) детектировать информацию в пакете. Сделаем допущение, что мощности сигнала достаточно, чтобы количество битовых ошибок оставалось в допустимых пределах.

3) Наконец, информация об уже детектированных битах принятого пакета используется для уточнения фазы в каналах антенной решётки. Данный подход можно рассматривать как некую упрощённую аналогию согласованной фильтрации. Обладая информацией о том, какие конкретно информационные биты находятся в данном конкретном анализируемом пакете, детектированные биты используются как

коэффициенты для корреляции с хранящимся в памяти сигналом. На рисунке 10 представлен пример такой корреляции. На первом графике – детектированный пакет, на втором – зашумленный сигнал, записанный в память, на третьем – их взаимная корреляция.

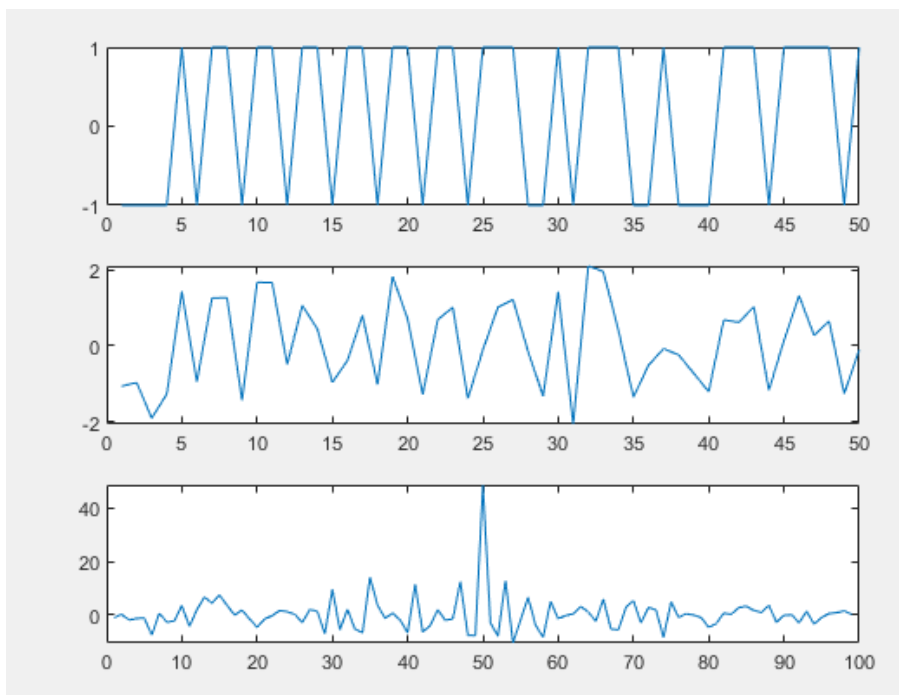


Рисунок 10 – Накопление информационного сигнала

При практической реализации нет необходимости рассчитывать все точки нижнего графика, вследствие того, что пакет уже детектирован и синхронизирован, достаточно рассчитать только одно значение для корреляционного пика и тем самым получить выигрыш в SNR за счёт количества используемых бит (в общем случае не обязательно использовать всю длину пакета). Например, при использовании N бит детектированных данных как коэффициентов для согласованной фильтрации, пренебрегая отдельными битовыми ошибками, прирост составит порядка $10 \cdot \lg(N)$. Кроме того, в отличие от ранее упомянутого MUSIC, в данном методе придётся

произвести не 10, а только 4 операции свёртки, что снижает требования к вычислителю.

Для численной проверки данного метода была разработана модель на языке MATLAB, в которую помимо теплового шума было добавлено влияние меняющегося доплеровского сдвига, нестабильность несущих частот приемника и абонента и скорости передачи. Результаты моделирования, представленные на рисунке 11, подтверждают ранее сделанные выводы и принципиальную возможность обеспечения требуемой точности пеленгации. После 10000 циклов статического моделирования видно, что, несмотря на битовые ошибки при детектировании, СКО ошибки пеленгации составляет не более $0,22^\circ$ и удовлетворяет ранее заданным требованиям ограничения ошибки пеленга значением 1° с вероятностью 0,999.

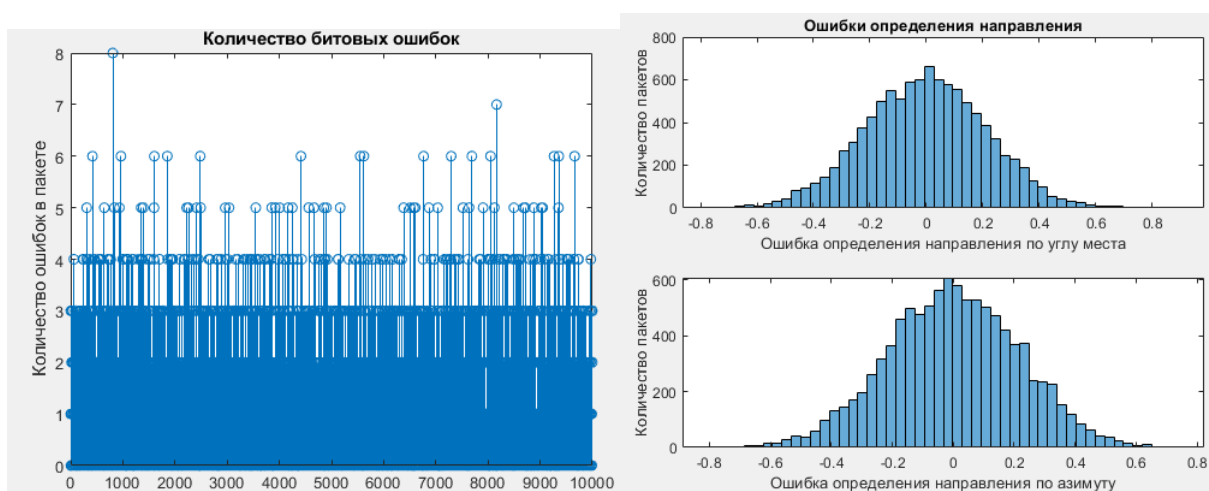


Рисунок 11 – Результаты моделирования

Заключение

Таким образом, применение цифровых антенных решёток, позволяет более широко использовать методы цифровой обработки сигналов для реализации методов создания многолучевых систем, недоступных для АФАР, и высокоэффективных алгоритмов пеленгации сигналов.

Предложенный метод позволяет снизить требования к мощности вычислителя по сравнению с применением метода MUSIC и добиться высокой точности пеленгации без построения полной кросс-корреляционной матрицы антенной решётки. Метод может использоваться в цифровых решётках с большим количеством элементов, либо выделяя для задачи пеленга отдельные элементы, либо используя несколько различных групп элементов для усреднения ошибок и повышения точности. Результаты расчётов подтверждаются статистическим моделированием и в настоящий момент используются для изготовления опытного образца устройства.

Список источников

1. Д.Р. Родс. Введение в моноимпульсную радиолокацию: перевод с англ. – М.: Советское радио, 1960. - 160 с.
2. Lyalin K.S., Chistuhin V.V., Oreshkin V.I., Chirkunova J.V. Digital beamforming multibeam antenna array design // 19th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo - 2009), 2009, pp. 417-418.

3. Шмачилин П.А., Шумилов Т.Ю. Матричная диаграммообразующая схема цифровой антенной решётки // Труды МАИ. 2019. № 109. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=111382>. DOI: [10.34759/trd-2019-109-12](https://doi.org/10.34759/trd-2019-109-12)
4. Орешкин В.И. Оценка степени влияния дестабилизирующих факторов на характеристики цифровой антенной решетки: дисс.... к.т.н.- М.: ГУП НПП «СПУРТ», 2009. - 169 с.
5. Меркулова Ж.В., Орешкин В.И., Цветков В.К. Компенсация амплитудно-фазового разброса в цифровой антенной решётке // Естественные и технические науки. 2017. № 5(107). С. 185-188.
6. Орешкин В.И., Лялин К.С., Максимовская А.И., Меркулова Ж.В., Чистюхин В.В. Влияние способа получения квадратурных компонент сигнала на характеристики антенной решетки с цифровым формированием луча // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2016. Т. 21. № 3. С. 254-260.
7. Чиркунова Ж.В. Пространственная обработка сигналов в цифровых антенных решетках: дисс.....к.т.н. – М.: ГУП НПП «СПУРТ», 2009. - 161 с.
8. Меркулова Ж.В., Орешкин В.И., Цветков В.К. MUSIC алгоритмы: классический и с пространственным сглаживанием // Естественные и технические науки. 2017. № 5 (107). С. 182-184.
9. Овчинникова Е.В., Рыбаков А.М. Печатная антенная решетка для бортовой радиолокационной станции сантиметрового диапазона // Труды МАИ. 2012. № 52. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=29558>

10. Кондратьева С.Г. Многофункциональная бортовая антенная решетка интегрированного радиоэлектронного комплекса // Труды МАИ. 2012. № 52. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=29560>
11. Сучков А.В. Моноимпульсная волноводно-щелевая антенная решетка с частотным сканированием // Труды МАИ. 2016. № 86. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=66408>
12. Чистяков В.А. Моноимпульсный радиопеленгатор с использованием цифровой антенной решетки // Труды МАИ. 2020. № 115. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=119921>. DOI: [10.34759/trd-2020-115-07](https://doi.org/10.34759/trd-2020-115-07)
13. Чистяков В.А. Система мониторинга угловых координат источников радиоизлучения для космических аппаратов спутниковой связи // Труды МАИ. 2019. № 109. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=111394>. DOI: [10.34759/trd-2019-109-15](https://doi.org/10.34759/trd-2019-109-15)
14. Чистяков В.А. Алгоритм адаптивной фильтрации помех в цифровых антенных решетках спутниковой связи // Труды МАИ. 2019. № 105. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=104239>
15. Джиган В.И., Курганов В.В. Калибровка цифровых антенных решёток с помощью алгоритмов адаптивной обработки сигналов // Телекоммуникации. 2021. № 2. DOI: [10.31044/1684-2588-2021-0-2-8-16](https://doi.org/10.31044/1684-2588-2021-0-2-8-16)
16. Курганов В.В., Джиган В.И. Калибровка антенных решёток с малым числом элементов: проблемы и их решения // Проблемы разработки перспективных микро- и

17. Djigan V.I., Kurganov V.V. Least Squares Criterion Adaptive Filtering Algorithms as Tools for Calibration of Arrays with Digital Beamforming // 12th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT-2020), September 2020. DOI: [10.1109/UkrMW49653.2020.9252686](https://doi.org/10.1109/UkrMW49653.2020.9252686)
18. Дж. Гудман. Статистическая оптика: перевод с англ. – М.: Мир, 1988. - 528 с.
19. Лялин К.С., Хасанов М.С., Мелёшин Ю.М., Кузьмин И.А. Спектральный метод подавления боковых лепестков автокорреляционной функции длинных псевдослучайных бинарных последовательностей // Труды МАИ. 2018. № 103. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=100800>
20. Орешкин В.И., Лялин К.С., Хасанов М.С., Мелёшин Ю.М., Довгаль Т.А. Метод улучшения разрешающей способности в радиолокаторах с фазокодовой манипуляцией // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2018. Т. 23. № 4. С. 371-378. DOI: [10.24151/1561-5405-2018-23-4-371-378](https://doi.org/10.24151/1561-5405-2018-23-4-371-378)

References

1. D.R. Rods. *Vvedenie v monoimpul'snyuyu radiolokatsiyu* (Introduction to monopulse), Moscow, Sovetskoe radio, 1960, 160 p.
2. Lyalin K.S., Chistuhin V.V., Oreshkin V.I., Chirkunova J.V. Digital beamforming multibeam antenna array design, *19th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology* (CriMiCo - 2009), 2009, pp. 417-418.

3. Shmachilin P.A., Shumilov T.Yu. *Trudy MAI*, 2019, no. 109. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=111382>. DOI: [10.34759/trd-2019-109-12](https://doi.org/10.34759/trd-2019-109-12)
4. Oreshkin V.I. *Otsenka stepeni vliyaniya destabiliziruyushchikh faktorov na kharakteristiki tsifrovoi antennoi reshetki* (Destabilizing factors influence research for the characteristics of a digital antenna array), Doctor's thesis, Moscow, GUP NPTs «SPURT», 2009, 169 p.
5. Merkulova Zh.V., Oreshkin V.I., Tsvetkov V.K. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2017, no. 5(107), pp. 185-188.
6. Oreshkin V.I., Lyalin K.S., Maksimovskaya A.I., Merkulova Zh.V., Chistyukhin V.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektronika*, 2016, vol. 21, no. 3, pp. 254-260.
7. Chirkunova Zh.V. *Prostranstvennaya obrabotka signalov v tsifrovyykh antennykh reshetkakh* (Spatial signal processing in digital antenna arrays), Doctor's thesis, Moscow, GUP NPTs «SPURT», 2009, 161 p.
8. Merkulova Zh.V., Oreshkin V.I., Tsvetkov V.K. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2017, no. 5 (107), pp. 182-184.
9. Ovchinnikova E.V., Rybakov A.M. *Trudy MAI*, 2012, no. 52. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=29558>
10. Kondrat'eva S.G. *Trudy MAI*, 2012, no. 52. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=29560>
11. Suchkov A.V. *Trudy MAI*, 2016, no. 86. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=66408>

12. Chistyakov V.A. *Trudy MAI*, 2020, no. 115. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=119921>. DOI: [10.34759/trd-2020-115-07](https://doi.org/10.34759/trd-2020-115-07)
13. Chistyakov V.A. *Trudy MAI*, 2019, no. 109. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=111394>. DOI: [10.34759/trd-2019-109-15](https://doi.org/10.34759/trd-2019-109-15)
14. Chistyakov V.A. *Trudy MAI*, 2019, no. 105. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=104239>
15. Dzhigan V.I., Kurganov V.V. *Telekommunikatsii*, 2021, no. 2. DOI: [10.31044/1684-2588-2021-0-2-8-16](https://doi.org/10.31044/1684-2588-2021-0-2-8-16)
16. Kurganov V.V., Dzhigan V.I. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh system*, 2020, no. 4, pp. 159-168. DOI: [10.31114/2078-7707-2020-4-159-168](https://doi.org/10.31114/2078-7707-2020-4-159-168)
17. Djigan V.I., Kurganov V.V. Least Squares Criterion Adaptive Filtering Algorithms as Tools for Calibration of Arrays with Digital Beamforming, *12th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT-2020)*, September 2020. DOI: [10.1109/UkrMW49653.2020.9252686](https://doi.org/10.1109/UkrMW49653.2020.9252686)
18. Dzh. Gudman. *Statisticheskaya optika* (Statistical optics), Moscow, Mir, 1988, 528 p.
19. Lyalin K.S., Khasanov M.S., Meleshin Yu.M., Kuz'min I.A. *Trudy MAI*, 2018, no. 103. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=100800>
20. Oreshkin V.I., Lyalin K.S., Khasanov M.S., Meleshin Yu.M., Dovgal' T.A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektronika*, 2018, vol. 23, no. 4, pp. 371-378. DOI: [10.24151/1561-5405-2018-23-4-371-378](https://doi.org/10.24151/1561-5405-2018-23-4-371-378)

Труды МАИ. 2021.Выпуск № 120

Trudy MAI. 2021.Issues no.120

Статья поступила в редакцию 20.09.2021; одобрена после рецензирования 30.09.2021;
принята к публикации 22.10.2021.

The article was submitted 20.09.2021; approved alter reviewiang 30.09.2021; accepted for
publication 22.10.2021.