

Алгоритмы оценки пространственного спектра в адаптивных цифровых антенных решётках

В. П. Петров

В статье рассматриваются методы спектрального анализа пространства сигналов и помех при формировании алгоритмов оценки количества сигналов и помех и направление их прихода на цифровую антенную решётку. Проводится сравнительная оценка качества разрешения различными методами в соответствии с критерием максимума отношения сигнал / (помеха + шум).

Ключевые слова: пространственный спектр, пространственное разрешение, адаптивная цифровая антенная решётка.

1. Введение

Адаптивные цифровые антенные решётки (АЦАР) находят применение в различных областях техники, в которых требуется определять координаты объекта или источника информации в сложной помеховой обстановке. Наличие множества приёмных элементов, расположенных известным упорядоченным способом, позволяет увеличивать объём информации об интересующих источниках сигналов и уменьшить влияние помех и шумов на трассах между источниками сигналов и антенной решёткой.

В общем случае АЦАР позволяют:

- эффективно бороться с шумами, повышать отношение сигнал/шум;
- обнаруживать сигнал, уровень которого ниже уровня шумов;
- определять направление прихода сигналов;
- создавать узкие лучи в направлении прихода сигналов;
- управлять диаграммой направленности, устранять или корректировать боковые лепестки.

Достигнутый за последнее время прогресс в разработке и производстве микросхем привёл к созданию экономичных и надёжных устройств цифровой обработки сигналов (ЦОС), что в результате расширило область применения адаптивных ЦАР. Можно отметить следующие основные области применения АЦАР: радиосвязь, радиолокация, радионавигация, гидролокация, сейсмология, радиоголография, медицинская электроника. Очевидно, что условия применения и требования к параметрам, подлежащим оценке, различны.

Многообразие применений и требований породило многообразие алгоритмов цифровой обработки сигналов. Разработаны универсальные алгоритмы, охватывающие широкий спектр задач и требований. Однако при решении конкретных задач всегда найдётся алгоритм, более удобный и эффективный, чем универсальный. В настоящей статье анализируются алгоритмы, используемые в эфирной и спутниковой радиосвязи.

ЦАР используются в радиосвязи, включая радиолокацию и радионавигацию, в трёх режимах: 1) формирование многолучевой диаграммы направленности, 2) пространственный обзор на основе фазированной ЦАР и 3) адаптивный режим, при котором ЦАР адаптируется к изменению помеховой обстановки, к количеству и направлению полезных источников сигналов.

Обработка сигналов в адаптивных ЦАР делится на два этапа: 1) анализ сигнально-помехового пространства и 2) оптимальное функционирование в реальных условиях с заданными требованиями. На первом этапе происходит идентификация объектов, определяется количество полезных сигналов и направление их прихода на решётку, идентифицируются источники помех (коррелированные или некоррелированные) и их направление. На втором этапе происходит формирование узких диаграмм направленности в направлении источников сигналов и пространственная режекция в направлении помех.

Разработка алгоритмов функционирования ЦАР началась в 60-х годах прошлого века для решения задач сейсмологии (определение источников землетрясений и подземных ядерных взрывов) и радиолокации (определение координат, направления и скорости движения летательных аппаратов). С появлением сотовой связи активизировалась работа в направлении решения многообразных задач мобильной связи.

Все методы функционирования ЦАР можно разделить на две группы: спектральные методы и параметрические методы.

Первая группа методов основана на развитом математическом аппарате цифрового спектрального анализа[1] и решает задачу определения направления прихода сигналов и помех и оценку их количества. Вторая группа методов решает задачу пространственной узкополосной фильтрации и цифровое формирование диаграммы направленности антенны. Обе группы методов используют базовую математическую модель, формализующую взаимодействие конкретной решётки с реальным, но изменяющимся во времени, пространством сигналов и помех. Именно способность адаптироваться к текущим изменениям сигнально-помеховой обстановки и способность решать при этом задачу оптимального приёма является важным фактором, определяющим эффективность АЦАР.

2. Антенные решётки

Прежде всего, определимся с терминами. Обычной антенной в режиме излучения называется устройство, излучающее в пространство электромагнитные волны за счёт переменного тока, протекающего по устройству. Ток создаётся генератором, питающим антенну. Распределение тока по антенне создаёт диаграмму направленности – область пространства, в котором распределено излучение, созданное данной антенной. В режиме приёма ток в обычной антенне наводится электромагнитным полем. Диаграмма направленности (ДН) в режиме приёма совпадает с диаграммой направленности в режиме излучения. Обычная антенна является устройством взаимным. Управление диаграммой направленности ограничено конструкцией антенны, что для практики недостаточно.

Обычная антенная решётка представляет собой упорядоченную совокупность антенных элементов, совместное действие которых формирует диаграмму направленности решётки как по форме и направлению главного лепестка диаграммы направленности, так и по количеству и уровню боковых лепестков. По сравнению с одиночным антенным элементом решётка имеет дополнительные параметры для управления диаграммой направленности: взаимное расположение и расстояние между антенными элементами и разность фаз токов, протекающих по антенным элементам.

Простейшей упорядоченной системой является линейная антенная решётка (ЛАР), у которой все элементы располагаются вдоль прямой линии (рис. 1а). В двухмерных решётках элементы упорядочиваются на плоскости, в трёхмерных – на поверхностях определённой

формы (цилиндр, конус, полусфера и прочее). Чем сложнее система, тем больше возможностей для управления её диаграммой направленности.

Однако обычная антенная решётка обладает крупным недостатком: она в режиме приёма не способна отделить полезные информационные сигналы от шумов и помех. Она принимает всё в рамках своей диаграммы направленности и осуществляет прямое суммирование поступивших на элементы решётки сигналов, устраняя информацию о фазовых различиях сигналов. Особенно этот недостаток проявляется в сложной помеховой обстановке в городских условиях, когда помехами являются многочисленные переотражения от земли и строений, а полезный сигнал не имеет прямой видимости на трассе «источник сигнала – приёмная антенна». В этом случае уровень полезного сигнала сравним и даже меньше уровня совокупной помехи.

В адаптивной решётке сигналы с каждого элемента антенны поступают на адаптивный линейный сумматор, являющийся базовым узлом в адаптивной обработке сигналов. В адаптивном сумматоре сигналы суммируются с учётом их задержек на элементах антенны. Задержки несут информацию о каждом m -ом сигнале источника, приходящем на каждый n -ый элемент антенны. Суммирование проводится после прохождения сигналов с каждого элемента решётки через блок весовых коэффициентов w .

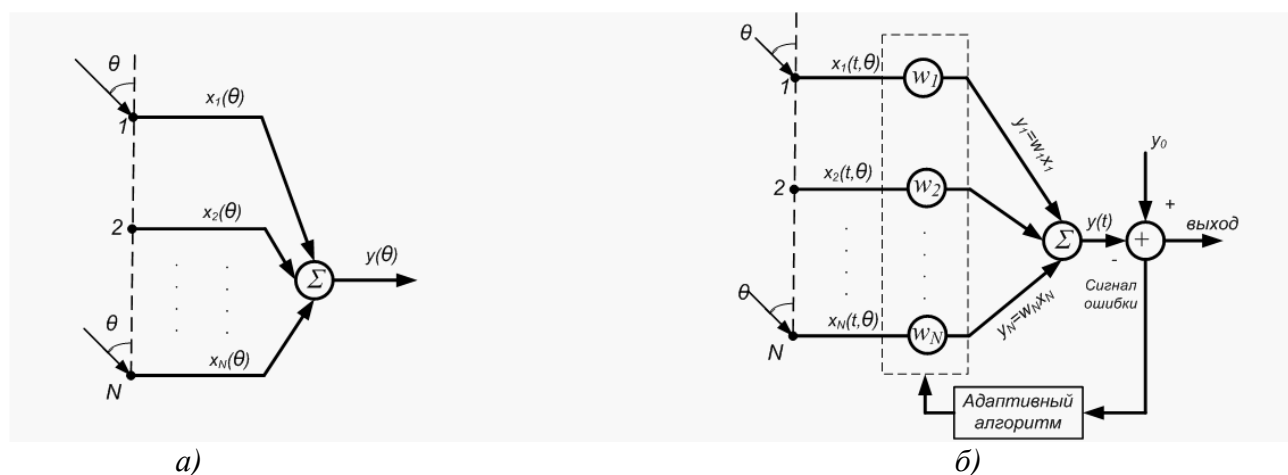


Рис.1. Обычная и адаптивная антенные решётки

Обычная решётка является структурной частью адаптивной решётки, поставляющей информацию об источниках излучения в рамках своей диаграммы направленности. Дальнейшая работа по идентификации источников и подавлению помех осуществляется блоками обработки сигналов.

Современные технологии связи ведут борьбу за увеличение скорости передачи информации и увеличение спектральной эффективности каналов связи. В соответствии с теоремой Шеннона, скорость передачи информации C , ширина спектра частот сигнала ΔF и отношение уровней сигнал/помеха s/n связаны соотношением:

$$C = \Delta F \ln(1 + s/n). \quad (1)$$

При ограниченных возможностях увеличения ΔF основное внимание уделяется предельно возможному увеличению s/n . Адаптивные ЦАР призваны решать именно эту проблему.

В основе принципа работы АЦАР лежит адаптивная цифровая обработка сигналов, снимаемых отдельно с элементов антенной решётки.

Применительно к задачам антенной техники адаптивная антенна автоматически изменяет свои параметры в соответствии с информационной и помеховой обстановкой в зоне её действия, чтобы наилучшим образом удовлетворить требованиям, поставленным программой.

Основным свойством адаптивной системы является изменяющееся во времени функционирование с саморегулированием. Адаптивные системы по своей природе должны быть изменяющимися во времени и нелинейными. Их свойства зависят от входных сигналов. Адаптивные системы являются саморегулируемыми, и процесс регулирования зависит от усреднённых в ограниченных интервалах времени характеристик сигнала, а не от мгновенного значения или мгновенных значений внутренних состояний системы. Процесс регулирования целенаправленно изменяется для того, чтобы оптимизировать заданные параметры функционирования.

Адаптация в антенных системах бывает двух видов: без обратной связи и с обратной связью.

Адаптация без обратной связи состоит из измерений характеристик входных сигналов, введения этой информации в алгоритм и использование этих результатов для регулирования системы в соответствии с программой.

Адаптация с обратной связью, кроме того, автоматически вносит коррекцию с целью оптимизации функционирования системы, анализируя выходной сигнал и оценивая его отклонение от заданных требований. Этот процесс есть адаптация с функциональной обратной связью. В АЦАР в основном используется адаптация с обратной связью.

3. Матричные параметры адаптивной обработки сигналов

Рассмотрим характеристики адаптивной цифровой решётки (рис.1б), состоящей из N элементов и принимающих M сигналов s_m с различных направлений θ_m . Характеристики необходимы для решения следующих задач:

- определение направлений прихода сигналов θ_m от каждого -ого источника и определение количества источников M ;
- идентификация полезных сигналов и помех с определением числа помеховых сигналов L ($M - L$ есть число полезных сигналов);
- формирование узких диаграмм направленности в сторону полезных источников и формирование «нулей» в сторону помеховых сигналов;
- динамическое формирование пространственно-временного спектра для адаптивного управления характеристиками решётки.

Сигналы, поступающие на элементы решётки, описываются уравнением:

$$x(t, \theta_m) = \sum_1^M a(\theta_m) s_m(t) + n = A(\theta) s(t) + n, \quad (2)$$

где $A(\theta) = [a(\theta_1) \dots a(\theta_M)]$ есть матрица размерностью $[MN]$, состоящая из M сигналов, приходящих на N элементов решётки, $s(t) = [s_1, \dots, s_M]^T$ есть вектор комплексных амплитуд сигналов. Вектор $\theta = [\theta_1 \dots \theta_M]^T$ есть вектор направлений прихода сигналов, подлежащий оценке. Вектор $a(\theta_m)$ в уравнении (2) применительно к линейной решётке, изображённой на рис.1, описывается уравнением:

$$a(\theta_m) = \left[1, \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} d \cos \theta_m\right), \dots, \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} (N-1) d \cos \theta_m\right) \right]^T. \quad (3)$$

$a(\theta_m)$ есть вектор поворота, играющий основную роль в определении направления прихода сигналов и в цифровом диаграммообразовании.

При другой конфигурации элементов решётки вектор $a(\theta_m)$ имеет другое выражение, нежели уравнение (3), но это не является принципиальным при матричном решении задач. На определённом этапе оценки θ следует воспользоваться уравнением, отвечающим заданному распределению элементов. Если решётка является прямоугольной, например, с элемен-

тами M и N в вертикальной и горизонтальной плоскостях, то она способна работать в угловых координатах пространства θ и φ . В этом случае векторы поворота $a(\theta, \varphi)$ есть столбцы вектора направлений A .

Сигналы $x_n(t)$ с выходов элементов адаптивной решётки поступают через блок весовых коэффициентов w_n на сумматор:

$$y(t) = \sum_{n=1}^N w_n^* x_n(t). \quad (4)$$

В векторной форме уравнение (4) имеет вид:

$$y(t) = \mathbf{w}^H \mathbf{x}(t), \quad (5)$$

где $\mathbf{w}_n = [w_{1n}, w_{2n}, \dots, w_{mn}]^T$ есть вектор весовых коэффициентов, или весовой вектор. Этот вектор является основным вектором адаптивной системы, определяющим направление прихода сигналов в режиме приёма и осуществляющим цифровое формирование диаграммы направленности в режиме передачи. Определение комплексных параметров весового вектора и их корректировка в текущем времени, отвечающих наилучшим образом цели адаптации, является главной задачей обработки сигналов антенной решётки.

В процессе формирования адаптивных алгоритмов требуются характеристики, отличающие полезные сигналы от помеховых и мешающих. Главной из них является корреляционная матрица входных сигналов R :

$$R = E[x_n x_n^T] = \begin{bmatrix} x_{1n}^2 & x_{1n}x_{2n} & \dots & x_{1n}x_{Mn} \\ x_{2n}x_{1n} & x_{2n}^2 & \dots & x_{2n}x_{Mn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{Mn}x_{1n} & x_{Mn}x_{2n} & \dots & x_{Mn}^2 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Спектральные методы обработки сигналов в адаптивных решётках основаны на анализе пространственного спектра мощности в зоне действия решётки. Выходная мощность на сумматоре решётки определяется уравнением:

$$P(\mathbf{w}) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N |y(t)|^2 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \mathbf{w}^H \mathbf{x}(t) \mathbf{x}^H(t) \mathbf{w} = \mathbf{w}^H \mathbf{R} \mathbf{w}. \quad (7)$$

Мощность сигнала P , определяемая уравнением (7), используется для оптимизации во многих методах адаптации.

4. Основные алгоритмы обработки сигналов в адаптивных решётках

Идея использования антенных решёток для адаптивного приёма сигналов в условиях помех возникла в шестидесятих годах прошлого века и получила развитие в семидесятих и восьмидесятих годах в радиолокации, радионавигации, сейсмологии. Обстоятельные обзоры алгоритмов и схемотехники этого периода развития приведены в работах [2, 3]. В 90-х годах развитие сотовой и спутниковой связи привело к созданию универсальных алгоритмов, отвечающих потребностям в данной области. В работе [4] дано подробное описание универсальных алгоритмов Кейпона [8], MUSIC, ESPRIT и приведено около 550 источников, отражающих состояние адаптивных методов на данный период знаний. Детальному анализу принципов адаптации и сверхразрешения посвящена работа [5].

Развитие мобильной связи в последнее десятилетие поставило новые задачи в части эффективного использования антенных систем в условиях широкополосности и высоких скоростей передачи, что потребовало создания новых алгоритмов обработки сигналов на антен-

ных элементах. Обсуждению и решению этих задач посвящены работы [6, 7]. Ниже кратко рассмотрены универсальные алгоритмы применительно к задачам техники связи.

Обработка принятых сигналов в адаптивных решётках делится на два этапа: вхождение в связь и приём данных. В каждом из указанных режимов должны применяться свои алгоритмы обработки.

В режиме вхождения в связь вначале анализируется окружающая обстановка. Антенна получает данные, обрабатывает их и выдаёт решение об источниках помех и желаемых сигналов, количество которых может быть несколько.

В режиме приёма данных система вычисляет весовые коэффициенты, которые формируют желаемую ДН с максимумами лучей в направлении требуемых источников и минимумами в направлении помех. Цикл периодически повторяется с целью слежения за подвижными объектами.

Методы определения направления прихода сигналов делятся на два вида: спектральные и параметрические. В спектральном подходе оценивается спектр сигнала и по количеству и расположению максимумов находят направление прихода сигнала. Параметрический подход требует синхронного поиска всех интересующих параметров. Несмотря на то, что параметрические методы дают лучшую разрешающую способность, для их реализации требуется большие вычислительные ресурсы, что усложняет работу алгоритмов в реальном масштабе времени.

Спектральные методы заключаются в том, что оценивается пространственная мощность $P(\theta)$ по всем направлениям и направлением источника сигнала является направление с максимальной мощностью. Количество источников сигналов будет соответствовать количеству максимумов в пространственном спектре. После построения и нахождения максимумов определяются направления, соответствующие этим максимумам.

Рассмотрим основные алгоритмы определения направлений прихода сигналов на адаптивную решётку.

Метод Кейпона (Сарон) используется для различения двух близко расположенных источников излучения. В основу метода положена условная оптимизация на основе критерия максимального правдоподобия:

$$\min_{\mathbf{w}} P(\mathbf{w}) \quad \text{при условии } \mathbf{w}^H \mathbf{A}(\theta_0) = 1, \quad (8)$$

где мощность $P(\mathbf{w})$ определяется по формуле (7), а угол θ_0 есть направление полезного сигнала. Мощности сигналов и помех с остальных направлений минимизируются. Формирователь Кэйпона сводит к минимуму мощность, наведённую шумом и любым другим сигналом с ненужной стороны, одновременно удерживая постоянным отношение сигнал/шум в нужном направлении θ_0 .

Весовые коэффициенты находятся по формуле [8]:

$$\mathbf{w}_{\text{cap}} = \frac{\hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{A}(\theta)}{\mathbf{A}^H(\theta) \hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{A}(\theta)}. \quad (9)$$

Подставив формулу (8) в уравнение (10), получим следующий пространственный спектр:

$$P_{\text{cap}}(\theta_0) = \frac{1}{\mathbf{A}^H(\theta_0) \hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{A}(\theta_0)}. \quad (10)$$

Идея метода Кейпона используется для борьбы с сосредоточенными помехами и многолучевым распространением. В последнем случае важно определить истинное направление полезного сигнала и не принять его за сигнал переотражённый.

Алгоритм MUSIC (Multiple Signal Classification) разработан для получения спектра зашумлённого сигнала на основе разбиения его на пространство сигнала и пространство шу-

мов. Для получения автокорреляционной функции сигнала используется матрица Теплица. Пространственный спектр сигнала определяется по матрице векторов собственных значений. Алгоритм является универсальным как для определения направления прихода сигналов с высоким разрешением, так и для борьбы с помехами.

Корреляционная матрица сигналов и шумов представляется в виде суммы:

$$\mathbf{R} = \mathbf{U}_s \mathbf{\Lambda}_s \mathbf{U}_s^H + \mathbf{U}_n \mathbf{\Lambda}_n \mathbf{U}_n^H, \quad (11)$$

где $\mathbf{\Lambda}_s$ и $\mathbf{\Lambda}_n$ есть диагональные матрицы собственных значений сигналов и шумов соответственно, а $\mathbf{U}_s$ и $\mathbf{U}_n$ есть матрицы собственных векторов, соответствующих собственным значениям. Проекция подпространств сигналов и помех можно выразить матрицей направлений в виде:

$$\begin{aligned} \mathbf{\Pi} &= \mathbf{U}_s \mathbf{U}_s^H = \mathbf{A}(\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H, \\ \mathbf{\Pi}^\perp &= \mathbf{U}_n \mathbf{U}_n^H = \mathbf{I} - \mathbf{A}(\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H, \end{aligned} \quad (12)$$

где $\mathbf{\Pi}$ содержит информацию о возможных направлениях источников сигналов, а $\mathbf{\Pi}^\perp$ – информацию об источниках помех. Пространственный спектр на основе алгоритма MUSIC определяется уравнением:

$$P_M(\theta) = \frac{\mathbf{A}^H(\theta) \mathbf{A}(\theta)}{\mathbf{A}^H(\theta) \mathbf{\Pi}^\perp \mathbf{A}(\theta)}. \quad (13)$$

Недостатком этого алгоритма является необходимость априорного знания направления прихода полезных сигналов и мешающих помех.

ESPRIT является вычислительно эффективным и надёжным методом оценки направления прихода сигнала. Алгоритм использует два идентичных массива, элементы которых должны быть согласованными парами с идентичным вектором смещения, то есть второй элемент каждой пары должен располагаться на том же расстоянии и в том же направлении по отношению к первому элементу. Например, линейная антенная решётка из четырёх одинаковых элементов с интервалом d между элементами может быть рассмотрена как два массива из трёх соответствующих пар: одна из первых трёх элементов и одна с тремя последними элементами так, что первый и второй элементы образуют одну пару, второй и третий элементы образуют другую пару, и так далее. Два массива получаются на расстоянии d .

Сигналы, наводимые на -ую пару, относящуюся к узкополосному источнику в направлении θ , обозначим через $x_l(t)$ и $y_l(t)$. Разность фаз между этими двумя сигналами зависит от времени прохождения плоской волны источника, где волна рассматривается, как будто перемещается из одного элемента к другому.

Так как два элемента имеют сдвиг $\Delta_0 = d/\lambda$, из этого следует:

$$y_l(t) = x_l(t) \exp(j2\pi\Delta_0 \cos(\theta)), \quad (14)$$

где Δ_0 обозначает амплитуду вектора смещения.

Этот вектор множества обозначает опорное направление, и все другие направления измеряются относительно этого вектора.

Пусть имеются l массивов смещённых пар сигналов $\mathbf{x}(t)$ и $\mathbf{y}(t)$:

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}_x(t), \quad (15)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{A}\mathbf{\Phi}\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}_y(t), \quad (16)$$

где $\mathbf{A}$ – матрица размерностью $L \times M$, столбцами которой являются M векторов направления, относящегося к M источникам; $\mathbf{\Phi}$ – диагональная матрица с диагональными элементами

$\psi_{mm} = e^{j2\pi\Delta_0\cos(\theta_m)}$, $\mathbf{s}(t)$ – матрица M источников сигналов, $\mathbf{n}_x(t)$ и $\mathbf{n}_y(t)$ – матрицы шумов.

Из сравнения уравнений (15) и (16) следует, что вектор поворота обозначен символами **АФ**.

Собственные векторы $\mathbf{U}_x$ и $\mathbf{U}_y$ корреляционных матриц $\mathbf{R}_x$ и $\mathbf{R}_y$ сигналов $x(t)$ и $y(t)$ и собственные значения ψ связаны соотношением:

$$\mathbf{U}_x\psi = \mathbf{U}_y. \quad (17)$$

Уравнение (17) определяет собственные значения ψ , которые, в свою очередь, определяют направления источников сигналов:

$$\hat{\theta}_i = \arccos\left\{\frac{\text{Arg}(\psi_m)}{2\pi\Delta}\right\}, m = 1, \dots, M. \quad (18)$$

Исследованиям универсальных алгоритмов посвящено большое число работ, в частности [4, 6, 8, 9]. Привлекательные возможности адаптивных решёток в решении многообразных задач радиосвязи явились стимулом как для модернизации универсальных алгоритмов, так и для разработки новых, использующих основные положения известных алгоритмов. Цифровое диаграммообразование, используемое в режиме излучения решётки, базируется на результатах обработки сигналов в режиме приёма. Формирование узких диаграмм направленности в направлении полезных источников и нулей в направлении помех обеспечивается аналогичным математическим аппаратом и дополняется теорией узкополосной цифровой фильтрации. Эти вопросы являются предметом отдельного исследования.

5. Применение адаптивных цифровых решёток

Технологии цифровой обработки сигналов играют определяющую роль в современных системах связи. Цифровое диаграммообразование (ЦДО) является наиболее перспективным направлением в этих технологиях. Данные технологии стали базовыми в радиолокационных системах и в спутниковой связи. В области сотовой связи многочисленные исследования по применению ЦДО были проведены в конце 90-х годов. Несмотря на положительные результаты, внедрение ЦДО началось только с наступлением эры 4G. Данный факт объясняется двумя обстоятельствами: созданием относительно дешёвых чипсетов, реализующих цифровую обработку сигналов, и практически исчерпанными возможностями решить проблему роста производительности сетей безантенным способом.

Технология ММО на основе пространственно-временного кодирования включена в стандарты 3GPP для сетей мобильной связи и в стандарты IEEE 802.16 сетей беспроводного широкополосного доступа. Эта технология легко реализуется как развитыми методами ЦДО, так и методами пространственно-временного кодирования Аламоути [6, 7]. Распараллеливание каналов связи и множественный доступ позволяют существенно увеличить спектральную эффективность и производительность сетей мобильной связи. К настоящему времени зарубежные базовые станции активно перестраиваются на применение адаптивных цифровых решёток. Абонентские станции, несмотря на малый размер, снабжаются разнесёнными печатными антеннами для применения в диапазоне 2 – 6 ГГц.

На рис.2 приведён фрагмент приёмной части цифровой решётки с разделением комплексного сигнала на ортогональные составляющие. Фазовая составляющая сигнала формирует стационарно или динамически многолепестковую диаграмму направленности. Адаптивные фазированные решётки (АФАР) находят широкое применение в наземных и спутниковых сетях связи, в радиолокации и радионавигации.

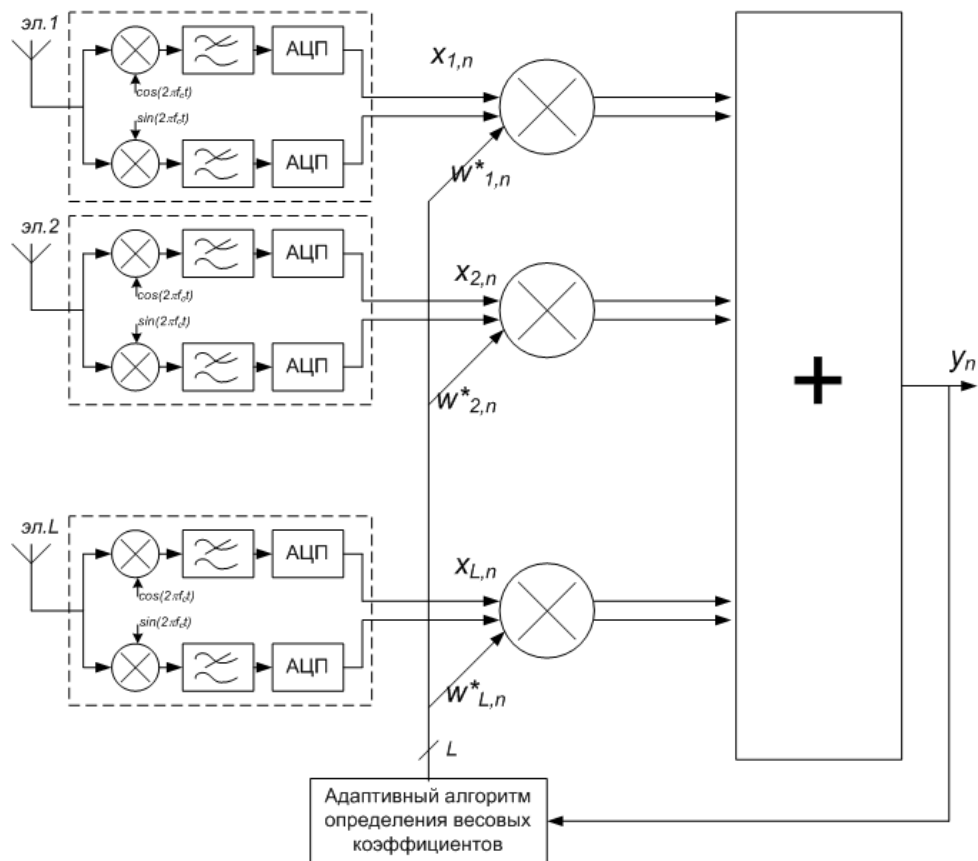


Рис.2. Фрагмент приёмной части цифровой решётки с разделением комплексного сигнала на ортогональные составляющие

Спутники связи стали оборудоваться цифровыми решётками в начале XXI века. Пионерами в этом начинании были спутники Thuraya и Inmarsat-4 [10]. В настоящее время все новые спутники связи оборудуются цифровыми решётками. На рис.3 приведена структурная схема приёмно-передающей антенной системы спутника Inmarsat-4.

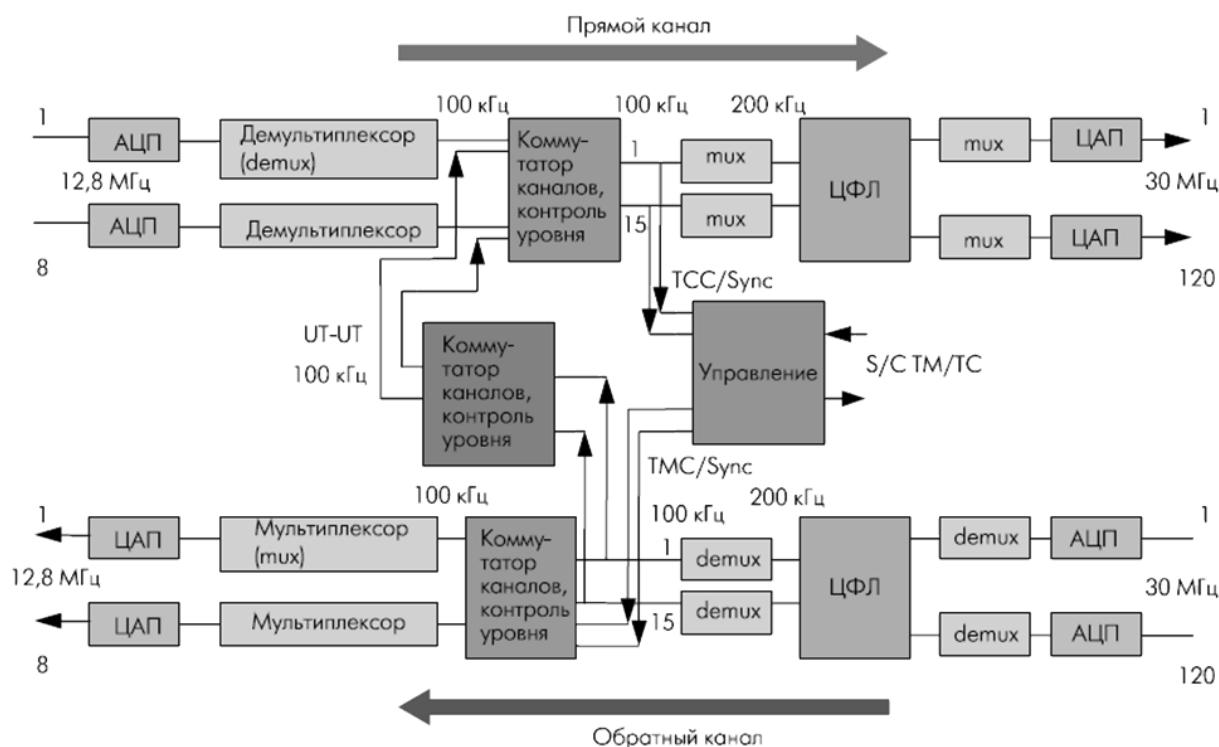


Рис.3. Структурная схема приёмно-передающей антенной системы спутника Inmarsat-4

Приёмный прямой канал «Земля – спутник» и передающий обратный канал «спутник – Земля» взаимодействуют блоком «Управление» при анализе запросов и формировании узких лучей диаграммы направленности.

Возможности цифровых антенных решёток демонстрирует японский спутник связи ETS-8, плотно покрывающий узкими лучами сложную форму территории Японии, подтверждая общую тенденцию превращения АЦАР в базовую технологию региональных систем спутниковой связи.

В целом можно отметить, что стремительное развитие теории и практики адаптивных цифровых технологий в антенных решётках является перспективным направлением в совершенствовании информационных сетей, использующих радиоканал для получения многообразной и достоверной информации.

6. Заключение

В статье обзорного характера рассмотрены принципы действия адаптивных цифровых антенных решёток и основные алгоритмы, реализующие их применение для наземной и спутниковой связи. Показаны их потенциальные возможности для совершенствования сетей связи в направлении увеличения их производительности.

Литература

1. Марпл С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990, 584 с.
2. Мозинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решётки. М.: Радио и связь, 1986, 448 с.
3. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов. М.: Радио и связь, 1989, 440 с.
4. Godara L.C. Application of antenna arrays to mobile communications. Proceedings of the IEEE, vol.85, No. 8, August 1997, pp. 1195–1245.
5. Ратынский М.В. Адаптация и сверхразрешение в антенных решётках. М.: Радио и связь, 2003, 200 с.

6. Крейнделин В.Б. Новые методы обработки сигналов в системах беспроводной связи. СПб.: Линк, 2009, 272 с.
7. Тихвинский В.О., Терентьев С.В., Высочин В.П. Сети мобильной связи LTE/LTE Advanced. М.: Медиа Паблишер, 2014, 384 с.
8. Capon J. High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis. Proceedings of the IEEE, vol.57, No.8, pp. 1408–1418.
9. Петров В.П., Шауэрман А.К. Спектральные способы оценки направления источников сигналов в адаптивных антенных решётках: Вестник СибГУТИ, №2, 2011, с. 53 – 62.
10. Слюсар В. Цифровые антенные решётки в мобильной спутниковой связи. М.: Первая милья, 2008, № 5, с. 16–20.

Статья поступила в редакцию 13.10.2014.

Петров Виктор Петрович

д.т.н., профессор кафедры мобильных сетей связи СибГУТИ (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), тел.: (383) 2698263, e-mail: petrov@mbit.ru

Spatial spectrum analysis algorithms in adaptive digital arrays

V.P. Petrov

This paper considers methods of spatial spectrum analysis of signals and interference in the formation of signals quantity and interference analysis algorithms and direction of their arrival to digital array. Comparative assessment of the resolution quality by different methods in accordance with maximum criteria of signal/(interference + noise) ratio is presented.

Keywords: spatial range, spatial resolution, adaptive digital array.