

Перспективы развития ФАР

Ключевые слова: сверхширокополосные антенные решетки, многомодовые, многоуровневые АР, диаграмма сканирования (ДС), широкоугольное сканирование, сверхбыстрое сканирование, фазовращатели (ФВ), электронные ФВ (ЭФВ), динамическое амплитуднофазовое распределение (ДАФР), «слепые пятна» ФАР, «СТЕЛС».

В статье сделана попытка, не только перечислить основные недостатки присущие классическим ФАР (хорошо известные специалистам), но, и предложить возможные пути их решения, что позволит конструировать широкополосные АР и ФАР как крупногабаритные в диапозоне частот 1-20МГц, так и миниатюрные в диапозоне 40-70 ГГц, которые на сегодняшний день являются востребованными, но не имеют эффективных способов решения. Также предложен новый способ сканирования луча в ФАР с размерами элементов больше длины волны.

Основными факторами, сдерживающими развитие информационного взаимодействия, являются системы сбора и передачи информации, то есть радиолокация и связь. При этом первая требует неуклонного увеличения скорости обзора пространства и повышения энергетического потенциала радиотехнических комплексов (РТК), а вторая – скорости передачи потоков информации. Существенного увеличения объема передаваемой информации можно добиться только за счет увеличения полосы частот (полосы пропускания) информационного канала. Основными элементами, сдерживающими развитие этого процесса, является отсутствие сверхширокополосных антенных систем (АС).

Наиболее эффективно перечисленные задачи решаются РТК с антенными системами типа фазированных антенных решеток (ФАР). Применение ФАР явилось значительным техническим достижением. Они расширили возможности РТК благодаря большой гибкости и быстроте управления положением луча в пространстве. Главным недостатком ФАР является их высокая СТОИМОСТЬ.

Как следует из графика, представленного на рис.1, антенные решетки с элементами, линейные

СУХОВЕЦКИЙ / SUHOVETSKY B.

Борис Иосифович

(Sbi3206@gmail.com)

кандидат технических наук

размеры которых больше длины волны, полностью удовлетворяют критерию «стоимость – эффективность», поскольку, по сравнению с другими типами АР, обеспечивают высокую техническую эффективность при существенно меньшей стоимости изготовления и эксплуатации. И на сегодняшний день, и на ближайшие десятилетия АР, с элементами, линейные размеры которых больше длины волны, представляются не только экономически наиболее выгодными (рентабельными), но и наиболее перспективными антенными устройствами [3] для систем телекоммуникаций и радиолокации. Представляется весьма актуальной задача совершенствования современных высокоэффективных АС[7], [6] РТК, предназначенных для сбора информации и управления космическими аппаратами в ближнем и дальнем космосе.

Учитывая, что наземный командно-измерительный комплекс всегда имел, и впредь будет иметь двойное назначение, весьма привлекательной является идея создания компактной, подвижной, универсальной сверхширокополосной АС, способной одновременно выполнять задачи приема и передачи узкополосных и широкополосных сигналов, относящихся к функционально различным, работающим в различных частотных диапазонах, подсистемам – как ныне существующим, так и создаваемым в ближайшем и в отдаленном будущем [11].

Речь может идти о перспективных антенах для систем многоканального космического телевидения и связи, систем управления космическими аппаратами, систем телеметрии, траекторных измерений и др., включая антенны для будущих систем сверхширокополосной радиолокации (систем радиолокационного сверхразрешения – радиовидения), систем импульсного радио (систем связи, не использующих несущих частот), и пр. [8].

Методы немеханического управления лучом применимые к линейным и поверхностным антенным системам (АС), которые состоят из большого числа отдельных излучателей (элементов) и формируют в совокупности луч антенной решётки (АР) [4], [5].

ИНФОКОММУНИКАЦИИ

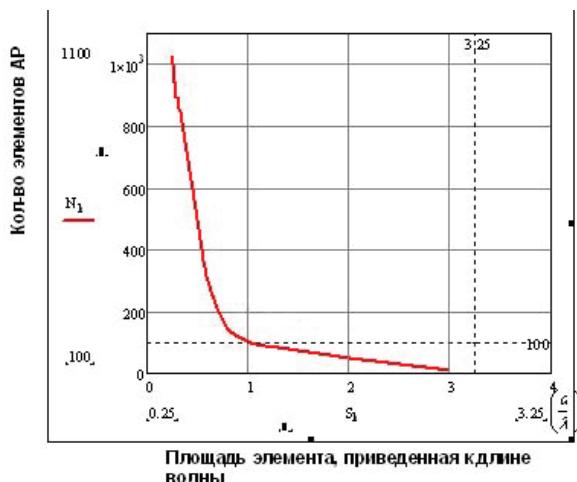


Рис. 1. Зависимость количества элементов в составе ФАР от площади исходного элемента (его линейных размеров).

Для управления лучом обычно используется система проходных фазовращателей (ФВ), включённых в фидерную систему, возбуждающую излучатели. В электрических сканирующих системах требуемый сдвиг фазы $\Delta\phi$ каждого ФВ определяется сигналом управления, величина которого должна устанавливаться с учётом индивидуальных характеристик каждого ФВ [15].

При практической реализации подобных АС приходится сталкиваться с серьезными трудностями связанными с выбором размеров элементов (обычно половина длины волны (0.5λ)) и вследствие нестабильности (особенно температурной) и неидентичности характеристик ФВ, больших потерь, нестабильности и неидентичности отражения от ФВ. Все эти факторы сохраняются и в системах дискретного управления, когда на характеристике ФВ используется только ряд рабочих точек.

Отмеченные обстоятельства существенно ограничивают размеры ФАР и значительно ухудшают (на 15-20%) их характеристики (коэффициент полезного действия, шумовую температуру, коэффициент усиления, разрешающую способность, уровень боковых лепестков (УБЛ), быстродействие), по сравнению с характеристиками аналогичных несканирующих АР.

Другим важным фактором, ограничивающим возможности ФАР, является сложность системы управления, которая возрастает с увеличением количества элементов в ее составе, (при этом уменьшается быстродействие (скорость управления)).

Современное развитие радиотехники, требующее неуклонного увеличения скорости сканирования

и увеличения размеров антенны, делает в настоящее время электрическое сканирование наиболее востребованным. Для устранения указанных недостатков в настоящее время ведутся интенсивные исследования, направленные на решение этих проблем.

Одним из направлений таких исследований (в отличии от традиционных, малоперспективных) является разработка ФАР с размерами излучателей (элементов) больше длины волны и разработкой и использованием электронных фазовращателей взамен традиционных (ферритовых, газовых, плазменных, полупроводниковых).

В совремённой радиоэлектронике широко используются интерполяционные методы в которых автоматически регулируется скорость квазипеременных процессов с целью достижения определенных фазовых соотношений между ними. Решение задачи эффективного сканирования может быть достигнуто посредством использования таких подходов [11], [12].

Известно техническое решение, описанное в патенте РФ [9], где предложена сверхширокополосная, многоуровневая АР (многомодовый элемент, «свернутый рупор», «Fold Horn», FH), которая обладает совершенно новыми уникальными свойствами, обусловленными ее конструкцией:

- в раскрыве искусственно создан набор разрывов непрерывности, которые не зависят от частоты, что способствует увеличению мощности излучения и расширению полосы пропускания;
- в апертуре (с учетом граничных условий) можно возбудить поле структуры волны любого

из распространяющихся типов волн (мод) или их суперпозицию с нужными (управляемыми) амплитудами и фазами, что обеспечивает требуемую ориентацию углового спектра (сканирование):

- система излучения является многоуровневой, элементы любого уровня (кроме нулевого) построены по одинаковой схеме. Механизм формирования структуры поля в апертуре элементов всех уровней совершенно одинаков, а отличаются они только граничными условиями. Значит, структура построения таких АС строго подчиняется принципу иерархических систем с вложенными процессами;

- период функции возбуждения амплитудно-фазового распределения (АФР) и линейные размеры исходных рупоров и излучающего раскрыва подчиняются принципу подобия, т. е. АС характеризуется пространственно-частотной (временной) периодичностью, причем время выступает не только в качестве функционального параметра, но также и в качестве параметра хронологического упорядочивания [14];

- верхняя частота ограничивается только свойствами узла возбуждения (его конструкцией), а нижняя – эффективным линейным размером излучающего раскрыва, который является пространственно протяженным;

- по способу возбуждения она может быть отнесена к дискретным структурам, а по способу формирования амплитудно-фазового распределения (АФР) к непрерывным системам.

Повысить эффективность ФАР можно посредством использования элементов с линейными размерами больше длины волны ($a \geq \lambda$). Это позволит, сохранив линейные размеры АР, а значит и ее КУ, уменьшить общее количество элементов и контуров управления фазой, упростить системы управления и фазирования, повысить быстродействие и этим снизить ее стоимость.

В таком случае решетчатая структура на базе таких многомодовых (двухуровневых) излучателей (в один из уровней системы, возбуждения, которых включен управляемый элемент (ФВ) [9]) – это совершенная многофункциональная полосковая (микрополосковая) АР, конструируемая с использованием современной технологии печатных плат, отличающаяся компактностью, малой массой, высокой технологичностью и совершенно новым свойством, а именно:

- посредством одновременного, одинакового (синхронного) изменения ориентации ДН (сканирования) F_3 каждого излучателя (элемента) в составе АР происходит изменение ориентации всех ее дифракционных максимумов (ДМ) $P_0(F_p)$,

P_{-1}, P_{+1} при этом местоположение (ориентация) побочных ДМ P_0, P_{-1}, P_{+1} относительно направления максимума ДН элемента F_3 не изменяется. При таком способе управления лучом ДН ФАР F_p не модулируется ДН элемента F_3 , а значит ей не свойственны такие недостатки как расширение ширины ДН и уменьшение величины коэффициента усиления на краю сектора сканирования, что характерно для классических ФАР. Размер сектора сканирования при этом зависит только от уровня бокового лепестка ДН элемента и уровня побочных ДМ P_{-1}, P_{+1} которые определяются отношением амплитуд и разностью фаз высших распространяющихся мод. Кроме этого возможность управление ориентацией ДН излучателя в пространстве полностью решает проблему «слепых пятен» для ФАР.

Допустим, что устройства рис. 2. идеально согласованы для структур поля (5), (6), тогда эти конструкции идеально согласованы и для волн (3), (4), связь между которыми отсутствует.

Рис.3. поясняет механизм формирования амплитудно-фазового распределения (АФР) в направляющей системе, на апертуре двухуровневой АР, возбуждаемой модами H_{10}, H_{20} :

Графики рис.4. обобщают эти свойства, где обозначены ϑ, ψ_{12} – отношение амплитуд и разность фаз мод (6) к (5) как функция P , α – разности фаз и отношения амплитуд (3), (4).

В общем случае механизм функционирования подобных структур (устройств) описывается выражениями

$$B = e^{-k\alpha \cos p}; \quad \psi_{12} = \arcsin k \alpha \sin p,$$

где k – коэффициент пропорциональности. Из графиков рис.4. следует:

1. если $P=0$

B с изменением α изменяется от 1 до 0;
 $\psi_{12}=0$ при $0 \leq \alpha \leq 1$.

2. если $P=180$

B с изменением α изменяется от 1 до ∞ ;
 $\psi_{12}=180$ при $1 \leq \alpha$

3. если $P=90, 270$

$B=1$ при любых значениях α ;
 ψ_{12} изменяется непрерывно от 0 до 180.

$\alpha = Am(3)/Am(4)$, $\Delta P = \text{фаза}(3) - \text{фаза}(4)$ – отношение амплитуд и разность фаз сигналов на входе устройства (рис. 2.).

$\vartheta = Am(H_{20})/Am(H_{10})$, $\psi_{12} = \text{фаза}(H_{20}) - \text{фаза}(H_{10})$ – отношение амплитуд и разность фаз сигналов на выходе устройств рис. 2.

ИНФОКОММУНИКАЦИИ

Многомодовый элемент

Представленные чертежи поясняют суть предлагаемого устройства:

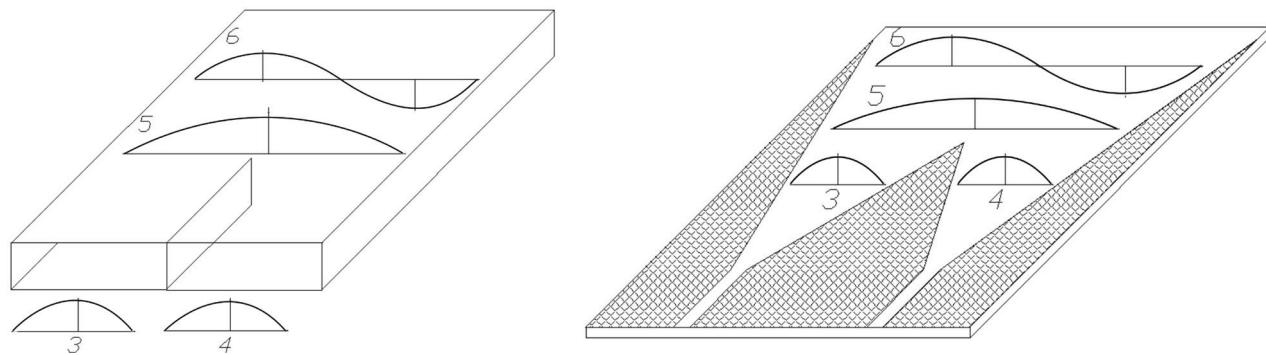


Рис. 2. Конструкция многомодового элемента (двуухровневая АР, свёрнутый рупор, FH fold - horn).

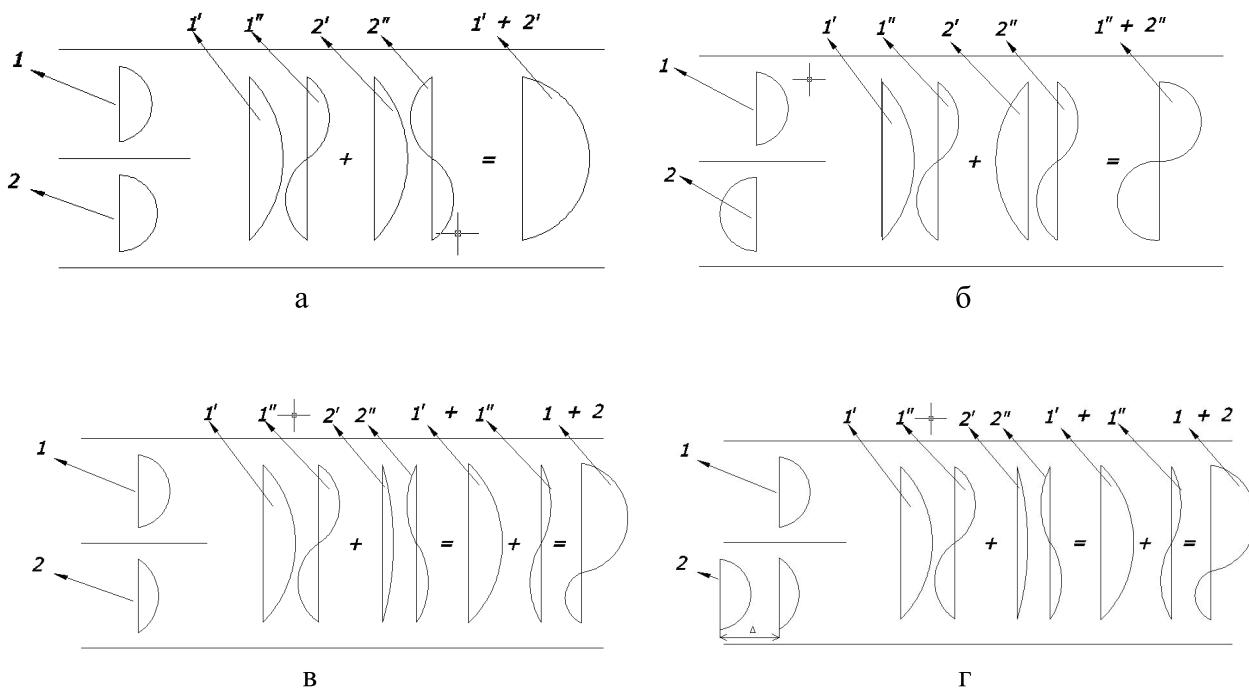


Рис.3. Механизм регулирования отношения амплитуд мод H_{10} и H_{20}

- а – равноамплитудное синфазное возбуждение
- б – равноамплитудное противофазное возбуждение
- в – неравноамплитудное синфазное возбуждение
- г – равноамплитудное несинфазное возбуждение с задержкой – Δ .

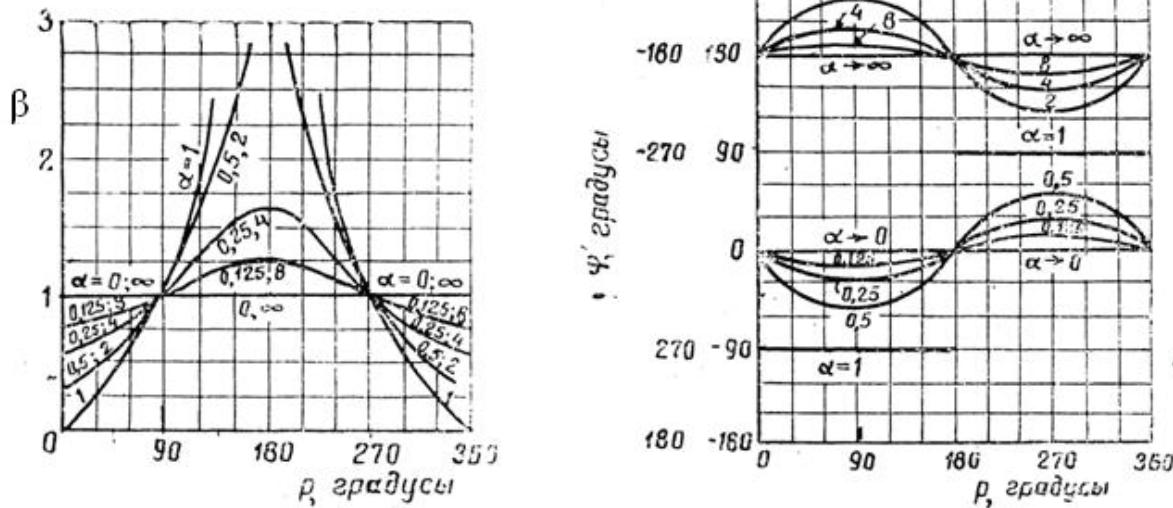


Рис. 4. Графики, характеризующие свойства двухуровневой АР.

Значит, направляющая система с линейным размером апертуры больше длины волны и несколькими входами позволяет:

- формировать динамическое АФР, реализующее как одномодовый режим четного либо нечетного типов колебаний (мод), так и их суперпозицию, она являются широкополосной в силу своих конструктивных особенностей;

- конструировать ФАР с размерами элементов больше длины волны (и даже равными некоторым длинам волн), что обеспечивает широкоугольное сканирование в секторе до 120° и решает проблему стоимости последних;

- конструировать сверхширокополосные АС с полосой частотного перекрытия более 30 и линейной фазочастотной характеристикой (ФЧХ) во всем диапазоне, которые сегодня особенно востребованы для излучения сверхкоротких импульсов большой амплитуды.

- решать вопросы фазирования элементов в составе АР на совершенно новых интерполяционных принципах, что значительно упрощает и изменяет требования к управляемым ФВ, повышает надежность их функционирования и предлагає совершенно новые методы их конструирования, позволяет использовать обычные электронные схемы синхронизации и фазирования для обеспечения сканирования [12], [13].

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ (ФАЗОВОЕ) СКАНИРОВАНИЯ

Обычно в ФАР (с размерами излучателей $a \leq \lambda$) сканирование производится посредством введения фазовых сдвигов $\Delta\varphi$ между токами, питающими отдельные

излучатели. Результирующая ДН АР представляет собой произведение ДН отдельного элемента F_α (ширина которой определяется линейными размерами этого элемента) и ДН структуры элементов, которая образует систему дифракционных ДМ P_0 , P_{-1} , P_{+1} (местоположение которых определяется расстоянием между этими элементами, а ширина – размером решетчатой структуры (длинной)). ДМ P_0 обычно называют ДН АР – F_p (рис. 5а). При этом, если $\Delta\varphi = 0$ положение максимумов ДН элемента и ДМ АР совпадают [8].

Введением фазовых сдвигов между элементами осуществляется управление положением всех ДМ в реальном и мнимом пространстве, а ДН отдельного элемента F_α , остается неподвижной и определяет ориентацию и размер сектора сканирования, диаграмму сканирования.

В процессе сканирования, $\Delta\varphi \neq 0$ ДН АР F_p перемещается вдоль кривой, описывающей ДН отдельного элемента. Сектор сканирования оказывается ограниченным за счет уменьшения КУ АР, искажения формы ДН АР и попадания побочных ДМ, P_{-1} , P_{+1} в ДН одиночного элемента. (рис. 5б).

Размер сектора сканирования и пространственное положение ДМ (угловое расстояния между ДМ) зависят от линейных размеров элемента АР и расстояния между этими элементами.

При классическом способе сканирования $a/\lambda \leq 1$ для увеличения сектора сканирования размеры элемента (a/λ) необходимо уменьшать. КУ АР зависит от ее линейных размеров (длины), для повышения КУ эти размеры необходимо увеличивать.

ИНФОКОММУНИКАЦИИ

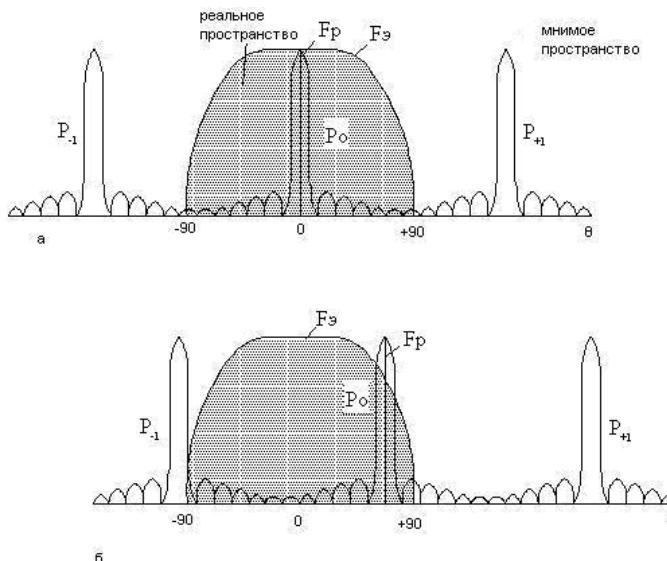


Рис.5. сканирование луча АР при $a/\lambda \leq 0,5$
а – фазовый сдвиг между элементами $\Delta\phi=0$
б – фазовый сдвиг между элементами $\Delta\phi \neq 0$

Поэтому ФАР с высокими энергетическими характеристиками и приемлемым размером сектора сканирования, (ДС) имеет в своем составе большое количество элементов (сотни, тысячи). Система управления такой ФАР является сложной, время управления большим, стоимость высокой.

Отсутствие надёжных управляемых ФВ и высокая стоимость являются основным фактором, сдерживающим широкое внедрение ФАР в настоящее время.

Повысить эффективность ФАР можно посредством использования элементов с линейными размерами больше длины волны ($a \geq \lambda$). Это позволит, сохранив линейные размеры АР, а значит и ее КУ, уменьшить общее количество элементов и контуров управления фазой, упростить системы управления, фазирования, повысить быстродействие, а значит снизить ее стоимость.

На рис.6 представлены нормированные ДН многомодового (двухуровневого) элемента для случая $\psi_{12} = 0.5\pi$, $a/\lambda = 1.2$, и $B=0; 0.5; 1; 2$. Максимумы ДН одиночного элемента имеют направления $U=0; 0.5; 1; 2$, что соответствует угловой координате $\Theta^{\circ}=0; 15; 23; 36$, а это значит что посредством перераспределения мощности между распространяющимися модами (изменения отношения амплитуд мод) можно очень эффективно управлять положением максимума ДН одиночного элемента в свободном пространстве, при этом форма ДН практически не изменяется, а уровень боковых лепестков не превышает стандартных значений; $\beta = 0$ соответствует случаю синфазного равноамплитудного, $\beta = 0.5,..2$ – неравноамплитудного синфаз-

ного, либо равноамплитудного несинфазного (с задержкой) возбуждения раскрыва (рис. 3) [10].

При размере раскрыва $a = 1.2 \lambda$ и $\beta = 0$ ширина диаграммы направленности по уровню половинной мощности $2\Theta_{0.5p} = 57,..60^\circ$. При $\beta = 0.5,..2$ максимум диаграммы направленности смещается на угол порядка $\Theta = 19^\circ,..45^\circ$, то есть более чем на половину ширины диаграммы; при этом форма ДН одиночного элемента практически не изменяется, а уровень боковых лепестков не превышает стандартных значений $-13,..-15\text{dB}$ (рис.6).

В таком случае АР сконструированная на базе таких элементов должна формировать ДН, максимум которой будет совпадать с направлением максимума ДН одиночного элемента, если в каждом из них будут установлены одинаковые значения параметра B .

Значит, посредством параметра B – отношения амплитуд распространяющихся мод, осуществляется фазирование излучателей в составе АР когда размер ее элементов больше длины волны.

Но, как следует из графиков (рис.2; 3; 4) регулирование отношения амплитуд распространяющихся мод (параметр – B) реализуется посредством изменения разности фаз (параметр – P) сигналов возбуждения элемента (излучателя) АР. Значит посредством одновременного синхронного изменения разности фаз ΔP сигналов возбуждения каждого многомодового элемента (излучателя) в АР осуществляется (реализуется) управление положением всех ДМ АР, а значит и управление ДН АР (сканирование).

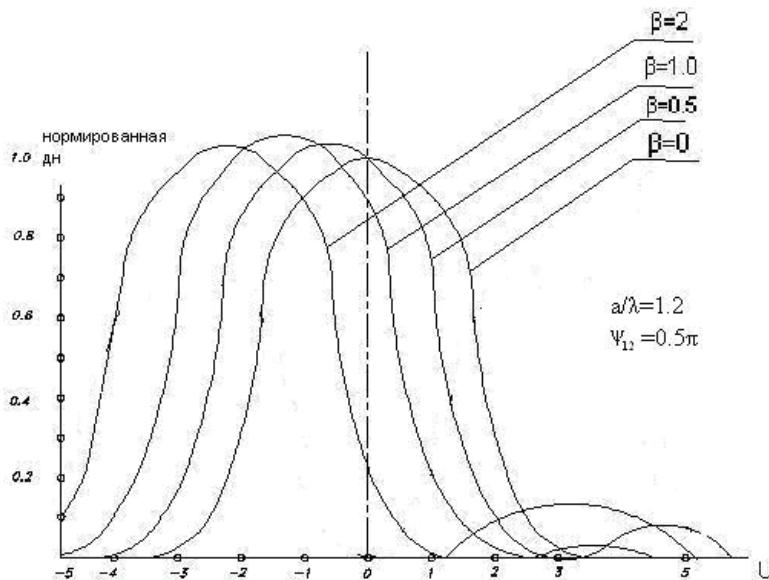


Рис. 6. ДН двухуровневой АР

Предложенные АР и способ управления лучом [10] в корне отличаются от известных способов электрического сканирования: фазового и частотного.

В отличие от последних перемещение луча в данном случае реализуется посредством синхронного изменения разности фаз между сигналами возбуждения всех многомодовых элементов (излучателей), формирующих апертуру АР.

Необходимо подчеркнуть, что разность фаз между сигналами возбуждения для всех элементов устанавливается одинаковая, а не посредством изменения разности фаз $\Delta\varphi$ между соседними элементами, как это делается в классических АР с электрическим (фазовым) сканированием.

Поскольку механизмы управления лучом АР при размере элемента больше длины волны совершенно другой, значит и требования предъявляемые к элементам управления (ФВ) должны быть другими, другим должен быть и способ задания разности фаз между сигналами возбуждения излучателя АР.

(см. графики рис. 4). А это значит, что для обеспечения электрического сканирования луча ФАР с размерами элементов больше длины волны, возможно, использование других интерполяционных методов, которые широко применяются в обычных электронных схемах синхронизации и фазирования [12],[13].

При изменении разности фаз (см. рис. 4) между сигналами возбуждения на каждом элементе происходит одинаковое и синхронное изменение АФР на их апертуре (устанавливаются другие соотношения между амплитудами распространяю-

щихся мод – параметр $P-\text{var}$). ДН всех элементов в составе АР одновременно (синхронно) изменяют свою ориентацию в пространстве, и это приводит к изменению направления максимума ДН АР. Скорость установки местоположения луча в пространстве зависит только от скорости установки АФР на одиночном элементе и никак не зависит от размера раскрыва всей АР, что характерно для АР с фазовым и частотным сканированием луча.

ДС АР с двухуровневыми рупорными излучателями изображена на рис. 7 и представляет собой огибающую диаграмм напряженности двухуровневого элемента для различных значений параметра $-B$ (рис. 6).

Линейная АР имеющая в своем составе 20 многомодовых (двухуровневых) элементов с $a/\lambda = 1.2$, $\psi_{12} = 0.5\pi$, $B \leq 2$ формирует ДН с шириной луча порядка $2\Theta_{0.5p} = 3^\circ$. И обеспечивает сектор обзора (ДС) по полной мощности $2\Theta_{1p} = \pm 45^\circ (90^\circ)$ при УБЛ $\leq -20 \dots -30$ дБ, и по половинной мощности $2\Theta_{0.5p} = \pm 60^\circ (120^\circ)$ при УБЛ $\leq -13 \dots -15$ дБ.

На рис. 8 представлены графики характеризующие зависимость размеров сектора сканирования (обзора), (диаграммы сканирования) от линейных размеров элементов в составе ФАР и уровня боковых лепестков.

ФАЗОВРАЩАТЕЛИ ДЛЯ ФАР

Фазовращатели ФАР различаются на ферритовые, газовые (плазменные) и полупроводниковые. В

ИНФОКОММУНИКАЦИИ

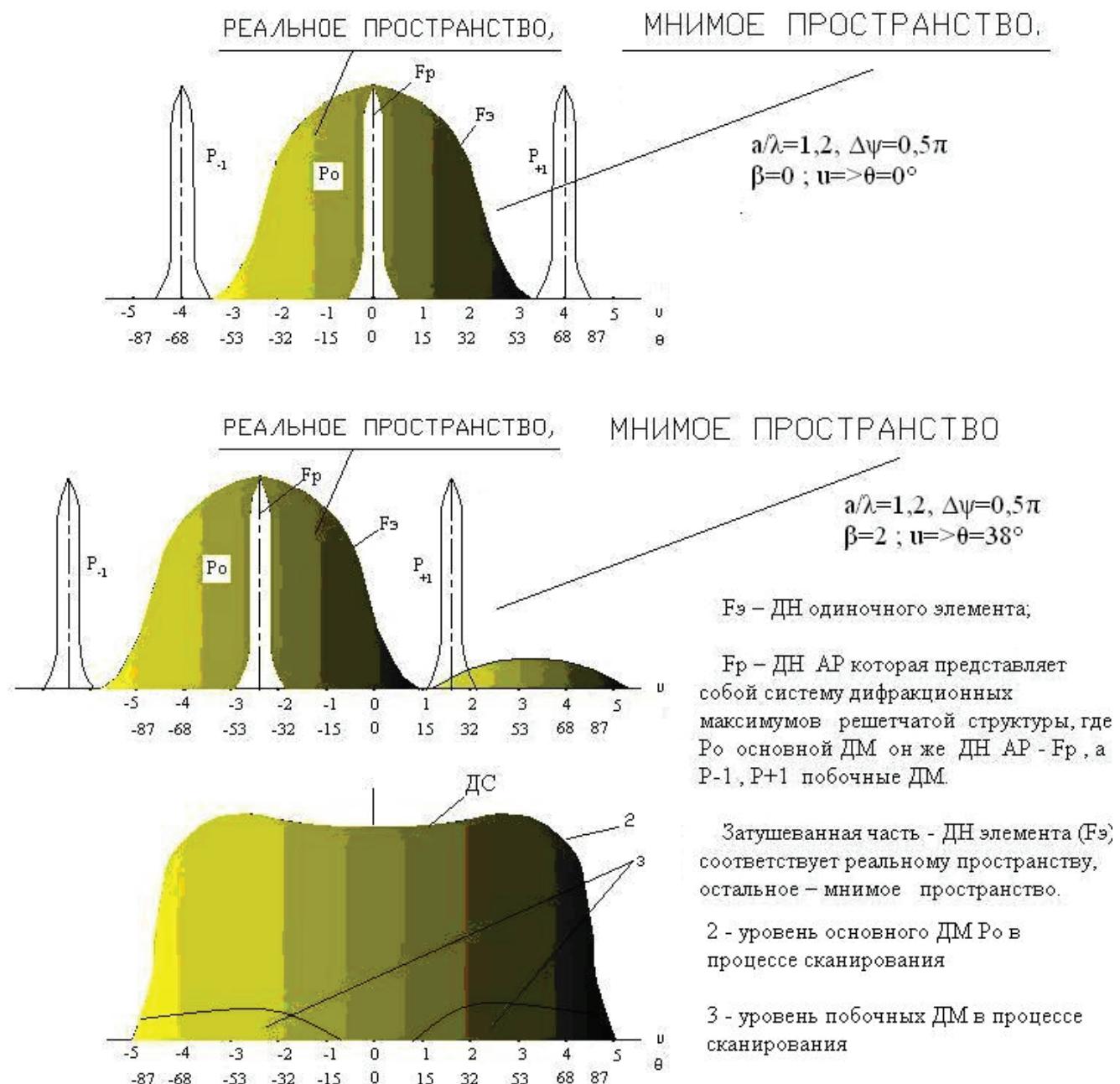


Рис. 7. Сканирование луча АР и механизм формирования сектора обзора (ДС)

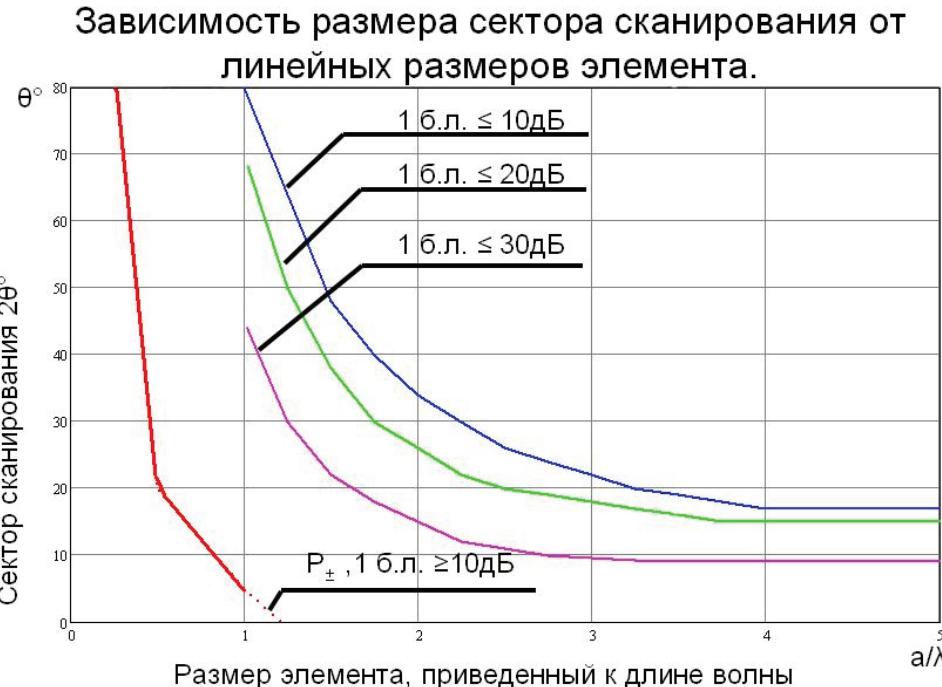


Рис. 8.

ферритовых фазовращателях используется для поворота фазы поля изменение магнитной проницаемости феррита под действием управляющего магнитного поля. Они позволяют получить как плавное, так и дискретное изменение фазы в пределах 360° . Их характеристики сильно зависят от температуры, частоты и в меньшей степени от величины пропускаемой мощности. Постоянная времени ферритового фазовращателя имеет порядок $10^{-9} - 10^{-10}$ с/с. Размеры фазовращателей близки к нескольким длинам волн в продольном направлении и к половине длины волн в поперечном. Затухание в них составляет примерно 1 дБ в трехсантиметровом диапазоне волн при большой пропускаемой мощности. Ферритовые фазовращатели к настоящему времени разработаны лучше других типов и находят наибольшее применение, несмотря на ряд отмеченных недостатков, в частности на сравнительно большую мощность управления и габариты.

В газовых (плазменных) фазовращателях для переключения фазы используются газовые разрядники, которым свойственны значительные потери. Они непригодны для приемных антенн из-за большого уровня шумов, а для передающих – из-за малой пропускаемой мощности (находят ограниченное применение).

Полупроводниковые элементы находят применение в дискретных фазовращателях и коммутаторах. Для коммутации используется изменение параметров полупроводникового элемента под действием приложенного напряжения. Полупроводниковые коммутаторы имеют потери, близкие к потерям в ферритовых фазовращателях, а их постоянная времени близка к 10^{-11} т. е. они обеспечивают большую скорость сканирования по сравнению с ферритовыми. Полупроводниковые коммутаторы имеют значительно меньшие размеры, чем ферритовые, и поэтому имеют лучшие перспективы, чем ферритовые. Однако в настоящее время отсутствуют достаточно надежные полупроводниковые коммутаторы и пропускаемая ими мощность невелика [15].

Электромеханическое и электрическое сканирование лучом антенной системы (АС) в широком диапазоне углов осуществляется с помощью системы механических или электрических управляемых фазовращателей, включенных определенным образом в волноводно-фидерный тракт АС. Они вносят в тракт значительные потери высокочастотной мощности, являются источником фазовых и амплитудных ошибок в раскрытии антенны, ограничивают пропускаемую мощность. Отражения от ФВ увеличивают дисперсионность тракта и сущ-

ИНФОКОММУНИКАЦИИ

ственно затрудняют настройку АС. Кроме этого электрические ФВ характеризуются большими тепловыми потерями, неидентичностью образцов, тепловой и временной нестабильностью. Всё это значительно ухудшает характеристики ФАР (коэффициент полезного действия, шумовую температуру, коэффициент усиления (КУ), разрешающую способность, уровень боковых лепестков (УБЛ), быстродействие) по сравнению с характеристиками аналогичных не сканирующих АС.

Современное развитие техники, требующее неуклонного увеличения скорости обзора пространства, делает в настоящее время электрическое сканирование наиболее востребованным. Для устранения присущих ему недостатков ведутся интенсивные исследования. Одним из таких направлений (в отличии от традиционных, малоперспективных) является разработка ФАР с размерами излучателей (элементов) больше длины волн и использованием электронных фазовращателей (ЭФВ) взамен традиционных (ферритовых, полупроводниковых, газовых, плазменных).

Внедрение новых перспективных методов конструирования ФАР с размерами элементов больше длины волн, патент РФ [9] и способа сканирования посредством изменения отношения амплитуд высших распространяющихся мод [10] позволяет применять совершенно новые подходы к разработке и конструированию электронных управляемых ФВ [11]. Разработка электронных ФВ, которые по своим электрическим характеристикам не уступают существующим, но работают на совершенно других принципах, позволяет устранить целый ряд недостатков, которые присущи классическим ФАР (стоимость, слепые пятна, широкоугольное сканирование при ограниченном количестве элементов, уменьшение количества ФВ, скорость управления, быстродействие, сверхсканирование, сверхразрешение по угловым координатам и др.).

В радиоэлектронике нашли широкое применение устройства, в которых автоматически регулируется скорость квазипериодических процессов с целью достижения определенных фазовых соотношений между ними. Техническое решение такой задачи часто достигается посредством системы фазовой подстройки частоты (ФАПЧ) [13], [14].

На рис. 9 приведена структурная схема электронного ФВ (ЭФВ) и фрагмент антенной решетки, излучатели которой представляют двухуровневые элементы с линейными размерами больше длины волны и входами А, Б. Предлагаемый ЭФВ отличается от известных [16] тем, что он реализован в виде двухуровневой системы ФАПЧ, которая состоит из петли синхронизации и петли фазирования и содержит:

- 1, 1а, 1б – эталонный, ведомый и подстроочный генераторы,
- 2 – направленный ответвитель (НО),
- 3 – эталонная нагрузка,
- 4, 4а – фазовый детектор (ФД),
- 5, 5а – устройство управления, (устройство подстройки (УП)),
- 6 – генератор фазы (ГФ).
- А, Б – входы двухуровневого излучателя (элемента) АР.

Петли синхронизации и фазы представляют собой типовые схемы ФАПЧ, которые дополнены эталонной нагрузкой и генератором фазы.

Нагрузкой генераторов 1а, 1б является АС, входное сопротивление которой всегда является комплексным, поэтому нестабильным. С целью уменьшения влияния этой нестабильности эталонный генератор 1 нагружен на эталонную нагрузку 3, которая является активной.

Колебания частоты $\omega_{\text{эт}}$ и $\omega_{\text{вед}}$ эталонного и ведомого генераторов 1, 1а подаются на вход ФД 4. На выходе ФД формируется сигнал ошибки пропорциональный разности фаз сигналов генераторов 1, 1а, который подаётся на вход УП 5, формирующего сигнал корректирующий эту расстройку.

Стационарный режим в системе (петля синхронизации) соответствует условию

$$(\omega_{\text{эт}} - \omega_{\text{вед}}) = \Delta\omega = 0. \quad \varphi = \varphi_{\text{эт}} + \int_0^t (\omega_{\text{эт}} - \omega_{\text{вед}}) dt$$

Начальная фаза генератора 1 $\varphi_{\text{эт}}$ неизвестна, но она является одинаковой для генераторов 1, 1а. Сигнал частоты $\omega_{\text{вед}}$ с начальной фазой $\varphi_{\text{эт}}$ через направленный ответвитель 2 поступает на вход ФД 4а петли фазирования и на вход А двухуровневого излучателя (элемента) АР.

В петле фазирования, кроме типовых элементов системы ФАПЧ введен генератор фазы (6), который вырабатывает сигнал фазовой расстройки $\Delta\varphi$ поступающий на вход ФД 4а. На выходе ФД 4а формируется сигнал пропорциональный требуемой величине расстройки ($\omega_{\text{вед}} - \omega_{\text{под}} = \Delta\omega \neq 0$) и подаётся на вход УП (5а), формирующего сигнал, посредством которого генератор (1б) отрабатывает требуемую разность фаз φ_{1a1b} . Сигнал частоты ω_{1b} с начальной фазой φ_{1a1b} через направленный ответвитель 2 поступает на вход Б излучателя.

Стационарный режим в системе (петля фазирования) соответствует условию

$$(\omega_{\text{вед}} - \omega_{\text{под}}) = \Delta\omega \neq 0, \\ \varphi_{1a1b} = \varphi_{\text{эт}} + \int_0^t (\omega_{\text{вед}} - \omega_{\text{под}}) dt$$

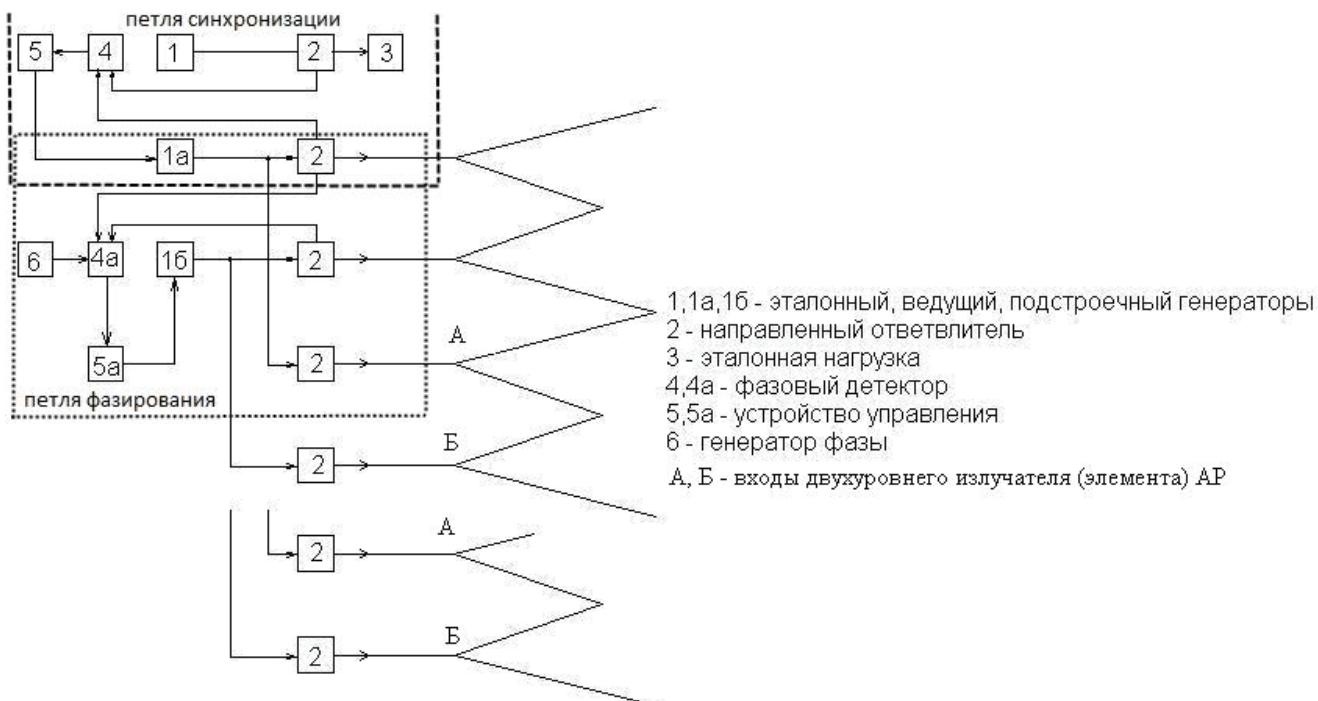


Рис. 9.

На основании полученной разности фаз между сигналами возбуждения излучателя на его раскрыве (апerture) формируется требуемое АФР, которое определяет пространственную ориентацию максимума ДН отдельного элемента АР. Если на каждый элемент АР подать заданную разность фаз, то ориентация максимумов ДН всех элементов синхронно (одновременно и одинаково) изменится, а это приведет к изменению ориентации и результирующего луча АР (сканированию луча, см. рис. 7).

Таким образом, ЭФВ формирует и синхронно обрабатывает требуемую разность фаз сигнала возбуждения для каждого элемента и тем самым осуществляет электрическое сканирование луча АР. Значит, при описанном способе управления не требуется «ждать», когда будет сформировано амплитудно-фазовое распределение на всей апертуре АР, а это позволяет значительно сократить время фазирования апертуры, а значит увеличить скорость сканирования, то есть реализовать сверхсканирование.

ЭФВ не вносит никаких дополнительных искажений в тракт АС и обладает высоким быстродействием. Требования, которые должны предъявляться к ЭФВ определяются только свойствами многоуровневых (многомодовых) элементов АР. Ограничения на ширину полосы пропускания отсутствуют, а диапазон изменения разности фаз не превышает величины $0 \dots \pm 30^\circ$.

На предлагаемых принципах с использованием ЭФВ довольно просто можно конструировать как пассивные, так и активные ФАР, как приемные, так и передающие. ЭФВ не накладывают никаких дополнительных ограничений на энергетику ФАР и она избавлена от перечисленных выше недостатков [16]. Кроме этого, предложенная конструкция ЭФВ в принципе позволяет возбуждать все элементы ФАР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная технология конструирования многофункциональных сверхширокополосных антенных решеток на принципах многоуровневых и многомодовых структур, в которых размеры элемента больше длины волны. На сегодняшний день эта технология является одной из перспективных разработок, которая позволяет:

1. Использовать новый способ сканирования и избавиться от некоторых «старых болезней» радиолокации и связи:

- проблемы «СТЕЛСА»,
- проблемы «слепых пятен» ФАР,
- проблемы широкоугольного сканирования;
- проблемы разработки надежных, широко-полосных управляемых ФВ;
- проблемы высокой стоимости ФАР.

2. Разработать компактные переносные мощные излучатели (генератор+антенна) сверхкоротких

ИНФОКОММУНИКАЦИИ

импульсов длительностью $10^{-9} \dots 10^{-11}$ с (сверхширокополосные сигналы) с высокой концентрацией потока мощности в заданном направлении, для решения вопросов борьбы с терроризмом. (антитеррор).

3. Конструировать перспективные многофункциональные АС и радиотехнические комплексы, которые позволяют довольно просто обеспечить одновременное функционирование нескольких радиолиний различных частотных диапазонов на одну АС, легко поддаются модернизации и постепенному наращиванию своих мощностей, и одновременно решают проблемы взаимного влияния и помехозащищенности, что значительно снижает их эффективную отражающую поверхность. Кроме этого предложенный подход многомодовых структур позволяет довольно просто освоить конструирование миниатюрных сверхширокополосных АР в диапазоне до 50 – 70 ГГц, а также крупногабаритные АР в длинноволновом диапазоне 1–20 МГц.

Литература

1. Суховецкий Б.И., Суховецкая С.Б. Широкополосная антенна. Патент РФ2052878 с приоритетом от 01.04.1993 г.
2. Суховецкий Б.И., Суховецкая С.Б. Широкополосная антenna решетка. Патент РФ2052877 с приоритетом от 01.04.1993 г.
3. Суховецкий Б.И., Суховецкая С.Б. Телевизионная приемная антenna. Патент РФ2098897 с приоритетом от 05.1996 г.
4. Р. Мейлукс. Теория и техника фазированных антенных решеток // ТИИЭР т.70 №3, 1982. — С. 5-62.
5. Д. Родес. Основные принципы теории поверхностных антенн. // ТИИЭР т.52 №9, 1964. — С. 1035-1094.
6. Суховецкий Б.И. Плоская ФАР на базе многомодовых излучателей. Вопросы радиоэлектроники, общие вопросы радиоэлектроники (ОВР), выпуск 2, 1991. — С. 96-98.
7. Суховецкий Б.И. Многофункциональная антenna система. Вопросы радиоэлектроники, техника телевидения, выпуск 1, 2008. — С. 5-12.
8. Суховецкий Б.И. Широкоугольное сканирование. Вопросы радиоэлектроники, техника телевидения, выпуск 2, 2008. — С. 69-75.
9. Суховецкий Б. И. Широкополосная антenna решетка, Патент РФ № 2407118 с приоритетом от 27.11.2009 г, БИМП № 35, 20.12. 2010 г.
10. Суховецкий Б.И. Заявка № 2011135131 от 22.08.2011 г. Способ электрического качания луча. Решение ФИПС о выдаче патента 13.11.12 г.
11. Суховецкий Б.И. Заявка № 2012114274 от 11.04.2012 г. Электронный фазовращатель. Решение ФИПС о выдаче патента 13.01.2013 г.
12. Суховецкий Б.И. Сверхширокополосные АР с элементами, линейные размеры которых больше длины волны. Вопросы радиоэлектроники, техника телевидения, выпуск 2, 2011. — С.50-61.
13. Левин В.А. Стабилизация дискретного множества частот, Энергия. — М.: 1970. — С. 270-295.
14. Шахгильдян В.В, Ляховкин А.А. Системы фазовой автоподстройки частоты, «Связь». — М.: 1972. — С. 362-375.
15. Пригожин. И, Стенгерс И. Время Хаос Квант. М.Эдиториал УРСС, 2000г. — С 240.
16. Дерюгин Л.Я. Сканирующие антенны СВЧ, Машиностроение 1964. — С. 177-195, 217-240.

И информируем читателей, что в статье «**Экспресс-метод получения профиля показателя преломления оптического волокна**», опубликованной в №3-4 от 2012 была допущена ошибка. Авторами статьи являются Илья Владимирович Попов, аспирант Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики и Антон Сергеевич Супрун, аспирант, заместитель декана факультета Инфокоммуникационных технологий НИУ ИТМО. Редакция приносит свои извинения за возможно возникшие неудобства.