

УДК 629.7.066, 621.396.67

Перспектива использования фазированных антенных решеток в бортовых антеннах глобальной спутниковой сотовой связи

Зинин Е.Д., Мельников Г.А., Милосердов А.С.*

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

**e-mail: miloserdovas@mail.ru*

Аннотация

Проанализированы возможности применения фазированных антенных решеток (ФАР) в качестве антенных систем глобальной спутниковой связи. Получены результаты, на основе которых построены ключевые зависимости между коэффициентом избыточности и уровнем интерференционных боковых лепестков. Анализируя зависимости, авторы показывают, что использование ФАР в качестве антенных систем глобальной спутниковой сотовой связи приводит к неоправданному увеличению массо-габаритных и энергетических характеристик таких антенн.

Ключевые слова: фазированная антенная решетка, глобальная спутниковая связь, апертурный излучатель, интерференционный боковой лепесток, коэффициент избыточности, минимальное количество излучателей, диаграмма направленности.

Введение

Глобальная спутниковая сотовая связь основана на использовании искусственных спутников Земли в качестве ретрансляторов. Спутники находятся на геостационарной орбите (ГСО) радиус которой 42157 км относительно центра

Земли. В зоне видимости спутника должна находиться половина Земного шара. К бортовым антенным системам глобальной спутниковой сотовой связи (ССС), расположенным на космических аппаратах (КА) с геостационарной орбитой обычно предъявляются достаточно жёсткие требования по величине коэффициента усиления (КУ) и пространству обзора бортовых антенн, которое представляет собой конус вращения с углом при вершине $8,7^\circ$. Рельеф КУ в пределах этого сектора при заданных ограничениях на габаритные размеры антенны должен быть приближен к столбообразному виду.

Возможным способом решения этой задачи является использование сканирующих фазированных антенных решеток (ФАР) [1]. Применение ФАР в бортовых ССС позволяет к тому же повысить пропускную способность каналов связи и осуществить гибкую адаптацию к возможным помехам. Однако ФАР в данном случае имеет и значительные недостатки, связанные с неоправданно большим числом излучателей и, как следствие, ухудшением весовых, стоимостных и энергетических характеристик.

В данной работе проведена оценка перспективности и целесообразности использования ФАР в качестве бортовой антенной системы спутниковой связи. При этом в качестве основного параметра и характеристики ФАР при анализе этой задачи был выбран коэффициент избыточности K (превышение количества излучателей в ФАР по сравнению с минимально возможным) и его зависимость от уровня интерференционных боковых лепестков.

Подобные задачи частично рассматривались в ряде работ [2]. В настоящей

статье более детально рассмотрены зависимости коэффициента избыточности в бортовой ФАР ССС от уровня возникающих интерференционных боковых лепестков для различных типов апертурных излучателей в ФАР и структуры апертуры ФАР.

Основные соотношения и результаты

Рассмотрим ФАР с плоской прямоугольной апертурой размером $L_x \times L_y$.

Пусть каждый из излучателей ФАР имеет прямоугольную апертуру с размерами $d_x \times d_y$, взаимное расположение излучателей соответствует прямоугольной сетке (рис.1), а количество излучателей по оси ОХ (N_x) и ОУ (N_y)

одинаковое, т.е. $N_x = L_x/d_x = N_y = L_y/d_y = n$. Тогда общее число

излучателей $N = N_x N_y = n^2$:

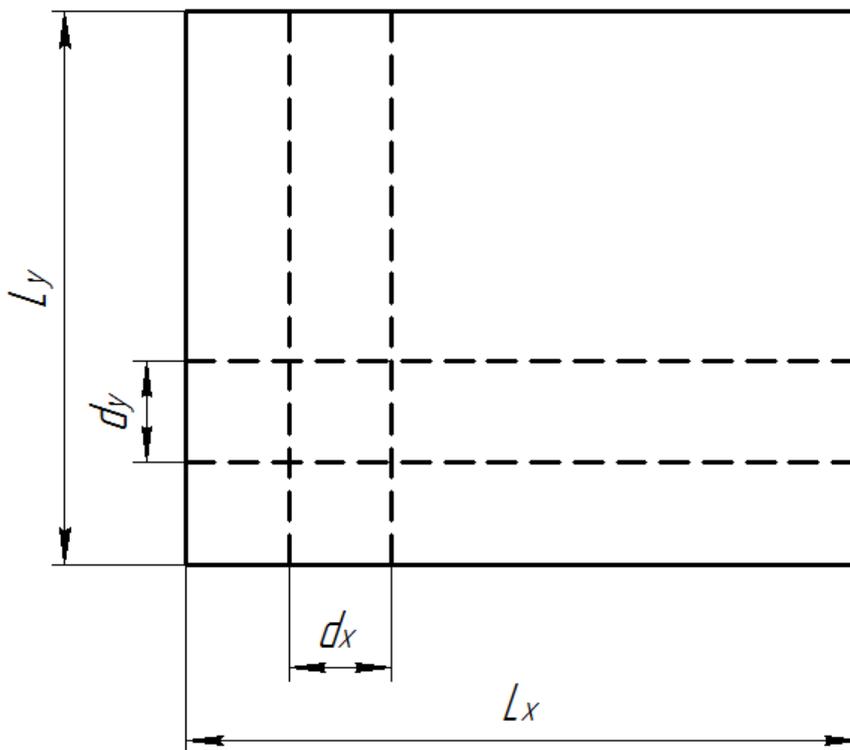


Рис.1

Обозначим через $G_1(\theta, \varphi)$ коэффициент усиления одиночного излучателя в направлении (θ, φ) , определяемый с учетом взаимодействия и потерь на отражение. Предположим, что все излучатели имеют одинаковый КУ. Тогда КУ всей ФАР определяется как:

$$G(\theta, \varphi) = \sum_{m=1}^{n^2} G_m(\theta, \varphi) = n^2 G_1(\theta, \varphi) = NG_1(\theta, \varphi) \quad (2)$$

Предположим, что в качестве отдельного излучателя используется «синфазный» пирамидальный рупор с волной типа H_{10} . Тогда КУ отдельного излучателя:

$$G_1(\theta, \varphi) = 0.81 \frac{dx dy 4\pi^2}{\lambda^2} F_1^2(\theta, \varphi) (1 - |\Gamma_1|^2) \quad (3)$$

где $F_1(\theta, \varphi)$ – ДН рупорного излучателя по полю, Γ_1 – коэффициент отражения.

В главных плоскостях $ZOX(\varphi = 0)$ и $ZOY(\varphi = \pi/2)$ ДН согласованного рупорного излучателя имеет вид:

$$F_1(\theta, \pi/2) = \frac{1 + \cos \theta \sin \left(\frac{kd_x}{2} \sin \theta \right)}{2 \frac{kd_x}{2} \sin \theta}, \quad (4)$$

$$F_1(\theta, 0) = \frac{1 + \cos \theta \cos \left(\frac{kd_y}{2} \sin \theta \right)}{2 \left(1 - \left(\frac{2}{\pi} \frac{kd_y}{2} \sin \theta \right)^2 \right)}. \quad (5)$$

Предположим, что фазовое распределение по излучателям ФАР – линейное, соответствующее отклонением максимуму ДН на угол θ_0 в плоскости $\varphi = 0$ или в плоскости $\varphi = \pi/2$. Тогда ДН ФАР в рассматриваемых плоскостях определяется

соотношением:

$$F\left(\theta, \frac{\pi}{2}\right) = \frac{1 + \cos \theta \sin\left(\frac{kd_x}{2} \sin \theta\right) \sin\left[\frac{nk d_x}{2} (\sin \theta - \sin \theta_0)\right]}{2 \frac{kd_x}{2} \sin \theta n \sin\left[\frac{kd_x}{2} (\sin \theta - \sin \theta_0)\right]}, \quad (6)$$

$$F(\theta, 0) = \frac{1 + \cos(\theta) \cos\left(\frac{kd_y}{2} \sin(\theta)\right) \sin\left[\frac{nk d_y}{2} (\sin(\theta) - \sin(\theta_0))\right]}{2 \left[1 - \left(\frac{2}{\pi} \frac{kd_y}{2} \sin(\theta)\right)^2\right] n \sin\left[\frac{kd_y}{2} (\sin(\theta) - \sin(\theta_0))\right]} \quad (7)$$

Воспользуемся выше приведенными соотношениями для оценки необходимого числа излучателей ФАР. Наиболее сложная ситуация с точки зрения возникновения побочных интерференционных максимумов в рассматриваемой структуре АР возникает в плоскости $ZOX(\varphi = 0)$. Поэтому дальнейшие расчеты проведем для этой плоскости.

При требуемом КУ ФАР в направлении $(\theta_0, 0)$, $G(\theta_0, 0) = G(0,0) \cos \theta_0$, где $G(0,0) = G_0$ – КУ в направлении нормали, необходимое число излучателей с квадратным раскрытием $d_x = d_y = d$ в рассматриваемой ФАР определяется соотношением:

$$N_{\text{ФАР}} = \frac{G_0(\theta_0, 0)}{G_1(\theta_0, 0)} = \frac{G_0 \cos \theta_0}{0,81 \frac{4\pi}{\lambda^2} d_x d_y F_1^2(\theta_0, 0)} = 0,196 \frac{G_0 \cos \theta_0}{\left(\frac{d}{\lambda}\right)^2 F_1^2(\theta_0, 0)} \quad (8)$$

С другой стороны, известно, что количество излучателей может быть уменьшено за счет соответствующего выбора ширины и формы ДН отдельного излучателя. Так в предположении формирования столообразной ДН в пределах телесного сектора сканирования $\Omega_{\text{обв}}$ и при требуемой величине КУ G , минимальное количество излучателей определяется соотношением:

$$N_{min} = \frac{\Omega_{обз}}{4\pi} G . \quad (9)$$

Учитывая, что для случая глобальной спутниковой связи сектор обзора $\Omega_{обз}$ связан с величиной θ_0 выражением $\Omega_{обз} = 2\pi[1 - \cos(\theta_0)]$, из (9) получаем:

$$N_{min} = \frac{\Omega_{обз}}{4\pi} \cdot G = \frac{G[1 - \cos(\theta_0)]}{2} \quad (10)$$

Введем понятие коэффициента избыточности излучателей в ФАР K . Он определяется отношением количества элементов в рассматриваемой ФАР к минимальному количеству излучателей в ФАР. Сравнивая выражения (8) и (10) и полагая что $G = G_0 \cos\theta_0$, можно найти выражение для коэффициента избыточности излучателей K в ФАР из слабонаправленных излучателей по сравнению с рассматриваемой ФАР:

$$K = \frac{N_{ФАР}}{N_{min}} = \frac{0.196}{\left(\frac{d}{\lambda}\right)^2 F_1^2(\theta_0, 0)(1 - \cos\theta_0)} \quad (11)$$

Как следует из (11) коэффициент избыточности K зависит от сектора сканирования θ_0 и размеров отдельного излучателя d/λ , уменьшаясь с увеличением d/λ , и не зависит от требуемого КУ ФАР.

Необходимо определить целесообразный интервал изменения d/λ . Как известно, для ненаправленных (или слабонаправленных) излучателей допустимое расстояние между соседними излучателями ограничено условием отсутствия побочных главных максимумов в ДН. Так для квадратной сетки расположения излучателей при условии, что уровень интерференционного бокового лепестка

примерно равен -13.2 дБ, т.е. уровню основного бокового лепестка при равномерном распределении в ФАР, расстояние d/λ выбирается из выражения:

$$d/\lambda = \frac{1}{1 + \sin \theta_0} \quad (12)$$

С другой стороны, максимально допустимая величина раскрыва рупорного излучателя с квадратным раскрывом зависит от границы сектора сканирования θ_0 и определяется из условия, чтобы ширина ДН отдельного излучателя $2\theta_{0.7}$ была бы равна или превышала величину равную $2\theta_0$:

$$2\theta_{0.7} \geq 2\theta_0 \quad (13)$$

Учитывая, что в рассматриваемом случае $2\theta_{0.7} = 51d/\lambda = 17.4^\circ$, получаем:

$$d/\lambda \leq 2.93 \quad (14)$$

С учетом соотношений (12), (13), (14) находим разумные границы интервала для коэффициента избыточности в рассматриваемой ФАР при $\theta_0 = 8.7^\circ$:

$K=23.6$ для слабонаправленных излучателей;

$K=2.9$ для излучателей с минимально допустимой шириной ДН для заданного сектора сканирования.

Для излучателей с произвольной величиной раскрыва d/λ зависимость коэффициента избыточности $K_{от} d/\lambda$, рассчитанная по соотношению (11), представлена на рис.2.

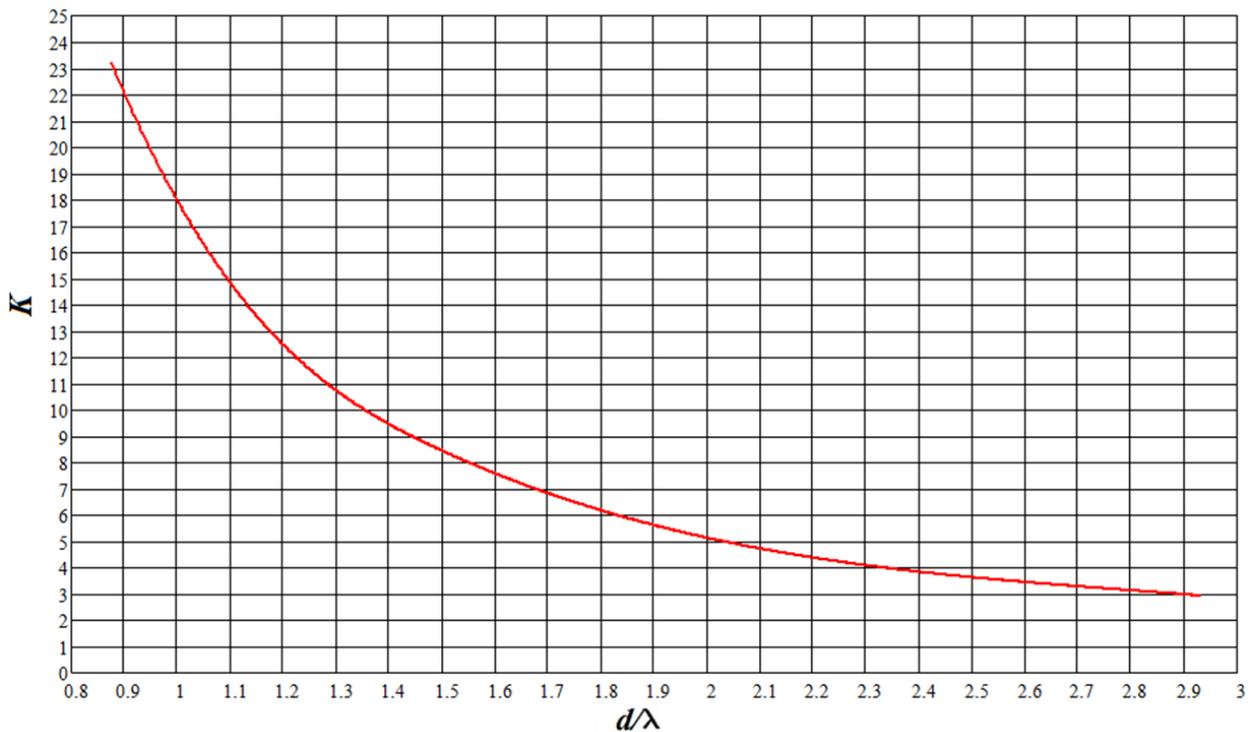
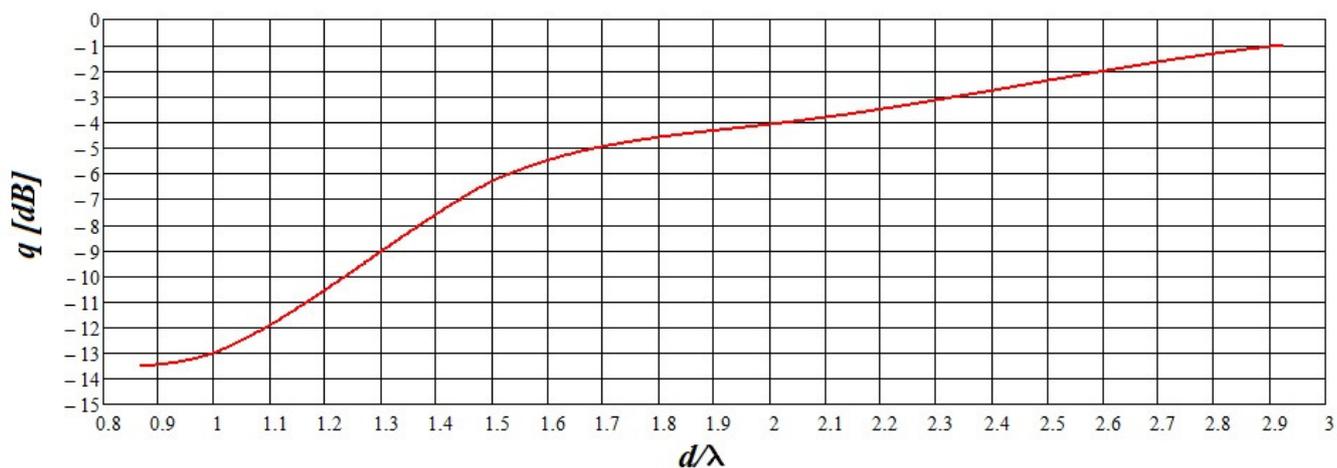
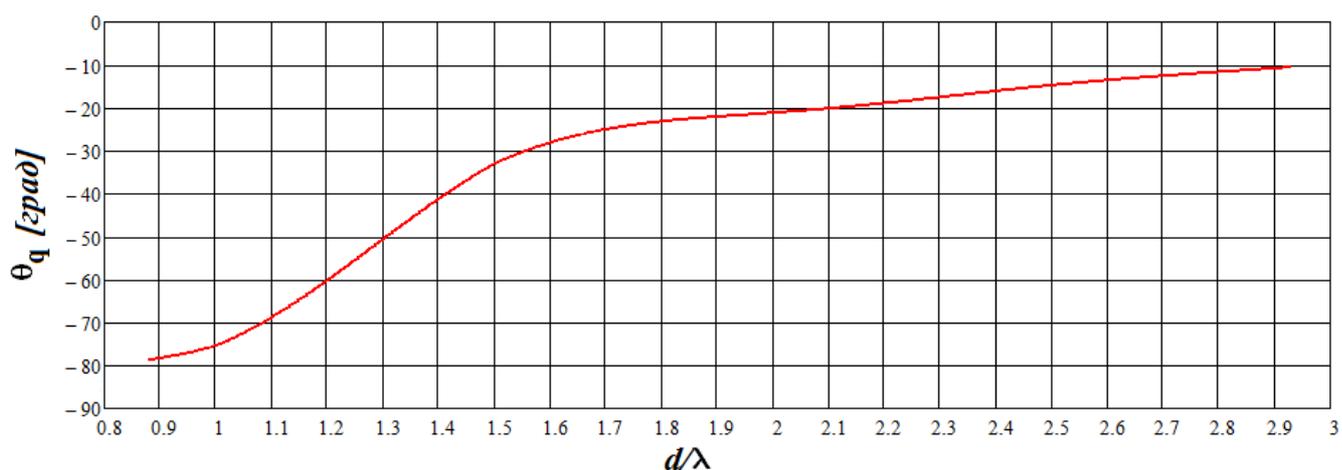


Рис.2

Понятно, что с увеличением шага решетки(в данном случае размера апертуры излучателя d/λ) в ДН ФАР возникают побочные интерференционные максимумы. С использованием соотношения (6) (т.к. побочные максимумы возникают в данном случае в плоскости XOZ)была рассмотрена зависимость уровня наибольшего интерференционного бокового лепестка η и его угловой координаты θ_0 от d/λ . Соответствующие кривые этих зависимостей приведены на рис. 3(а,б). Как следует из кривых на рис.3, хотя интерференционный максимум в интервале $0.87 \leq d/\lambda \leq 2.93$ и не попадает в сектор обзора $\pm 8.7^\circ$, их уровень может быть значительным и существенно превышать уровень обычных боковых лепестков ФАР.



а) Зависимость уровня интерференционного максимума q от расстояния между излучателями для ФАР с квадратной апертурой из квадратных элементов с равномерным расположением излучателей



б) Зависимость уровня интерференционного максимума от расстояния между излучателями для ФАР с квадратной апертурой из квадратных элементов с равномерным расположением излучателей

Рис. 3

С использованием кривых на рис. 3 и рис. 2, была рассчитана зависимость коэффициента избыточности K рассматриваемого типа ФАР от уровня интерференционного максимума q . Эта зависимость представлена на рис. 4.

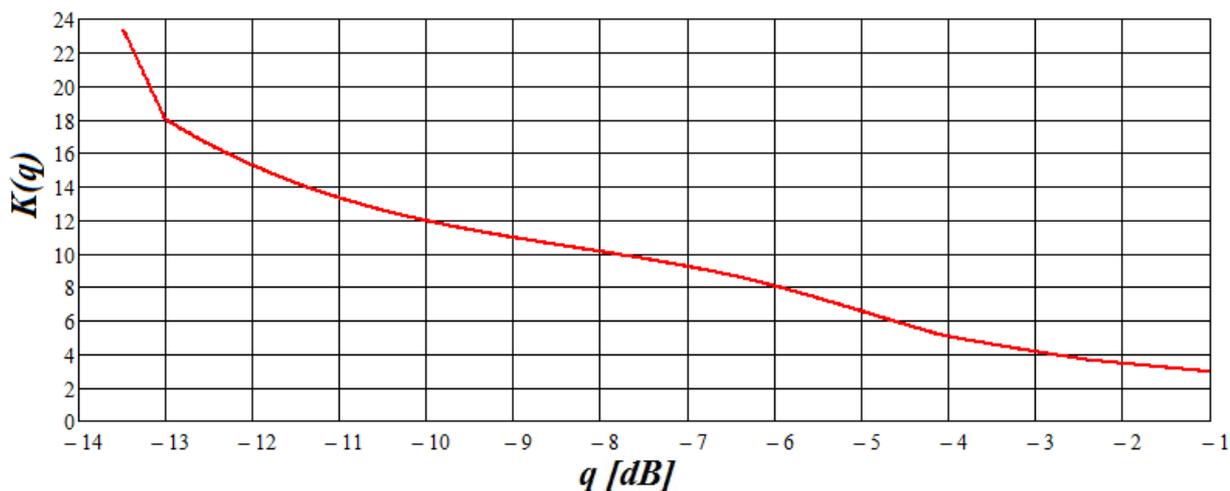


Рис.4. Зависимость коэффициента избыточности K от уровня интерференционного максимума q для ФАР с квадратной апертурой из квадратных элементов с равномерным расположением излучателей.

Рассматривались также аналогичные характеристики для решетки из квадратных и круглых(конических) рупоров с гексагональной сеткой размещения облучателей(рис.5).

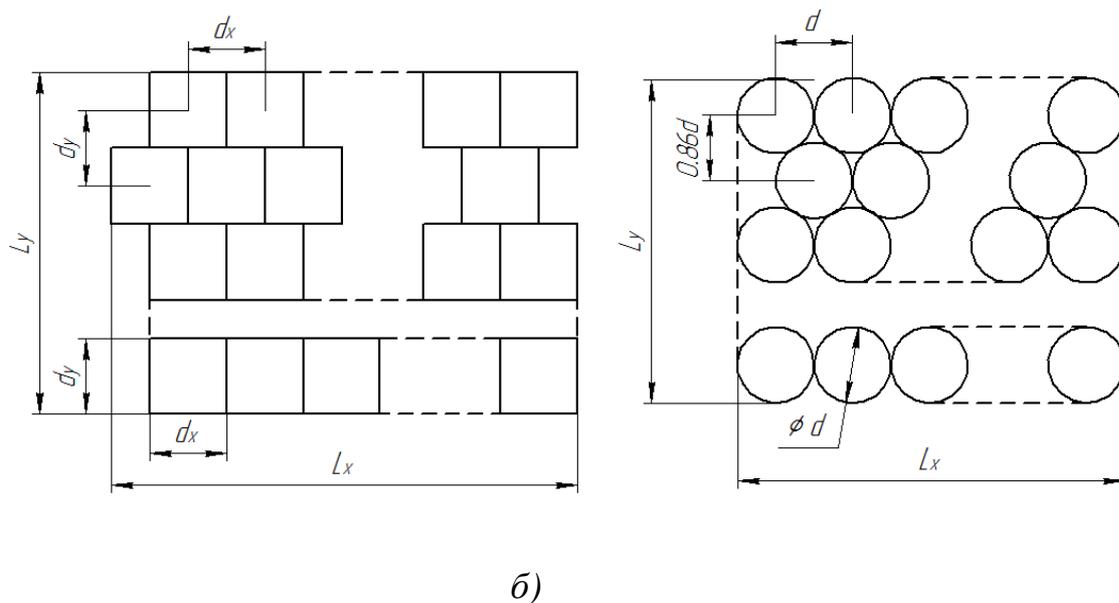
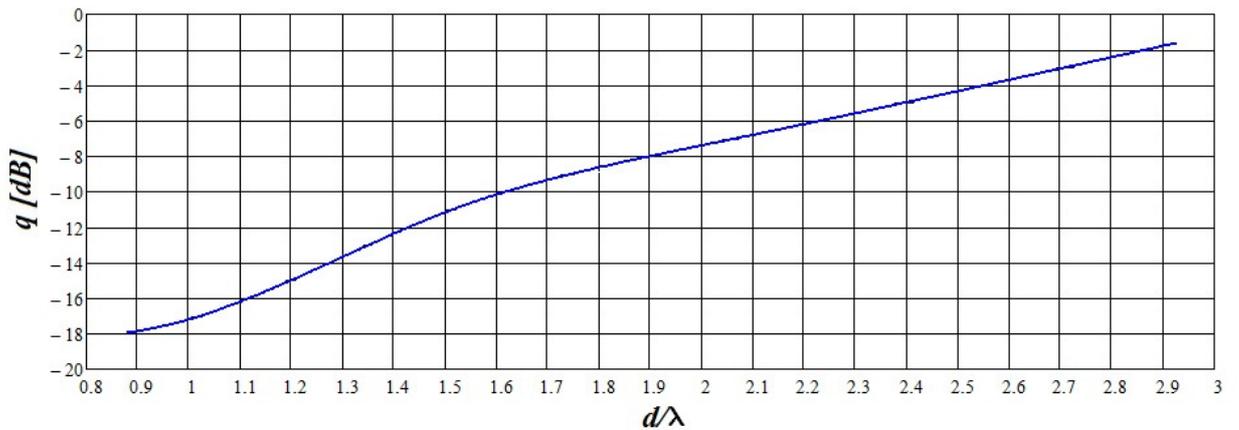


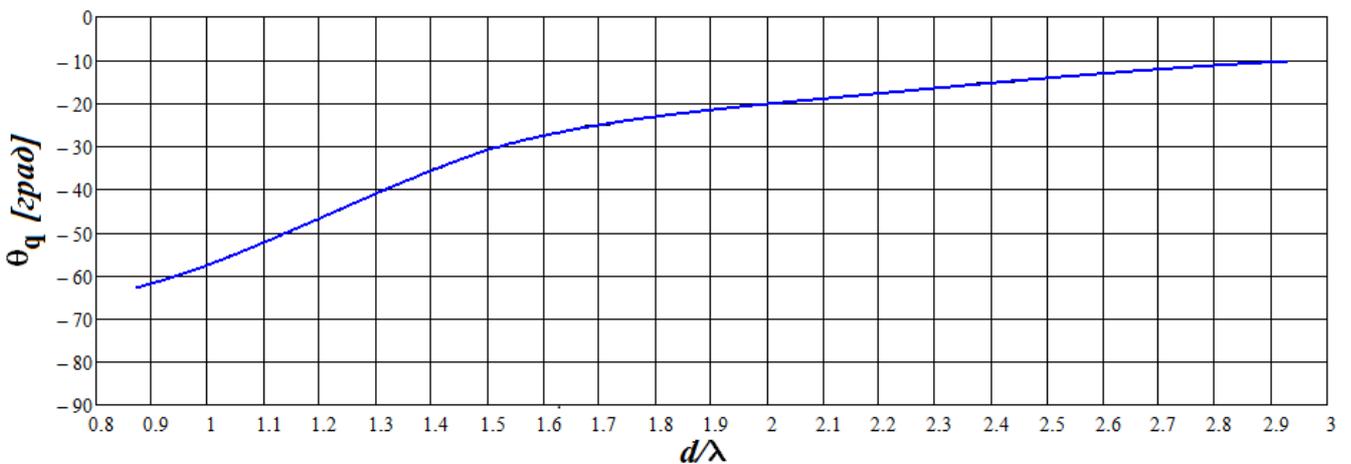
Рис.5. Решетки из пирамидальных(а) и конических(б) рупоров с гексагональной

сеткой размещения облучателей.

Как известно, гексагональная сетка расположения излучателей позволяет уменьшить уровень интерференционных боковых лепестков в плоскости ZOX. На рис.б(а,б,в,г) представлены зависимости, аналогичные зависимостям, показанным на рис. 3 для наибольшего уровня интерференционного бокового лепестка.

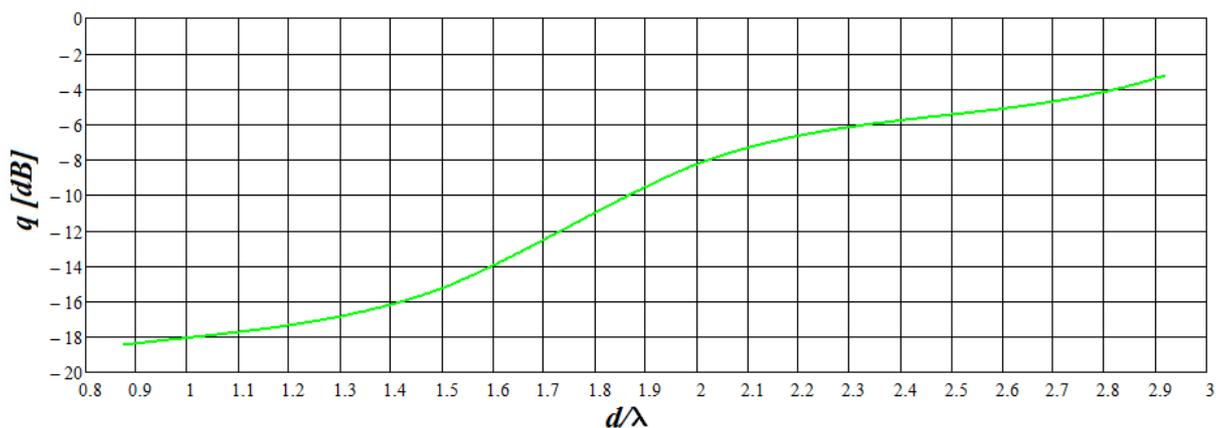


а) Зависимость уровня интерференционного максимума q от расстояния между излучателями для ФАР с квадратной апертурой из квадратных элементов с расположением их по гексагональной сетке.

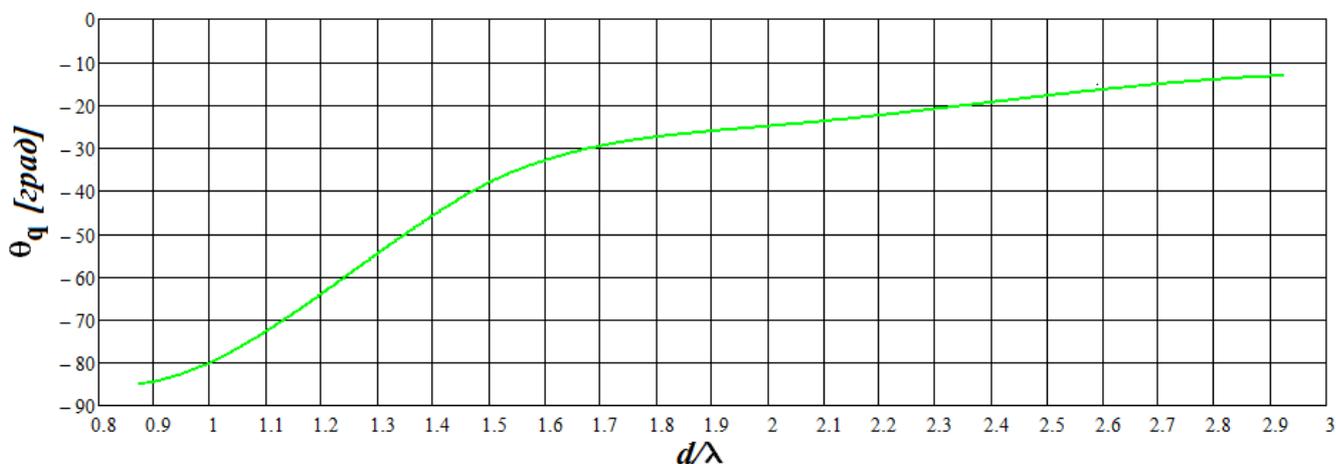


б) Зависимость положения интерференционного максимума от расстояния

между излучателям для ФАР с квадратной апертурой из квадратных элементов с расположением их по гексагональной сетке.



в) Зависимость уровня интерференционного максимума q от расстояния между излучателям для ФАР с квадратной апертурой из круглых элементов с расположением их по гексагональной сетке.



г) Зависимость положения интерференционного максимума от расстояния между излучателям для ФАР с квадратной апертурой из круглых элементов с расположением их по гексагональной сетке.

Рис.6.

На рис. 7 показана зависимость коэффициента избыточности от уровня интерференционного максимума для ФАР с гексагональной сеткой расположения

излучателей.

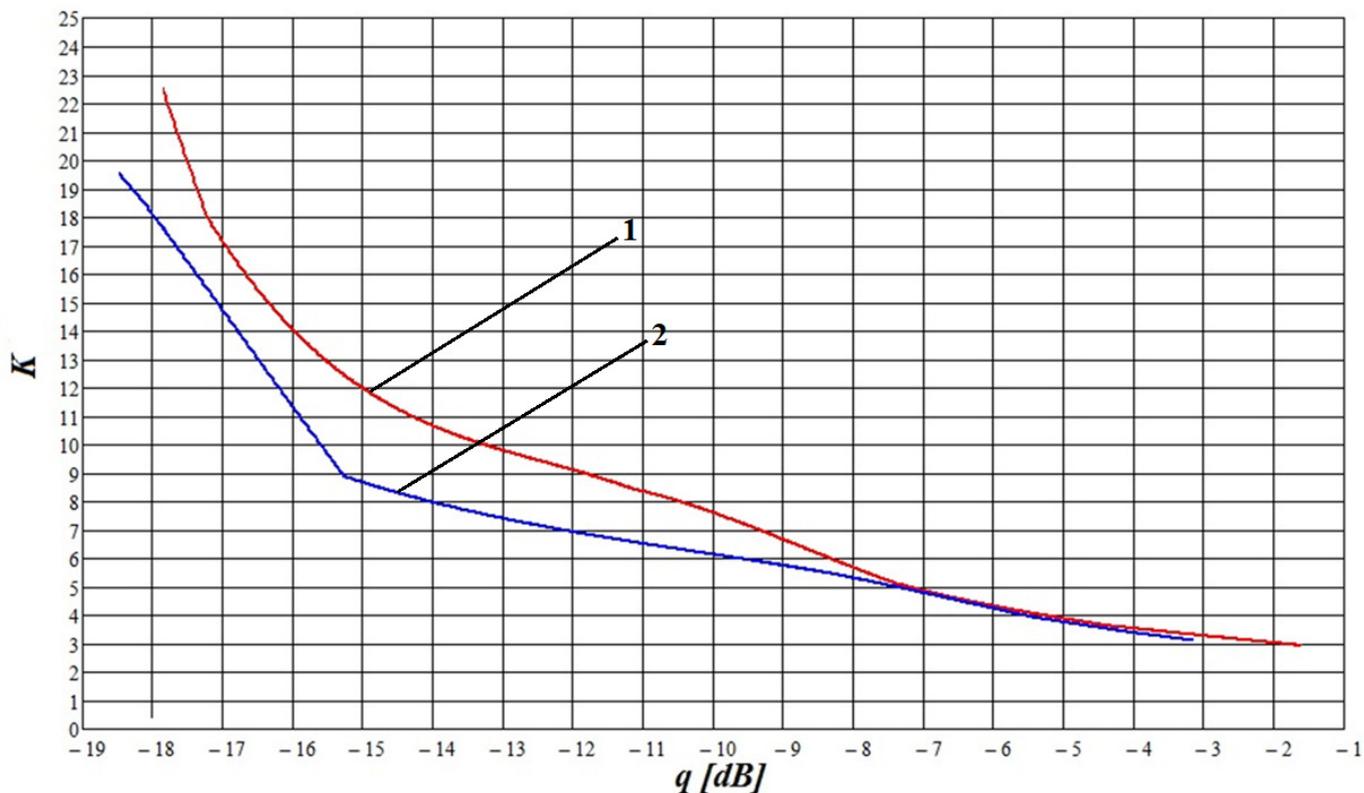
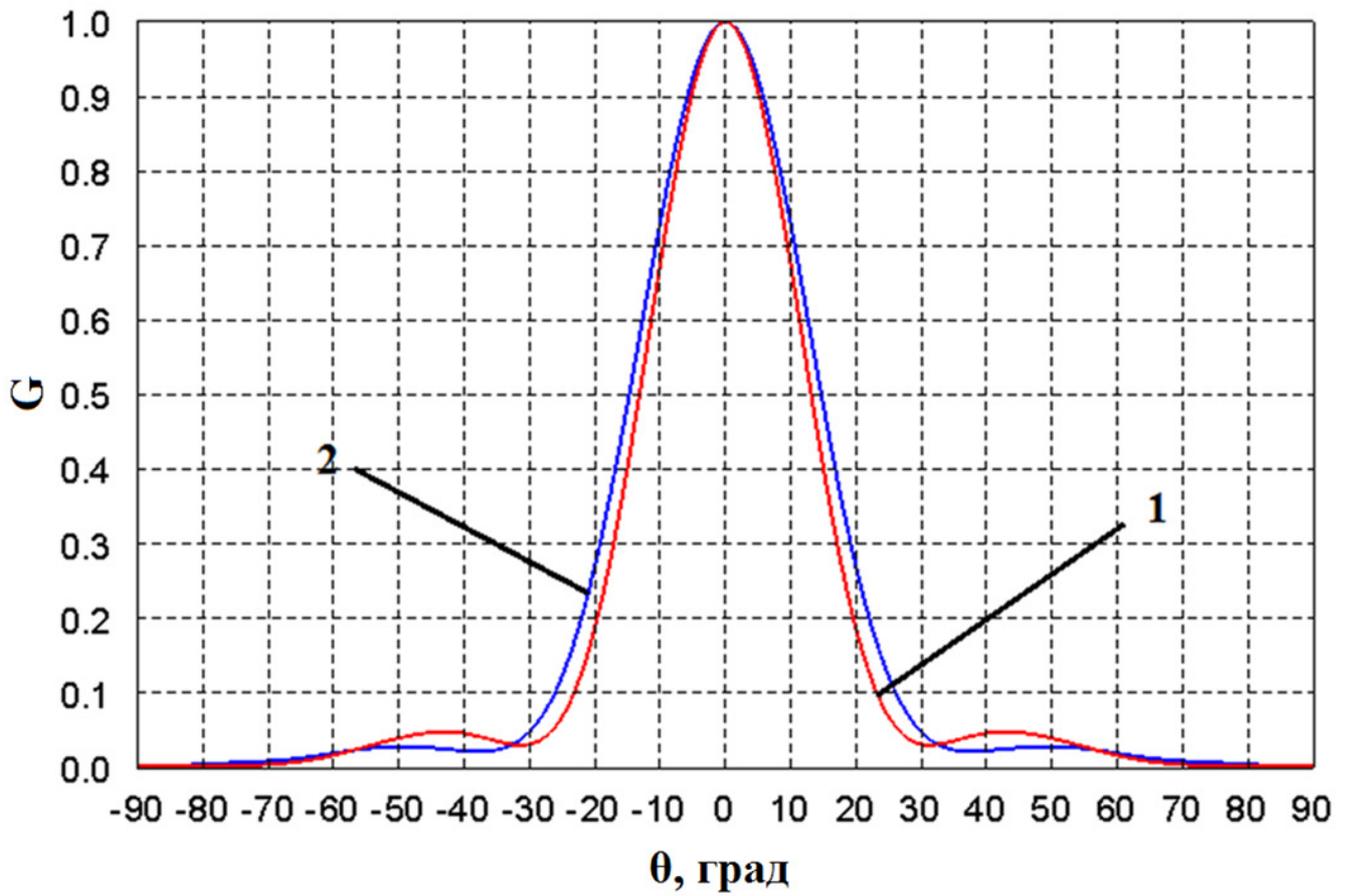


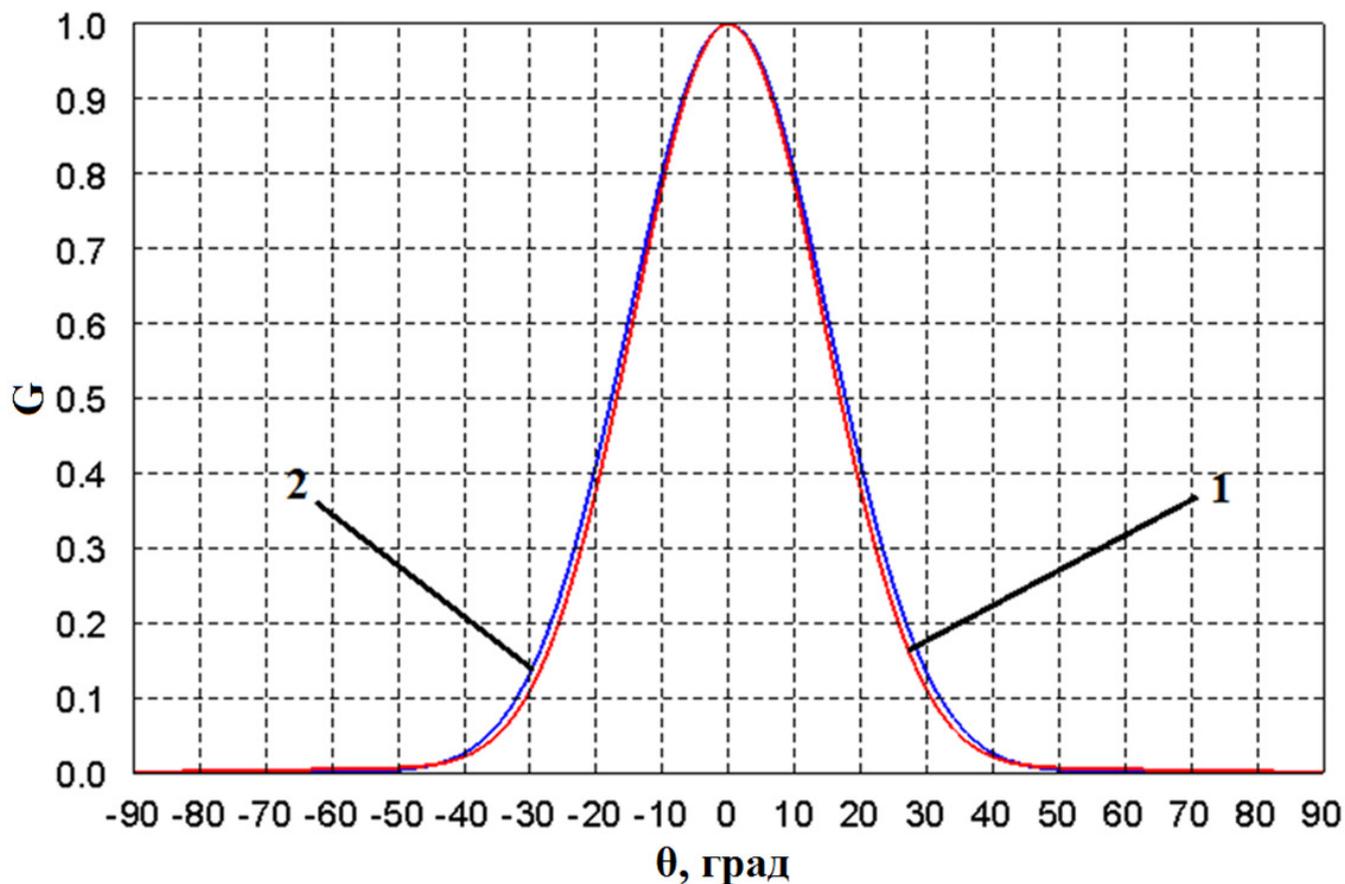
Рис.7.Зависимость коэффициента избыточности K от уровня интерференционного максимума q .1 - для ФАР с квадратной апертурой из квадратных элементов с расположением их по гексагональной сетке;2 -для ФАР с квадратной апертурой из круглых элементов с расположением их по гексагональной сетке.

При моделировании АР из конических рупоров предполагалось, что в этих рупорах возбуждалась волна H_{11} . При этом КУ и ДН отдельного рупорного излучателя рассчитывается более точно с помощью программного пакета FEKO. На рис. 8 показан пример найденной путем электродинамического моделирования диаграммы направленности в плоскостях XOZ и YOZ конического рупора с диаметром раскрыва 2λ .

Для сравнения на рис.8 приведены ДН квадратного синфазного рупорного излучателя с $d=2\lambda$.



a)



б)

Рис. 8. Диаграммы направленности квадратного(1) и конического(2) рупора(в масштабе нормированного КУ) с диаметром раскрыва 2λ в плоскости XOZ (а) и YOZ (б).

Как видно, различия в форме ДН у пирамидальных и конических рупоров и приводят к различиям зависимостей K от q для ФАР, состоящей из этих излучателей(рис.7).

Сравнение зависимостей, приведенных на рис.4 и рис.7 показывает, что гексагональное размещение излучателей позволяет уменьшить коэффициент избыточности в бортовых ФАР. Дальнейшего снижения коэффициента избыточности можно достичь в ФАР с круглой апертурой, образованной из конических рупорных излучателей. Количество излучателей N_b круглой апертуре ФАР подчиняется

определенной закономерности и может быть 7, 19, 37 и т.д. Пример структуры такой ФАР из 19 излучателей показан на рис. 9. На рис. 10 показаны зависимости уровня интерференционного максимума q , его положения и коэффициента избыточности от расстояния между элементами.

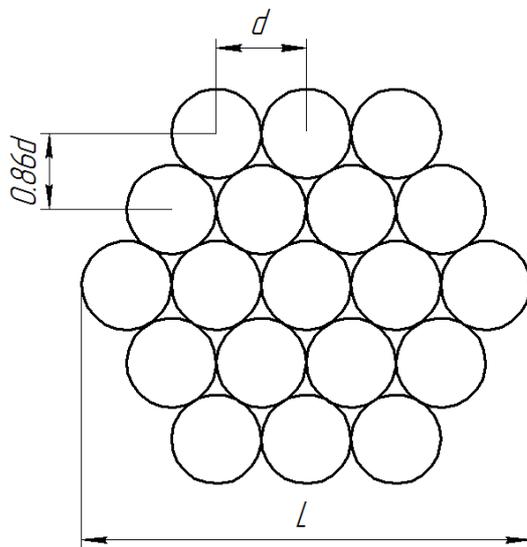
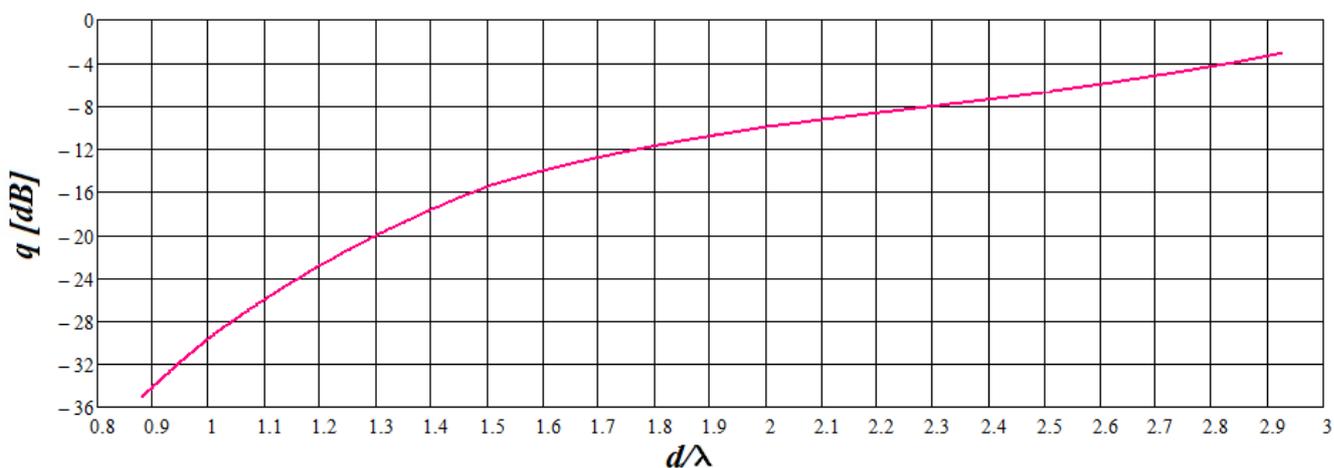
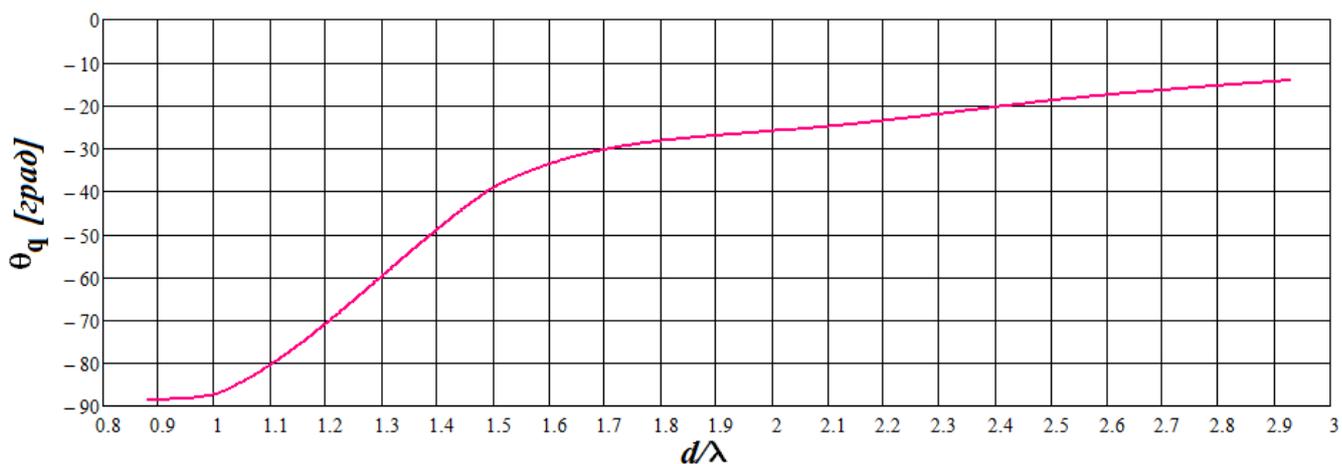


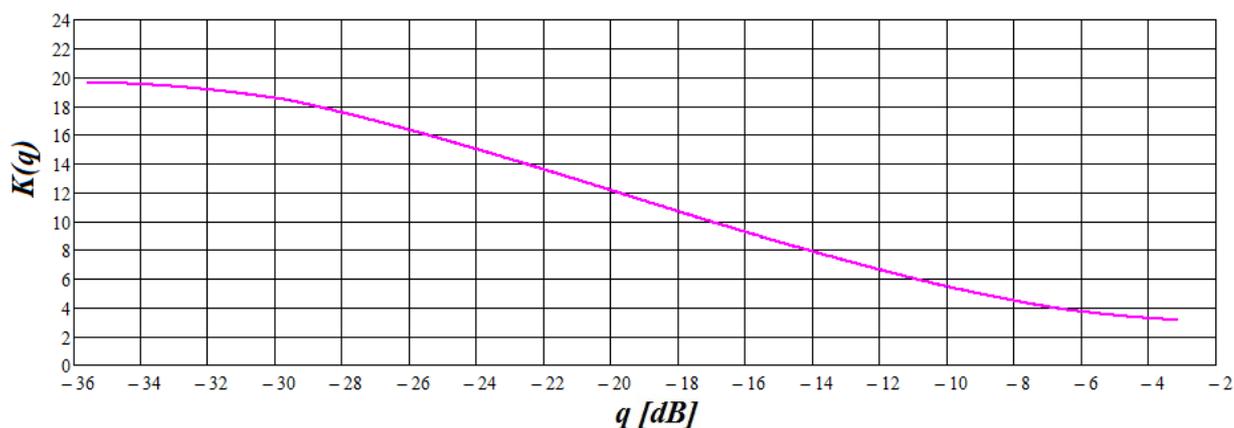
Рис. 9. Структура круглой ФАР из 19 элементов.



а) Зависимость уровня интерференционного максимума q от расстояния между излучателям для круглой ФАР из круглых элементов с равномерным расположением излучателей.



б) *Зависимость положения интерференционного максимума от расстояния между излучателям для круглой ФАР из круглых элементов с равномерным расположением излучателей.*



в) *Зависимость коэффициента избыточности K от уровня интерференционного максимума q для круглой ФАР из круглых элементов с равномерным расположением излучателей.*

Рис. 10.

Полученные результаты позволяют провести сравнительный анализ коэффициента избыточности в ФАР, предназначенной для систем глобальной спутниковой связи. Эти зависимости показаны на рис. 11.

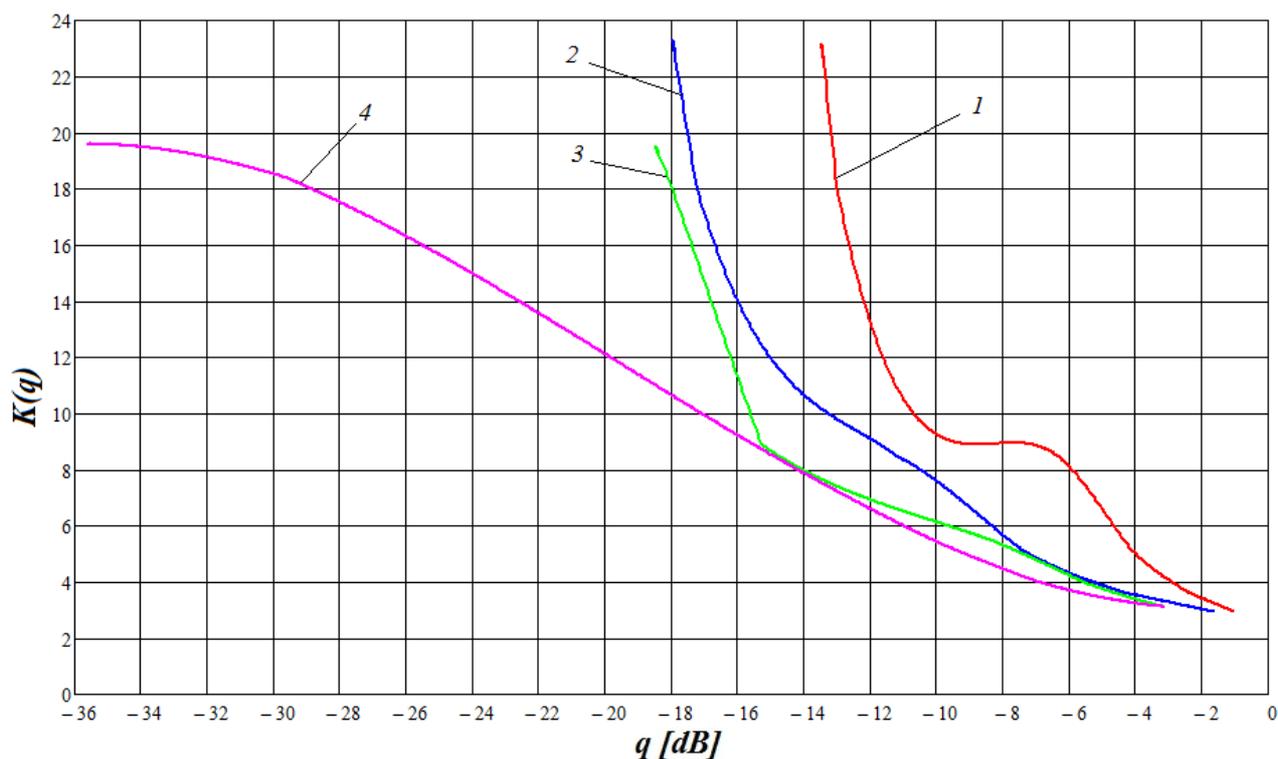


Рис.11. Зависимость коэффициента избыточности K от уровня интерференционного максимума q . 1- для ФАР с квадратной апертурой из квадратных рупоров с равномерным расположением излучателей; 2 - для ФАР с квадратной апертурой из квадратных рупоров с расположением по гексагональной сетке; 3 - для ФАР с квадратной апертурой из конических рупоров, расположенных по гексагональной сетке. 4 - для ФАР с круглой апертурой из конических рупоров.

Из приведенных кривых следует, что наименьшим коэффициентом избыточности обладает круглая ФАР из конических рупоров.

При уровне интерференционного бокового лепестка, не превышающего -14 дБ, схожими характеристиками обладает прямоугольная ФАР с круглыми излучателями, расположенными по гексагональной сетке. ФАР из прямоугольных излучателей с прямоугольной апертурой, существенно проигрывают аналогичным ФАР из

конических рупоров и тем больше, чем жестче требования к уровню интерференционного бокового лепестка.

Заключение

Проведенный анализ показал, что использовать обычную ФАР в качестве антенной системы для системы глобальной спутниковой связи нецелесообразно. При малом секторе сканирования $\pm 8.7^\circ$, ФАР обладают значительной избыточностью излучателей. Если с целью уменьшения количества излучателей увеличить их апертуру, то неизбежно в ДН ФАР появляется интерференционный максимум. Так при требуемом КУ 40 дБ для обеспечения величины интерференционных максимумов, не превышающих -13.5 дБ необходимо более 200 излучателей. Соответственно при требуемом уровне интерференционного бокового лепестка -20 дБ, коэффициент избыточности увеличивается до 12 даже для ФАР с круглой апертурой из конических рупоров. При этом коэффициент избыточности лежит в интервале 3 - 24 в зависимости от типа излучателей и структуры ФАР. Конструктивно и технологически сложно сделать бортовую ФАР космического аппарата с таким неоправданно большим числом излучателей. Кроме того для управления большим количеством излучателей требуются значительные вычислительные мощности, что существенно усложняет использование ФАР на космических аппаратах.

Попытка уменьшить количество излучателей в бортовой ФАР приводит к значительному росту уровня интерференционных боковых лепестков. И хотя их направления лежат за пределами сектора обзора Земли, помехоустойчивость и

электромагнитная совместимость ССС при этом значительно ухудшаются.

В связи с вышеизложенным возникает задача разработки «оптимальной» структуры бортовой антенны для ССС. Возможным вариантом такой антенны может быть многолучевая АР, состоящая из крупноапертурных излучателей (КАИ). Целесообразность использования КАИ в ФАР с малым сектором сканирования отмечалась ранее в ряде работ[2]. Однако приведенные выше результаты показывают, что простое увеличение апертуры отдельного излучателя ФАР далеко не всегда является оправданным и не приводит к желаемым результатам. Поэтому этот вопрос требует детального дальнейшего исследования, в частности, в направлении разработки ФАР или многолучевой АР из оптимизированных по сектору обзора крупноапертурных многолучевых излучателей[3].

Библиографический список

1. Jones D.E. A Limited-scan, 20 GHz, active transmitting antenna for space applications, Digest of the IEEE APS International Symposium, Albuquerque, NM, 1982, vol. 2, pp. 435-438.
2. Скобелев С.П. Фазированные антенные решетки с секторными парциальными диаграммами направленности. // Москва: ФИЗМАТЛИТ. 2010г. С.320.
3. Пономарев Л.И., Вечтомов В.А., Милосердов А.С. Многолучевая антенная решетка для системы спутниковой связи. // Антенны. 2012. №5. С. 52-65.