

Ганцевичи (Барановичи)

Условие

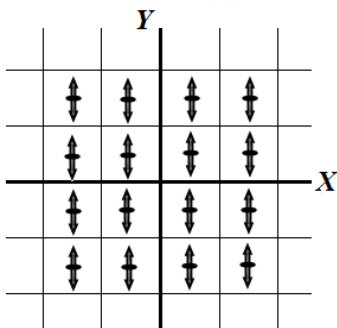
Задание 11-3. Фазированная антенная решетка – глаза радиолокационной системы

Небольшая справка: Отдельный радиотехнический узел «Ганцевичи (Барановичи)», находящийся в 48 км юго-восточнее города Барановичи. Узел является войсковой частью Воздушно-космических сил России и оснащен стационарной цифровой радиолокационной станцией дециметрового диапазона типа «Волга». «Волга» обеспечивает слежение за ракетными пусками вероятного противника на дальности до 4800 км и наблюдение за космическими объектами миллиметровых размеров на любой из орбит. С помощью «Волги» осуществляются обнаружение баллистических ракет и космических объектов и контроль над районами патрулирования подлодок стран НАТО в Европе, Северной Атлантике и Норвежском море. Объект входит в систему раннего предупреждения о ракетном нападении и замыкается, в конечном счете, на так называемый «ядерный чемоданчик» президента России.

На фотографии показана эта радиолокационная станция (восхититесь ее размерами). Самое поразительное в ее работе то, что сама антенна неподвижна, а посылаемый ею луч может направляться в различных направлениях. Цель данного задания разобраться в принципе работы такого устройства. Подробное описание станции засекречено, поэтому используемая в данной работе модель может отличаться от реальной.

Общее описание и теоретическое введение.

1. Антенна станции представляет собой плоскую квадратную решетку. Длину стороны каждой квадратной ячейки обозначим d . В центре каждой ячейки расположен дипольный излучатель радиоволн. Все источники являются монохроматическими и когерентными. Длина волны излучения равна $\lambda = 40$ см. Введем систему координат в плоскости антенны XY (см. рис.). Будем считать, что оси дипольных излучателей ориентированы вдоль оси Y . С помощью электроники и соответствующего программного обеспечения можно регулировать фазу колебаний каждого излучателя.

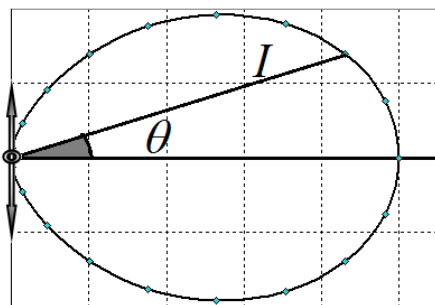


2. Для одиночного излучателя зависимость интенсивности излучения от угла θ между нормалью к оси излучателя и направлением излучения (такая зависимость называется индикатрисой излучения) описывается функцией

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad (1)$$

График этой функции в полярных координатах показан на рисунке. Далее величину I_0 считайте известной.

Индикатрисса излучения дипольного излучателя

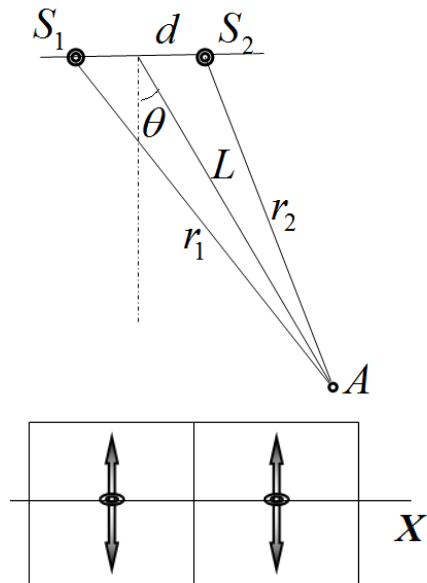


3. При выполнении данного задания вам необходимо суммировать волны, излучаемые всеми излучателями (рассчитывать результат интерференции волн). Следует считать, что расстояние до точки в которой происходит суммирование колебаний значительно больше размеров антенны.

4. Докажите формулу, которая во многом является основой дальнейших расчетов. Пусть расстояние между двумя источниками S_1 и S_2 равно d . Точка A , в которой происходит сложение волн, испущенных источником, равно L , и эта точка находится в направлении, задаваемом углом θ (см. рис.). Покажите, что разность расстояний от источников до рассматриваемой точки при $L \gg d$ определяется по формуле

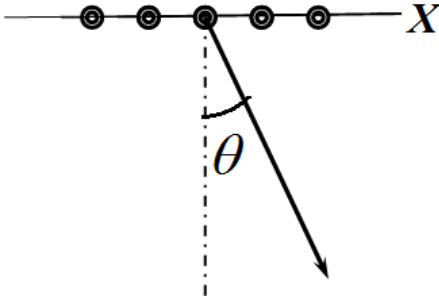
$$\Delta r = r_1 - r_2 = d \sin \theta. \quad (2)$$

В дальнейшем используйте эту формулу.

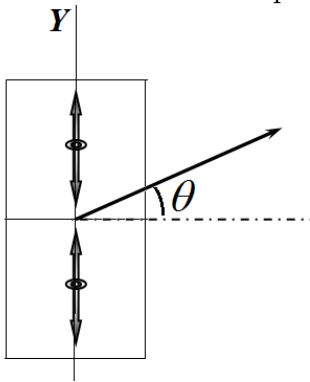


Часть 1. Два излучателя.

Рассмотрим два соседних излучателя решетки расположенных вдоль оси X решетки. Требуется рассчитать излучение в плоскости перпендикулярной осям излучателей в зависимости от угла θ между нормалью к плоскости излучателей и направлением, в котором рассчитывается интенсивность излучения. Понятно, что рассматриваемый диапазон углов θ : от $-\frac{\pi}{2}$ до $+\frac{\pi}{2}$. Так антенна излучает только в одну сторону. На следующем рисунке показан этот угол (вид сверху). Здесь изображено несколько (N) излучателей, чтобы этот же рисунок был пригоден для следующей части задачи, в этой части $N = 2$.



- 1.1 Найдите зависимость $I(\theta)$ интенсивности излучения двух излучателей от угла θ , если разность фаз колебаний на источниках равна $\Delta\varphi = 0$.
- 1.2 Найдите значения углов θ , для которых интенсивность излучения будет максимальна.
- 1.3 Укажите, при каком максимальном значении расстояния между излучателями d , зависимость $I(\theta)$ будет иметь только один максимум.
- 1.4 Ответьте на вопросы 1.1-1.3 для двух излучателей расположенных вдоль оси Y .



Часть 2. Цепочка излучателей.

. Рассмотрим одномерную цепочку из N излучателей, расположенных вдоль оси X . Расстояние между соседними излучателями равно $d = 0,80\lambda$. Сначала будем считать, что все излучатели колеблются в одной фазе.

- 2.1 Укажите направление (или направления) в которых интенсивность излучения цепочки максимальна. Чему равна эта максимальная интенсивность? 2.2 Найдите угловую ширину $\Delta\theta$ луча локатора, в пределах которого излучается основная доля энергии.

Подсказка. В качестве предельного значения угла следует брать направление, в котором интенсивность становится равной нулю.

Теперь будем считать, что между колебаниями соседних излучателей создается одинаковая разность фаз $\Delta\varphi$.

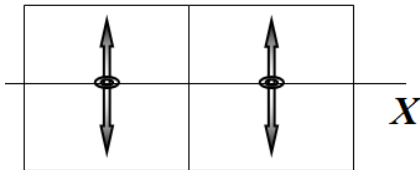
- 2.3 Найдите значения углов θ в направлении, которых интенсивность излучения будет максимальна. 2.4 Рассчитайте чему равна угловая ширина луча радара, если его максимальная интенсивность направлена под углом θ_0 . 2.5 Определите, по какому временному закону $\Delta\varphi(t)$ должна изменять разность фаз между колебаниями соседних излучателей, чтобы луч радара поворачивался с постоянной угловой скоростью ω .

- 2.6 Квадратная антенна содержит $N \times N$ излучателей, каждый из которых создает интенсивность I_0 . Чему равна максимальная интенсивность излучения всей антенны?



Решение

Задание 11-3. Фазированная антенная решетка – глаза радиолокационной системы



Часть 1. Два излучателя.

Решение данной части задачи практически полностью совпадает с описанием традиционной интерференционной схемы Юнга. Для двух источников распределение интенсивности в зависимости от разности фаз имеет вид

$$I = 2I_0(1 + \cos \Delta\varphi) \quad (1)$$

Формула для разности фаз приведена в условии, поэтому зависимость интенсивности от направления описывается функцией

$$I = 2I_0(1 + \cos(d \sin \theta)) \quad (2)$$

Условия максимума интерференции (разность хода равна целому числу длин волн) в данном случае приводит к формуле

$$d \sin \theta = m\lambda. \quad (3)$$

Излучение двух дипольных излучателей будет иметь только один (нулевой) максимум, если расстояние между источниками будет меньше длины волны излучения

$$d < \lambda. \quad (4)$$

1.4 Для двух излучателей, ориентированных вдоль оси диполя распределение интенсивности будет иметь практически тот же вид, что и (2), только его необходимо умножить на функцию описывающую индикатрису излучения отдельного диполя:

$$I = 2I_0(1 + \cos(d \sin \theta)) \cos^2 \theta. \quad (5)$$

Часть 2. Цепочка излучателей.

2.1 При указанном значении расстояния между излучателями формируется только один луч, соответствующий нулевому максимуму. Поэтому основная энергия излучения будет направлена перпендикулярно цепочке. 2.2 Угловая ширина определяется условием: разность фаз между крайними излучателями должна стать равной 2π , откуда следует:

$$(N - 1)\Delta\varphi = 2\pi \quad \Rightarrow \quad (N - 1)d \sin \delta\theta = 2\pi \quad \Rightarrow \quad \delta\theta = \frac{2\pi}{(N - 1)d}. \quad (6)$$

2.3 При наличии разности фаз направление излучения меняется и задается уравнением

$$\frac{2\pi}{\lambda}d \sin \theta - \Delta\varphi = 0 \quad (7)$$

2.5 Из уравнения (5) следует закон, по которому должна изменяться разность фаз колебаний

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}d \sin \theta = \frac{2\pi}{\lambda}d \sin \omega t. \quad (8)$$

2.6 Интенсивность излучения возрастает пропорционально квадрату числа когерентных источников, поэтому суммарная интенсивность излучения квадратной антенны будет равна

$$I = N^4 I_0. \quad (9)$$