

ПРОМЕЖУТОЧНАЯ ЗОНА АНТЕНН С КАЧАНИЕМ ЛУЧА

С. М. МАРТИРОСЯН, В. И. КУЛЕШОВ

Определены границы промежуточной зоны антенных систем с качанием луча. Показано, что размеры промежуточной зоны при измерении динамической диаграммы направленности зависят от скорости сканирования и отличаются от соответствующих размеров в статическом режиме. Рассмотрены случаи фазового и частотного сканирования. Определено понятие зоны раскрыва антенных систем с электрическим качанием луча. Показано, что при малой скорости сканирования эта зона совпадает с зоной раскрыва несканирующих антенн. При высокочастотных измерениях характеристик быстро сканирующих больших антенн по полям в промежуточной зоне и зоне раскрыва необходим учет скорости сканирования.

1. Введение

Определению промежуточной зоны* антенной системы посвящено много работ (например, [1, 2]). В частности, структура поля ближней зоны антенной решетки исследована в работе [3], где она разбита на пять областей, границы между которыми определяются размерами решетки, т. е. числом ее излучателей. Необходимость более детального рассмотрения этого вопроса для антенн с качанием луча диктуется тем обстоятельством, что это определение имеет свою специфику, связанную с влиянием конечной скорости распространения электромагнитных волн, и нуждается в уточнении; это особенно существенно для быстросканирующихся ФАР (фазированная антенная решетка).

Влияние скорости сканирования на характеристики антенн в динамическом режиме исследовано в ряде работ [4—6], где рассмотрены искажения диаграммы направленности при больших скоростях сканирования. Кроме того, размеры зон, на которые обычно делится поле излучения антенны, становятся зависимыми от скорости сканирования и отличаются от размеров зон в статическом режиме. В частности, в работе [7] исследована зависимость расстояния до дальней зоны от скорости сканирования.

2. Общие соотношения

Характеристики антенн с электрическим качанием луча удобно измерять в динамическом режиме, т. е. когда измерительный зонд устанавливается неподвижно относительно раскрыва антенны, а отклонение луча производится электрическим способом. Измеренная при этом диаграмма

* В литературе промежуточную зону называют также зоной Френеля, что, на наш взгляд, неудачно, особенно для антенн с электрическим качанием луча.

направленности называется динамической. Для анализа возможности ее измерения по полям в зоне раскрыва и в промежуточной зоне необходимо уточнить известное понятие промежуточной зоны применительно к описанному случаю.

Принято считать, что промежуточная зона простирается от границы дальней зоны до нижней границы справедливости применения приближений Френеля. Практически нижней границей для промежуточной зоны считается то расстояние R , на котором член с x^3 в биномиальном представлении для r_x вносит фазовую ошибку не более $\pi/8$ рад, где

$$r_x = \sqrt{R^2 - 2Rx \sin \theta + x^2} \quad (1)$$

есть расстояние между точками наблюдения и текущей точкой на раскрыве линейной антенной системы, R — расстояние от центра раскрыва до точки наблюдения, θ — угол между нормалью к антенне и направлением на точку наблюдения, x — координата излучателя (для простоты рассмотрен случай линейной антенны). Такой выбор аналогичен определению дальней зоны, когда член с x^2 на расстояниях $R > 2D^2/\lambda$ вносит фазовую погрешность менее $\pi/8$ рад.

Как было показано в работе [7], поле излучения антенны с распределением поля в раскрыве, зависящим от времени, может быть представлено в виде

$$E(M, t) = \frac{1}{4\pi c} \frac{\partial}{\partial t} \int_{-D/2}^{+D/2} \frac{a\left(x, t - \frac{r_x}{c}\right)}{r_x} dx, \quad (2)$$

где D — длина антенны, M — точка наблюдения, c — скорость света, $a(x, t)$ — мгновенное распределение поля в раскрыве.

Для интересующих нас расстояний (граница промежуточной зоны) полагая в знаменателе выражения (2)

$$r_x = R, \quad (3)$$

а в числителе —

$$r_x = \sqrt{R^2 - 2Rx \sin \theta + x^2} \approx R - x \sin \theta + \frac{x^3}{2R} \cos^2 \theta + \frac{x^3}{2R^2} \sin \theta \cos^2 \theta, \quad (4)$$

получим

$$E(M, t) = \frac{1}{4\pi R c} \frac{\partial}{\partial t} \int_{-D/2}^{+D/2} a\left(x, t' + \frac{x}{c} \sin \theta - \frac{x^3}{2Rc} \cos^2 \theta - \frac{x^3}{2R^2 c} \sin \theta \cos^2 \theta\right) dx, \quad (5)$$

где $t' = t - R/c$ — время запаздывания.

Для сканирующей линейной решетки N ненаправленных точечных излучателей мгновенное поле в раскрыве записывается в виде

$$a(x, t) = \sum_{n=0}^{N-1} A(x) \delta(x - x_n) e^{i[\omega_0 t - \psi(x, t)]}, \quad (6)$$

где $A(x)$ — амплитудное распределение, $\psi(x, t)$ — фазовое распределение, ω_0 — несущая частота излучения.

3. Фазовое сканирование

Пусть качание луча происходит по линейному закону. В этом случае фазовое распределение имеет вид

$$\psi(x, t) = k_0 x \sin \alpha t, \quad (7)$$

где $k_0 = \omega_0/c$, α — скорость сканирования.

Подставим (6) и (7) в (5), полагая скорость сканирования малой по сравнению с ω_0 . Опустив постоянный множитель, для амплитуды поля излучения сканирующей решетки на расстоянии R получим выражение

$$E(M, t) = \sum_{n=0}^{N-1} i \left\{ \omega_0 - k_0 x_n \alpha \cos \alpha \left[t' + \frac{x_n}{c} \sin \theta - \frac{x_n^2}{2Rc} \cos^2 \theta - \frac{x_n^3}{2R^2c} \sin \theta \cos^2 \theta \right] \right\} A(x_n) \exp i \left[\omega_0 - k_0 x_n \sin \alpha \left(t' - \frac{x_n}{c} \sin \theta - \frac{x_n^2}{2Rc} \cos^2 \theta - \frac{x_n^3}{2R^2c} \sin \theta \cos^2 \theta \right) + k_0 x_n \sin \theta - \frac{k_0 x_n^2}{2R} \cos^2 \theta - \frac{k_0 x_n^3}{2R^2} \sin \theta \cos^2 \theta \right]. \quad (8)$$

Для промежуточной зоны имеем

$$E(M, t) = \sum_{n=0}^{N-1} i \left[\omega_0 - k_0 x_n \alpha \cos \alpha \left(t' - \frac{x_n}{c} \sin \theta - \frac{x_n^2}{2Rc} \cos^2 \theta \right) \right] \times \\ \times A(x_n) \exp i \left[\omega_0 - k_0 x_n \sin \alpha \left(t' + \frac{x_n}{c} \sin \theta - \frac{x_n^2}{2Rc} \cos^2 \theta \right) + k_0 x_n \sin \theta - \frac{k_0 x_n^2}{2R} \cos^2 \theta \right]. \quad (9)$$

Расстояние до нижней границы промежуточной зоны можно определить из сравнения выражений (8) и (9) при условии, чтобы разность числителей экспонент этих выражений не превышала $\pi/8$. Этот критерий дает

$$\left| -k_0 x_n \sin \alpha \left(t' - \frac{x_n}{c} \sin \theta - \frac{x_n^2}{2Rc} \cos^2 \theta \right) + k_0 x_n \sin \alpha \left(t' + \frac{x_n}{c} \sin \theta - \frac{x_n^2}{2Rc} \cos^2 \theta - \frac{x_n^3}{2R^2c} \sin \theta \cos^2 \theta \right) + \frac{k_0 x_n^3}{2R^2} \sin \theta \cos^2 \theta \right|_{\max} \leq \frac{\pi}{8}. \quad (10)$$

Положим, что аргумент второго синуса мал (это означает также малость аргумента первого синуса). Тогда

$$\left| \frac{k_0 x_n^3}{2R^2} \sin \theta \cos^2 \theta - k_0 \frac{\alpha x_n^4}{2R^2 c} \sin \theta \cos^2 \theta \right|_{\max} \leq \frac{\pi}{8} \quad (11)$$

или

$$\left| \sin \theta \cos^2 \theta \frac{k_0 x_n^3}{2R^2} \left(1 - \frac{\alpha x_n}{c} \right) \right|_{\max} \leq \frac{\pi}{8}. \quad (12)$$

Выражение (12) достигает своего максимального значения при $\theta = 35^\circ 20'$. Подставив также $k_0 = 2\pi/\lambda$ и $x_{\max} = D/2$, где D — наибольший размер раскрыва, после несложных вычислений получаем

$$R_{\min} \geq 0,62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda} \left(1 - \frac{\alpha D}{2c} \right)}. \quad (13)$$

Как видно из выражения (13), нижняя граница промежуточной зоны зависит от величины скорости сканирования и отличается от соответствующего расстояния в статическом режиме.

4. Частотное сканирование

Пусть на вход линейной решетки, состоящей из N ненаправленных излучателей с расстоянием d между ними, подаются частотно-модулированные колебания с пилообразным законом модуляции

$$\omega = \omega_0 + \alpha t \quad \text{при} \quad 0 \leq t \leq T, \quad (14)$$

где T — период сканирования.

В комплексном виде колебания имеют вид

$$\exp i \left(\omega_0 t + \frac{\alpha t^2}{2} \right). \quad (15)$$

Мгновенное распределение поля по излучателям, очевидно, есть

$$a(x_n, t) = A(x_n) \exp i \left[\omega_0 t - k_0 \gamma n d + \frac{\alpha t^2}{2} - \frac{\alpha \gamma n d t}{c} + \frac{\alpha (\gamma n d)^2}{2c^2} \right], \quad (16)$$

где γ — коэффициент замедления волны, возбуждающей решетку, $n = 0, \dots, (N-1)$ — номер излучателя.

Подставив (16) в (5), выполнив дифференцирование и опустив постоянные множители, для амплитуды поля получим

$$\begin{aligned} E(M, t) = \sum_{n=0}^{N-1} i \left[\omega_0 - \frac{\alpha \gamma n d}{c} + \alpha \left(t' + \frac{x_n}{c} \sin \theta - \frac{x_n^2}{2Rc} \cos^2 \theta - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{x_n^3}{2R^2 c} \sin \theta \cos^2 \theta \right) \right] A(x_n) \exp i \left[\omega_0 \left(t' + \frac{x_n}{c} \sin \theta - \frac{x_n^2}{2Rc} \cos^2 \theta - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{x_n^3}{2R^2 c} \sin \theta \cos^2 \theta \right) - k_0 \gamma x_n + \frac{\alpha (\gamma x_n)^2}{2c^2} - \frac{\alpha \gamma x_n}{c} \left(t' + \frac{x_n}{c} \sin \theta - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{x_n^2}{2Rc} \cos^2 \theta - \frac{x_n^3}{2R^2 c} \sin \theta \cos^2 \theta \right) + \frac{\alpha}{2} \left(t' + \frac{x_n}{c} \sin \theta - \frac{x_n^2}{2Rc} \cos^2 \theta - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{x_n^3}{2R^2 c} \sin \theta \cos^2 \theta \right)^2 \right]. \quad (17) \end{aligned}$$

Для промежуточной зоны соответственно имеем

$$E(M, t) = \sum_{n=0}^{N-1} i \left\{ \omega_0 - \alpha t' + \alpha \left[\frac{nd}{c} \sin \theta - \frac{(nd \cos \theta)^2}{2 Rc} - \frac{\alpha \gamma nd}{c} \right] \right\} \times \\ \times A(x_n) \exp i \left\{ \omega_0 \left[t' - \frac{nd}{c} \sin \theta - \frac{(nd \cos \theta)^2}{2 Rc} \right] - k_0 \gamma nd + \frac{\alpha (\gamma nd)^2}{c^2} + \right. \\ \left. + \frac{\alpha}{2} \left[t' + \frac{nd}{c} \sin \theta - \frac{(nd \cos \theta)^2}{2 Rc} - \frac{\alpha \gamma nd}{c} \left[t' + \frac{nd}{c} \sin \theta - \frac{(nd \cos \theta)^2}{2 Rc} \right] \right] \right\}. \quad (18)$$

Если воспользоваться тем же критерием промежуточной зоны, что и выше, то получим

$$\left| k_0 \frac{x_n^3}{2 R^2} \sin \theta \cos^2 \theta - \frac{\alpha \gamma x_n^4}{2 R^2 c^2} \sin \theta \cos^2 \theta + \frac{\alpha}{2} \left(t' + \frac{x_n}{c} \sin \theta - \frac{x_n^2}{2 Rc} \cos^2 \theta \right)^2 - \right. \\ \left. - \frac{\alpha}{2} \left(t' + \frac{x_n}{c} \sin \theta - \frac{x_n^2}{2 Rc} \cos^2 \theta - \frac{x_n^3}{2 R^2 c} \sin \theta \cos^2 \theta \right) \right|_{\max} \leq \frac{\pi}{8}. \quad (19)$$

Преобразуя это выражение и пренебрегая членами высшего порядка малости, находим

$$\left| \frac{x_n^3}{2 R^2} \left(\omega_0 + \frac{\alpha}{c} t' \right) \sin \theta \cos^2 \theta \right|_{\max} \leq \frac{\pi}{8}. \quad (20)$$

Максимум левой части неравенства достигается при $\theta = 35^\circ 20'$. Окончательно имеем

$$R_{\min} \geq 0,62 \sqrt{\frac{D^3 (2\pi c - \alpha T \lambda)}{2\pi \lambda c}}. \quad (21)$$

Здесь, как и в предыдущем случае, расстояние до промежуточной зоны зависит от величины скорости сканирования. При нулевой скорости сканирования выведенные соотношения (13) и (21) переходят в известные выражения в статическом режиме.

Границами зоны раскрыва естественно взять сверху нижнюю границу промежуточной зоны, а снизу — физическую поверхность самой ФАР. Полученные выражения для нижней границы промежуточной зоны и для дальней зоны [7] дают более полное представление о делении ближнего поля антенн с качанием луча.

5. Заключение

Численные оценки показывают, что увеличение расстояния до нижней границы промежуточной зоны при $D = 30$ м и $\alpha = 10^4$ с⁻¹ составляет величину порядка 1%. Для антенн с более высокими скоростями сканирования это изменение будет значительно больше, и при проведении высокоточных измерений необходимо учитывать эти поправки для нижней границы промежуточной зоны. Следует отметить, что существует определенная по-

грешность из-за применения приближения Кирхгофа. Однако эта погрешность практически равна нулю при $\theta = 0$ [8], т. е. именно там, где рассматриваемый эффект из-за сканирования максимален.

Авторы выражают искреннюю благодарность П. М. Геруни за внимание к работе и ценные указания.

ВНИИРИ, г. Ереван

Поступила 12.X.1979

ЛИТЕРАТУРА

1. Р. С. Хансен. Сканирующие антенные системы СВЧ, Изд. Советское радио, М., 1971.
2. Г. Т. Марков, Д. Н. Сазонов. Антенны, Изд. Энергия, М., 1975.
3. Thomas E. Baldwin, A. T. Adams. "IEEE Int. Electromagnet. Compatib. Symp. Rec., Philadelphia, Pa, 1971", New York, 1971, p. 131.
4. Н. Г. Пономарев. Радиотехника и электроника, 7, 949 (1962).
5. Fung-I Tseng, D. K. Cheng. J. Phys., 42, 1358 (1964).
6. Р. К. Арора, В. Д. Агравал. ТИИЭР, 62, 192 (1974).
7. С. М. Мартиросян, В. И. Кулешов. Изв. АН АрмССР, Физика, 13, 211 (1978).
8. Л. А. Вайнштейн. Теория дифракции и метод факторизации, Изд. Советское радио, М., 1966.

ՀԱՅՎՈՐԴ ՀԱՌԱԳԱՅԹՈՎ ԱՆՏԵՆԱՆԵՐԻ ՄԻՋԱՆԿՅԱԼ ԳՈՏԻՆ

Ս. Մ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ, Վ. Ի. ԿՈՒԼԵՇՈՎ

Հաշված է ճոճվող ճառագայթով անտենաներից մինչև միջանկյալ գոտին ընկած տարածությունը: Ցույց է տրված, որ միջանկյալ գոտու չափսերը դինամիկ դիագրամայի չափման ժամանակ կախված են ճառագայթի թեքման արագությունից և տարբերվում են ստատիկ ուժի մի չափսերից: Դիտարկված են փուլային և հաճախային ճոճման դեպքեր: Որոշված է էլեկտրաճոճվող ճառագայթով անտենային համակարգերի բացվածքի զաղափարը: Ցույց է տրված, որ ճոճման փոքր արագությունների դեպքում այդ գոտին համընկնում է նույն չափսերի ճոճվող ճառագայթով անտենայի համապատասխան գոտուն: Արագ ճոճվող ճառագայթով մեծ անտենաների բնութագրերը միջանկյալ գոտում և բացվածքի գոտում դաշտերի ճշգրիտ չափումների միջոցով որոշման դեպքում անհրաժեշտ է հաշվի առնել ճոճման արագությունը:

THE INTERMEDIATE ZONE OF ANTENNAS WITH BEAM SWINGING

S. M. MARTIROSYAN, V. I. KULESHOV

The boundaries of the intermediate zone for an antenna system with beam swinging have been defined. It is shown that the dimensions of this zone during the measurement of dynamic patterns depends on the scanning rate and differ from those in the static regime. The cases of phase and frequency scanning are considered. The definition of an aperture zone for antenna systems with electrical beam swinging is given. It is shown that at low scanning rates this zone coincides with that for non-scanning antennas. For high precision measurements of fast scanning large antennas over the fields in the intermediate and aperture zones it is necessary to take into account the scanning rates.