

# Розвиток, бойове застосування та озброєння радіотехнічних військ

УДК 621.396

Л.Г. Корниенко

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

## ОСОБЕННОСТИ ФАЗИРОВАНИЯ СФОКУСИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

Рассмотрены характеристики сфокусированного электромагнитного излучения при различных способах фазирования антенной решетки. Проанализированы распределения амплитуды поля по дальности и углам при использовании аналоговых и дискретных фазовращателей для фазовой фокусировки решетки с непрерывным сигналом.

**Ключевые слова:** сфокусированная антенная решетка, аналоговый и дискретный фазовращатели, точка фокусировки, фазовое распределение, время запаздывания.

### Введение

Сфокусированные антенны (СА) обеспечивают синфазное сложение полей от излучателей в заданной точке пространства, что позволяет достичь больших значений плотности потока мощности электромагнитных волн. Такие антенны имеют обширную область применения, в частности в радиолокаторах с синтезированным раскрытием, в системах беспроводной передачи энергии СВЧ, функционального поражения РЭС. Фокусировка излучения может достигаться различными способами, например путем введения специальных фазового и (или) частотного распределений в раскрытие антенны. Исследованию СА посвящено значительное число работ, основные из них обобщены и развиты в монографии [1].

Для фокусировки электромагнитного излучения больших антенн нужны фазирющие устройства, способные изменять фазу сигналов на значения,

намного превышающие  $2\pi$ . Это усложняет конструкцию фазовращателей (ФВ), приводит к увеличению потерь мощности сигнала, фазовых ошибок, времени переключения фазы. Возникает необходимость в исследовании возможности применения в СА типовых ФВ с пределами изменения фазы от 0 до  $2\pi$ . Целью статьи является изучение влияния на пространственно-временные характеристики сфокусированного поля различных способов фазирования антенных решеток.

### Основной материал

Общие соотношения. Рассмотрим произвольную антенную решетку из  $N$  излучателей (рис.1), возбуждаемых сигналами частоты  $f_n$ ,  $n = 0, N-1$ , зависящей от номера излучателя.

Поле в точке наблюдения  $P$  в момент времени  $t$  равно сумме парциальных полей возбуждаемых излучателями в этой точке в тот же момент времени [2].

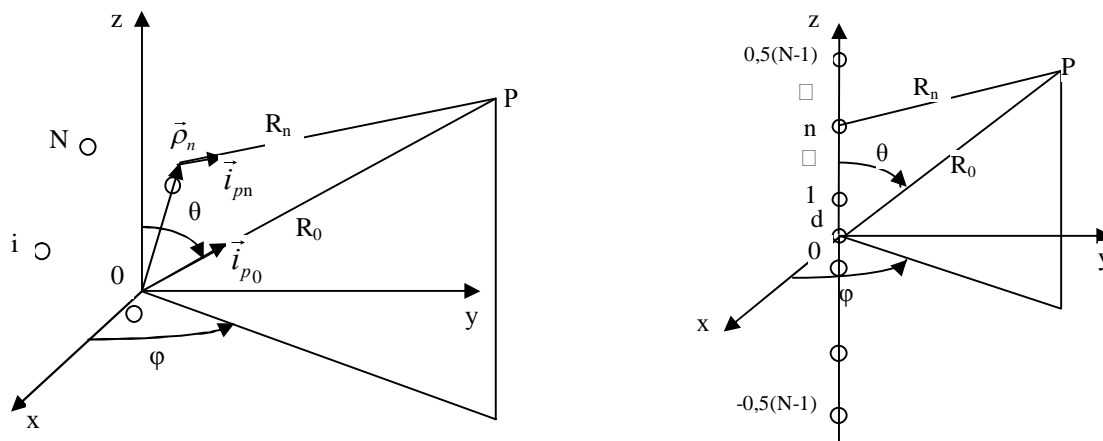


Рис. 1. Фазовый портрет произвольной антенной решетки из  $N$  излучателей

$$\dot{\vec{A}}(E, t) = \sum_{n=0}^{N-1} \frac{\dot{\vec{F}}_n(\vec{i}_{pn})}{R_n} \sqrt{60P_n G_n} \times \exp \left\{ j \left[ 2\pi f_n \left( t - \frac{R_n}{c} \right) + \varphi_n \right] \right\}, \quad (1)$$

где  $G_n$ ;  $\dot{\vec{F}}_n(\vec{i}_{pn})$  – максимальный коэффициент усиления (КУ) и векторная комплексная нормированная ДН  $n$ -го излучателя в направлении орта  $\vec{e}_{\delta n}$  (рис. 1) на частоте  $f_n$ ;  $R_n$  – расстояние от  $n$ -го излучателя решетки до точки  $P$ ;  $P_n$  – мощность, подводимая к  $n$ -му элементу решетки;  $\varphi_n$  – фазовое распределение в раскрыве решетки;  $c$  – скорость света. Величина  $R_n/c = t_n$  определяет время запаздывания волны от  $n$ -го излучателя до точки  $P$ . Соотношение (1) справедливо для области дальней зоны отдельного излучателя. Используем для определения положения точки наблюдения сферическую систему координат, которую обычно применяют в координатных системах РЭС. В отличие от декартовых координат [1], эта система не только более практична, но и более наглядна и удобна при исследованиях характеристик антенн. При расположении точки  $P(R_0, \theta, \varphi)$  в промежуточной зоне антенны [2,3]

$$R_n \approx R_0 - \rho_n \cos \gamma_n + \frac{\rho_n^2}{2R_0} \sin^2 \gamma_n, \quad (2)$$

где  $\gamma_n$  – угол между радиусом–вектором  $\vec{\rho}_n$ , определяющим положение  $n$ -го излучателя, и ортом  $\vec{e}_{\delta_0}$ , направленным из начала общей системы координат на точку наблюдения. Для дальней зоны антенны можно в (2) пренебречь квадратичным членом.

Потребуем, чтобы в момент времени  $t_0 = R_{0\phi}/c$ , равный времени запаздывания волны от центрального излучателя до точки  $P_\phi(R_{0\phi}, \theta_\phi, \varphi_\phi)$  (точка фокусировки), поля от всех излучателей складывались в фазе

$$\omega_n \left( t_0 - \frac{R_{n\phi}}{c} \right) + \varphi_n = q2\pi, \quad (3)$$

$$\omega_n = 2\pi f_n, \quad n = \overline{0, N-1},$$

$$q = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$$

Соотношение (3) записано в предположении, что излучатели имеют фазовый центр, и поэтому не учитывается их фазовая диаграмма.

Из (3) определим фазовое распределение в решетке

$$\varphi_n = -k_n (R_{0\phi} - R_{n\phi}), \quad n = \overline{0, N-1}, \quad (4)$$

где  $k_n = \omega_n/c = 2\pi/\lambda_n$  – волновое число свободного пространства для сигнала с частотой  $f_n$ .

Фазовое распределение (4) обеспечивает согласованную по времени полную компенсацию набега фазы на разности хода волн от излучателей решетки до точки фокусирования при заданном распределении частот. Оно позволяет при известной геометрии антенны рассчитывать фазовые распределения для

фокусировки излучения и перемещения фокального пятна по заданной траектории. При расположении точки фокусировки  $P_\phi(R_{0\phi}, \theta_\phi, \varphi_\phi)$  в промежуточной зоне фазовое распределение (4) имеет вид

$$\varphi_n = -k_n \left( \rho_n \cos \gamma_{n\phi} - \frac{\rho_n^2}{2R_{0\phi}} \sin^2 \gamma_{n\phi} \right), \quad n = \overline{0, N-1}, \quad (4, a)$$

где  $\gamma_{n\phi}$  – угол между радиус-вектором  $\vec{\rho}_n$  и ортом  $\vec{e}_{\delta_0}$ ,

указывающем направление на точку фокусировки. Это фазовое распределение компенсирует в точке фокусировки линейную и квадратичную составляющие в набега фазы на разности хода гармонических волн. Линейная составляющая в (4а) обеспечивает угловое отклонение фокального пятна, квадратичная составляющая – фокусировку излучения в отклоненной точке, находящейся в зоне Френеля. Из (1), (2), (4, a) следует, что в окрестности точки фокусировки с границами  $\gamma_{n\alpha}, R_{0\alpha}$ , для которой

$$\left| k_n \rho_n^2 \left( \frac{\sin^2 \gamma_{n\alpha}}{R_{0\alpha}} - \frac{\sin^2 \gamma_{n\phi}}{R_{0\phi}} \right) \right| \leq \pi/4, \quad n = \overline{0, N-1}, \quad (5)$$

поле будет таким же, как в дальней зоне, и для расчета его характеристик можно использовать формулы обычной теории антенн. Соотношение (5) определяет область фокусировки.

Учитывая (4), соотношение для поля (1) приобретает вид

$$\dot{\vec{E}}(P, t) = \sum_{n=0}^{N-1} \frac{\dot{\vec{F}}_n(\vec{i}_{pn})}{R_n} \sqrt{60P_n G_n} \times \exp \left\{ j \left[ \omega_n \left( t - t_0 - \frac{R_n - R_{n\phi}}{c} \right) \right] \right\}. \quad (6)$$

Это соотношение описывает многочастотный пространственно временной сигнал.

Максимум поля

$$E_{\max} = |\dot{\vec{E}}(P_\phi, t_0)| = \left| \sum_{n=0}^{N-1} \frac{\dot{\vec{F}}_n(\vec{i}_{p\phi})}{R_n} \sqrt{60P_n G_n} \right| \quad (6, a)$$

достигается в фокусе  $R_n = R_{n\phi}$  в момент времени  $t = t_0$ .

Из соотношения (6) следует, что помимо максимума в точке  $R_{n\phi}$  (назовем его основным  $R_{n0}^{(0)} = R_{n\phi}$ ) в фиксированный момент времени могут существовать дополнительные максимумы в точках

$$R_{n0}^{(m)}, \quad \text{для которых } \omega_n \left( t_1 - \frac{R_{n0}^{(m)} - (R_{n0}^{(0)} - R_{00}^{(0)})}{c} \right) \cong q2\pi, \quad (7)$$

$$n = \overline{0, N-1}, \quad q = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$$

Расстояния между максимумами зависят от распределения частот по излучателям.

Так для момента времени  $t_1 = t_0$ , когда фазовое распределение (4) обеспечивает фокусировку излучения в точку  $R_{n0}^{(0)}$ , имеются в распределении поля другие максимумы с координатами

$$R_{n\phi}^{(m)} \cong R_{n\phi}^{(0)} - q\lambda_n \quad (7, a)$$

удаленными относительно координат основного максимума на расстояния, кратные длинам волн  $\lambda_n=c/f_n$ .

При использовании аналоговых фазовращателей с пределами изменения фазы от 0 до  $2\pi$  вместо (4) устанавливается следующее фазовое распределение

$$\varphi_{cn} = \varphi_n - E\left\{\frac{\varphi_n}{2\pi}\right\} \cdot 2\pi, \quad (8)$$

где  $E\{\cdot\}$  – операция выделения целого числа.

Аналоговые фазовращатели недостаточно стабильны. При дискретном фазировании с фазовым дискретом  $\Delta$  фазовое распределение (4) имеет вид

$$\varphi_{\Delta n} = \text{sign}(\varphi_n) E\left\{\frac{|\varphi_n|}{\Delta} + 0,5\right\} \Delta, \quad (9)$$

где  $\text{sign}(\cdot)$  – знак числа.

При фазировании с помощью ЦВМ фазовый дискрет выбирают в соответствии с выражением

$$\Delta = 2\pi/2^p, \quad (9, a)$$

где  $p$  – разрядность фазовращателя.

Фазовое распределение (9) является ступенчатым и обеспечивает аппроксимацию (4) с минимальной погрешностью, максимальное значение которой равно половине дискрета. Фазирование (9) можно обеспечить с помощью управляемых линий задержки, однако они имеют значительную электрическую длину и большие потери. Поэтому используют дискретные фазовращатели с пределами изменения фазы от нуля до  $2\pi$ , что требует в спецвычислителях фаз применения операций сброса фазы на  $2\pi$ . Фазирование выполняется в соответствии с выражением

$$\Phi_n = E\{[\varphi_n - E\{\varphi_n/2\pi\}2\pi]/\Delta + 0,5\}\Delta. \quad (10)$$

Сброс фазы на  $2\pi$  приводит к рассовмещению во времени огибающих парциальных сигналов в точке

$$\begin{aligned} \dot{E}(P, t) &= \frac{\sqrt{60P_0 G_0}}{R_0} \cdot F_0(\theta, \varphi) \cdot \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} A_n \cdot \exp\left\{j\left[\omega_n \left(t - [R_0 - nd \cos \theta + (nd)^2 \frac{\sin^2 \theta}{2R_0}]/c + \varphi_n\right)\right]\right\}, \\ \dot{A}_{\max} &= \frac{\sqrt{60P_0 G_0}}{R_0} \cdot F_0(\theta, \varphi) \cdot \sum_{n=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} \dot{A}_n. \end{aligned} \quad (13)$$

Множитель решетки (сумма в (13)), определяющий результат сложения полей от изотропных излучателей, не зависит от азимутального угла  $\varphi$ , т.е. является симметричным относительно оси OZ. Направленность решетки по углу  $\varphi$  определяется ДН отдельного излучателя. Фазовое распределение  $\varphi_n$  при полном аналоговом, аналоговом со сбросом фазы на  $2\pi$ , полном дискретном, дискретном со сбросом фазы на  $2\pi$  фазировании решетки определяется соответственно соотношениями (12), (8), (9), (10).

Пусть решетка состоит из  $N=51$  излучателей, размещенных вдоль оси OZ с шагом  $d=0,5\lambda_0$  и нача-

фокусировки, что искажает форму результирующего сигнала [3]. Этот эффект проявляется для короткоимпульсных сигналов. При дискретном фазировании появляются фазовые ошибки, которые ухудшают характеристики сфокусированного поля, приводят к возникновению коммутационных лепестков.

Анализ сфокусированного поля линейной антенной решетки. Проведем расчеты характеристик сфокусированного поля для линейной эквидистантной антенной решетки с шагом  $d$  (рис.2). Для  $n$ -го излучателя имеем:  $x_n=y_n=0$ ,  $\rho_n=z_n=nd$ ;  $\gamma_n=\theta$ ,  $\gamma_{n\phi}=\theta_\phi$ . Соотношения для  $R_n$  (2) и  $R_{n\phi}$  приобретают вид

$$\begin{aligned} R_n &\approx R_0 - z_n \cos \theta + \frac{z_n^2}{2R_0} \sin^2 \theta; \\ R_{n\phi} &\approx R_{0\phi} - z_n \cos \theta_\phi + \frac{z_n^2}{2R_{0\phi}} \sin^2 \theta_\phi. \end{aligned} \quad (11)$$

Каждый излучатель для фокусировки поля в зоне Френеля возбуждается сигналом с начальной фазой (4а)

$$\varphi_n = -k_n \left( z_n \cos \theta_\phi - \frac{z_n^2}{2R_{0\phi}} \sin^2 \theta_\phi \right), \quad (12)$$

зависящей от дальности до точки фокусировки.

В промежуточной зоне различиями расстояний  $R_n$  в амплитудных множителях можно пренебречь. Для идентичных одинаково ориентированных и слабонаправленных излучателей с незначительной зависимостью параметров от частоты  $\dot{F}_n(\vec{i}_{pn}) \approx \dot{F}_0(\vec{i}_0)$ ,  $G_n=G_0$ . Мощности, подводимые к излучателям  $P_n = A_n P_0$ , где  $A_n$  – амплитудное распределение в раскрыве решетки. Учитывая, что при одинаковых поляризациях волн векторное суммирование можно заменить алгебраическим, получим:

лом координат в центре решетки. Примем, что сигналы в каналах излучателей имеют одинаковые частоты  $f_n = f_0 = 3$  ГГц.

Дальняя зона решетки  $r \geq 2(Nd)^2/\lambda_0 = 130$ м.

На рис. 1 представлены фрагменты полного аналогового (12) (сплошная кривая), полного дискретного (8), дискретного со сбросом фазы на  $2\pi$  (10) (штриховая кривая) фазовых распределений, обеспечивающие фокусировку в точку  $\theta_\phi=\pi/3$ ,

$$R_{0\phi} = 0,1r = 13\text{м}.$$

Дискретный ФВ является трехразрядным.

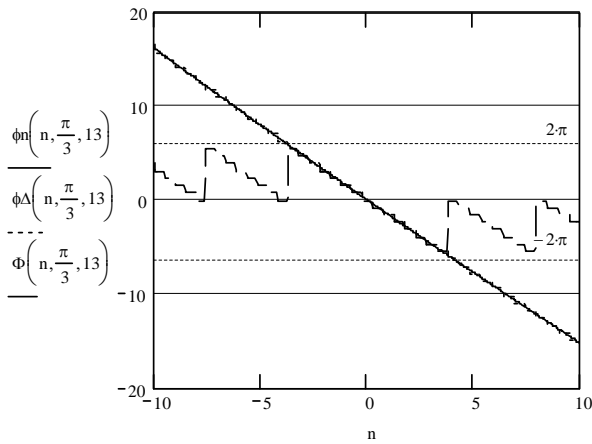


Рис. 1. Фазовые распределения в рад.

Фазовое распределение при использовании дискретного ФВ с пределами изменения фазы  $0 \dots 2\pi$  является пилообразным ступенчатым. Максимальная фазовая ошибка (без учета сброса фазы) составляет  $22,5^\circ$ .

На рис. 2 приведены зависимости множителя решетки  $S(v, \theta, R_0, \theta_\phi, R_{0\phi}, \chi)$ , нормированного к своему максимальному значению, при равномерном амплитудном распределении  $A_n = 1$  от дальности  $R_0$  (рис.2а) и угла  $\theta$  (рис.2б) для антенны, сфокусированной в точку, находящиеся в направлении  $\theta_\phi = \pi/3$  на дальностях  $R_{0\phi} = 0, 1r$  и  $0,5r$  в момент времени  $t = v R_{0\phi}/c = t_0, (v = 1)$ . При полном аналоговом фазировании ( $\chi=0$ ) множитель решетки максимален в точках

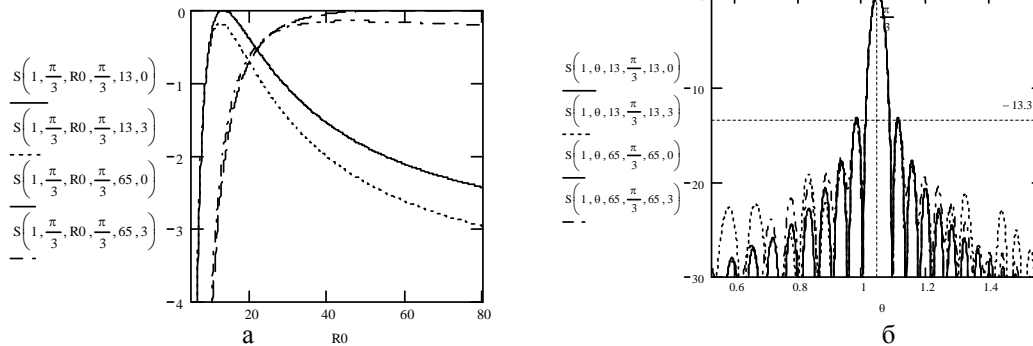


Рис. 2. Распределение поля ( в дБ) по дальности (а) и углам (б) при непрерывном и дискретном фазировании решетки с  $N = 51, d = 0,5\lambda_0$

Для трехразрядного ФВ  $g \approx -0,22$  дБ. При более точных расчетах уменьшение амплитуды в точке  $R_{0\phi} = 0, 1r$  составляет  $-0,2$  дБ, в точке  $R_{0\phi} = 0,5r - 0,18$  дБ. С увеличением дальности спад амплитуды (относительно амплитуды при аналоговом фазировании) возрастает и для антенн с  $R_{0\phi} = 0, 1r$  и  $R_{0\phi} = 0,5r$  для  $R_0 = r$  соответственно составляет  $-0,56$  дБ и  $-0,27$  дБ. Способ фазирования влияет и на угловое распределение поля (рис.2б), особенно в области бокового излучения. Чем ближе к антенне точка фокусировки, тем более существенными являются выбросы в дальних боковых лепестках, которые могут достигать  $-20$  дБ и больше. В целом сфокусированное на меньших расстояниях поле

фокусировки, угловое распределение поля совпадает с ДН антенны в дальней зоне.

Значение множителя решетки по дальности при  $R_0 \geq R_{0\phi} = 0,5r$  не меняется (амплитуда поля убывает по закону  $1/R_0$ ), решетка работает в режиме фокусировки "на бесконечность", когда поля от всех излучателей вне зависимости от дальности складываются синфазно [4]. При  $R_0 \geq R_{0\phi} = 0, 1r$  при выходе из области фокусировки (5) постепенно уменьшается квадратичная составляющая в разности хода волн и поэтому усиливается действие на распределение поля квадратичной составляющей в фазовом распределении.

Множитель решетки уменьшается (амплитуда поля убывает быстрее, чем  $1/R_0$ ), вплоть до дальней зоны антенны, где интерференция полей стабилизируется вследствие отсутствия квадратичной составляющей в разности хода волн. Еще более быстрое уменьшение множителя решетки наблюдается при фокусировке в направлении  $\theta_\phi = \pi/2$  из-за увеличенного значения квадратичной составляющей в фазовом распределении. Аналогичный результат получается и при аналоговом фазировании со сбросом фазы ( $\chi=1$ ). Дискретное фазирование без сброса ( $\chi=2$ ) и со сбросом ( $\chi=3$ ) фазы одинаково ухудшает результаты фокусировки. Амплитуда поля уменьшается. Спад поля  $g$  минимальный в точках фокусировки. Его можно оценить для "густой" решетки по формуле  $g \approx 20 \lg (\sin 0,5\Delta/0,5\Delta)$ .

оказывается более чувствительным к ошибкам фазирования. С увеличением разрядности ФВ искажения в распределении поля уменьшаются. Сброс фазы на  $2\pi$  при аналоговом и дискретном фазировании не влияет на распределение сфокусированного поля, поскольку используется непрерывный сигнал.

При увеличении шага решетки с сохранением ее размера распределения полей в области точек фокусировки не изменяются при полном аналоговом фазировании, однако под углами  $\theta_{\phi m}$  появляются дополнительные (дифракционные) сфокусированные максимумы, которые в соответствии с (7) рассчитываются по формуле

$$\cos \theta_{fm} = \cos \theta_{\phi} + m\lambda_0/d, m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Для решетки, сфокусированной на расстояниях  $R_{0\phi} < 0,5r$ , в некоторых дифракционных максимумах поля от излучателей суммируются с фазами, отличающимися от фаз полей, формирующих основной максимум ( $m=0$ ), что приводит к уменьшению амплитуды дифракционного максимума, увеличению бокового излучения. Эти искажения усиливаются при дискретном фазировании

чающимися от фаз полей, формирующих основной максимум ( $m=0$ ), что приводит к уменьшению амплитуды дифракционного максимума, увеличению бокового излучения. Эти искажения усиливаются при дискретном фазировании

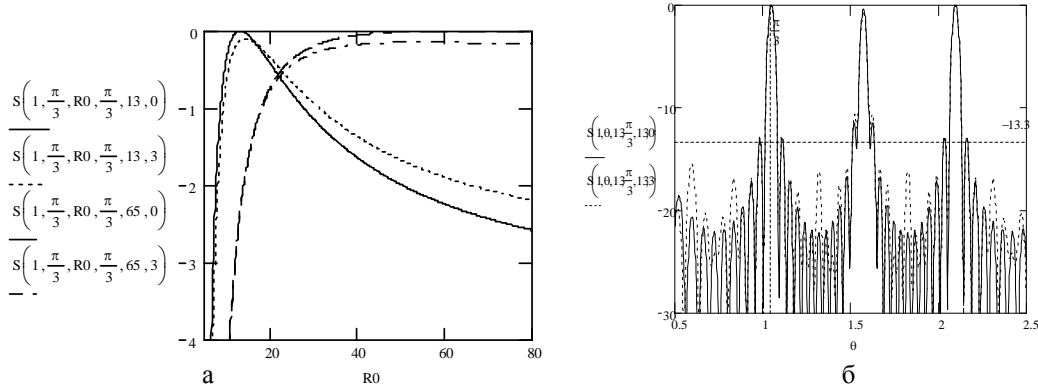


Рис. 3. Распределение поля по дальности (а) и углам (б) при аналоговом и трехразрядном дискретном фазировании решетки с  $N = 13, d = 2\lambda_0$

Из рис.3б видно, что при фокусировке в точку  $R_{0\phi} = 0,1r, \theta_{\phi} = \pi/3$  уровень дифракционного максимума  $m=-1$  под углом  $0,5\pi$  в сравнении с основным максимумом уменьшился на 0,4дБ из-за не полной компенсации квадратичной составляющей фазы, увеличился уровень боковых лепестков до -11дБ. Дискретное фазирование уменьшило уровень максимума до 0,7 дБ, первые боковые лепестки увеличились почти до -10дБ. Появившиеся выбросы в дальних боковых лепестках доходят до уровня -15,5дБ. Применение дискретного фазирования в разреженных решетках может изменить характер распределения поля по дальности, особенно при фокусировке в ближней части зоны Френеля. Из рис.3а видно, что амплитуда поля, сфокусированного на расстоянии  $R_{0\phi} = 0,1r$  под углом  $\theta_{\phi} = \pi/3$ , убывает с дальностью медленнее, чем при полном аналоговом фазировании, т. е. в этом случае ступенчатое фазовое распределение приводит не к столь быстрой расфазировке полей при увеличении дальности

фокусировку излучения антенных решеток с непрерывными сигналами. Дискретные фазовращатели ухудшают показатели фокусировки, особенно вне фокального пятна. Приведенные формулы и результаты расчетов позволяют определить требования к разрядности ФВ для обеспечения заданного качества фокусировки.

### Список литературы

1. Гомозов А.В. Фокусировка электромагнитного излучения и ее применение в радиоэлектронных средствах СВЧ. / А.В. Гомозов, В.И. Гомозов, Г.В. Ермаков, С.В. Титов. – Х.: КП «Городская типография», 2011. – 330 с.
2. Марков Г.Т. Антенны. / Г.Т. Марков, Д.М. Сазонов – М.: Энергия, 1975. – 528 с.
3. Корниенко Л.Г. Теория и техника излучающих и направляющих систем / Л.Г. Корниенко. – Х.: МОУ ХВУ, 1994. – 626 с.
4. Сканирующие антенные системы СВЧ / Перев. с англ. под ред. Г.Т. Маркова и А.Ф. Чаплина. – М.: Сов. Радио, 1966. – 536 с.

Поступила в редколлегию 12.01.2012

### Выводы

Аналоговые фазовращатели с пределами изменения фазы от 0 до  $2\pi$  обеспечивают качественную

**Рецензент:** д-р техн. наук проф. Ю.М. Седышев, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

### ОСОБЛИВОСТІ ФАЗУВАННЯ СФОКУСОВАНИХ АНТЕННИХ РЕШІТОК

Л.Г. Корнієнко

Розглянуті характеристики сфокусованого електромагнітного випромінювання при різних способах фазування антенної решітки. Проаналізовані розподіли амплітуди поля за дальністю і кутами при використанні аналогових і дискретних фазообертачів для фазового фокусування решітки з безперервним сигналом.

**Ключові слова:** сфокусована антенна решітка, аналоговий і дискретний фазообертачі, точка фокусування, фазовий розподіл, час запізнювання.

### FEATURES OF FOCUSED ARRAYS PHASING

L.G. Kornienko

Features of focused electromagnetic radiation with different phasing of an array were studied. Field amplitude distribution by range and angles using analog and digital phase shifter for continuous signal phase focusing were analyzed.

**Keywords:** focused array, analog and digital phase shifter, focus point, phase distribution, response time.