

ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫ КУРСОВОГО РАДИОМАЯКА ILS НА ПОВЕРХНОСТИ С ПОПЕРЕЧНЫМ УКЛОНОМ

А.В. Зотов, Б.В. Жданов, Н.И. Войтович

Представлено обобщение модели курсовой антенны, приведённой в ранее опубликованной статье (Войтович Н.И., Жданов Б.В., Зотов А.В. Моделирование работы двухчастотной системы посадки самолётов, 2013). Предположено, что антенная решётка излучающих элементов антенны курсового радиомаяка (КРМ) расположена горизонтально, а подстилающая поверхность в области, существенной для отражения радиоволн (в области зоны Френеля на подстилающей поверхности), представляет собой участок плоскости с поперечным уклоном по отношению к направлению оси взлётно-посадочной полосы. Ввиду отсутствия осевой симметрии задачи упомянутая излучающая система не имеет фазового центра. Найдены закономерности в поведении амплитудных и фазовых диаграмм направленности антенны для сигналов: «несущая плюс боковые» и «боковые частоты» узкого канала, «несущая плюс боковые» и «боковые частоты» широкого канала.

Ключевые слова: антенна, моделирование, курсовой радиомаяк, уклон, местность.

Введение

В настоящей статье представлено обобщение модели курсовой антенны, приведённой в ранее опубликованной статье [1]. В упомянутой статье предполагалось, что курсовой радиомаяк (КРМ) расположен на подстилающей поверхности в виде горизонтальной плоскости, безграничной во всех направлениях. Амплитудно-фазовое распределение (АФР) токов в антенной решётке (АР) симметрично относительно центра решётки. В силу симметрии задачи излучающая система, состоящая из реальных источников и мнимых источников (зеркальных изображений реальных источников в идеально проводящей плоскости) имеет фазовый центр, расположенный в точке на горизонтальной плоскости. Влияние Земли в этом случае учитывается интерференционным множителем Земли. Поэтому было удобно рассматривать интересующие величины как функции только от азимутального угла. В данной работе мы предположим, что антенна КРМ расположена горизонтально, а подстилающая поверхность в области, существенной для отражения радиоволн (в области зоны Френеля на подстилающей поверхности), представляет собой участок плоскости с поперечным уклоном по отношению к направлению прямой – продолжения оси взлётно-посадочной полосы. Ввиду отсутствия осевой симметрии задачи, упомянутая излучающая система не имеет фазового центра, представить зависимости интересующих величин в виде произведения двух функций, одна из которых зависит только от азимутального угла, а вторая – только от меридионального угла, не представляется возможным. Обобщение модели курсового радиомаяка, расположенного на подстилающей поверхности с поперечным по отношению к направлению оси взлётно-посадочной полосы (ВПП) уклоном, представлено в последующей статье авторов в данном номере журнала.

Постановка задачи

Введём в рассмотрение правую декартову и сферическую системы координат с началом в точке O (рис. 1): в точке пересечения вертикальной прямой, проходящей через электрический центр антенны O_1 , с подстилающей поверхностью (электрический центр антенны O_1 находится в центре антенной решётки излучающих элементов).

Ось Ox направим вдоль продолжения оси ВПП. Орт оси Ox \vec{x}_0 направлен в сторону ВПП. Ось Oz перпендикулярна к горизонтальной плоскости. Орт оси Oz \vec{z}_0 направлен вертикально вверх. Орт оси Oy : $\vec{y}_0 = [\vec{z}_0, \vec{x}_0]$.

Далее для простоты рассмотрения будем полагать, что подстилающая поверхность представляет собой наклонную, идеально проводящую плоскость.

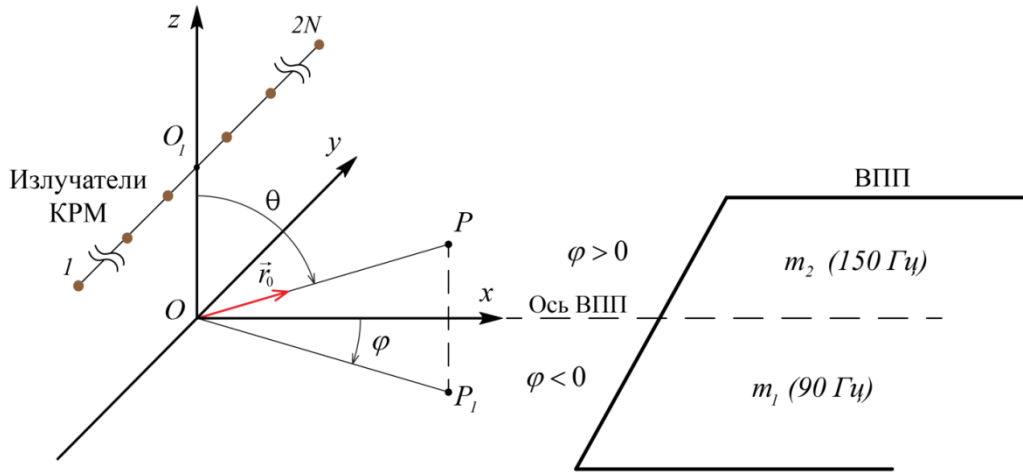


Рис. 1. Система координат

Обозначим угол уклона подстилающей поверхности (поперечного по отношению к оси Ox) буквой α . Причём угол α будем отсчитывать по ходу часовой стрелки, если смотреть из точки O в сторону положительных значений переменной x . Это означает, что положительным значениям угла α соответствует подъём на местности при движении в направлении положительных значений переменной y , а отрицательным значениям угла α соответствует спуск по местности при движении в направлении положительных значений переменной y .

Координаты мнимых источников

Пусть излучатель q_n ($n = 1, 2, \dots, 2N$) расположен в точке $q_n(0, y_n, H)$ (рис. 2).

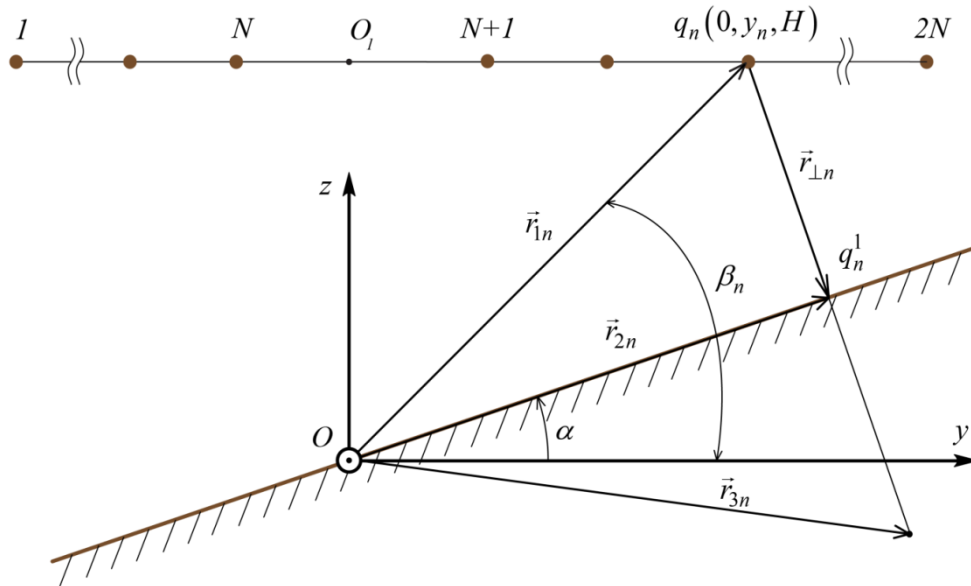


Рис. 2. К выводу формул для определения координат мнимых источников

Угол между направлением из начала координат O в точку $q_n(0, y_n, H)$ и горизонтальной плоскостью обозначим буквой β с нижним индексом n : β_n .

Кроме того, введём обозначения:

\vec{r}_{1n} – радиус-вектор точки $q_n(0, y_n, H)$, $\vec{r}_{1n} = y_n \vec{y}_0 + H \vec{z}_0$;

\vec{r}_{2n} – радиус-вектор точки $q_n^1(0, y_n^1, H^1)$ – проекции точки $q_n(0, y_n, H)$ на наклонную плоскость;

\vec{r}_{3n} – радиус-вектор точки зеркального изображения излучателя в наклонной плоскости;

$\vec{r}_{\perp n}$ – вектор, направленный из точки $q_n(0, y_n, H)$ в точку $q_n^1(0, y_n^1, H^1)$ – проекцию точки $q_n(0, y_n, H)$ излучателя на наклонную плоскость.

Для векторов $\vec{r}_{1n}, \vec{r}_{2n}, \vec{r}_{3n}, \vec{r}_{\perp n}$ справедливы соотношения:

$$\begin{aligned} \vec{r}_{2n} &= \vec{r}_{1n} + \vec{r}_{\perp n}, & \vec{r}_{3n} &= \vec{r}_{2n} + \vec{r}_{\perp n}, \\ \vec{r}_{\perp n} &= \vec{r}_{2n} - \vec{r}_{1n}, & \vec{r}_{3n} &= 2\vec{r}_{2n} - \vec{r}_{1n}; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\vec{r}_{1n} = \vec{y}_0 |\vec{r}_{1n}| \cos \beta_n + \vec{z}_0 |\vec{r}_{1n}| \sin \beta_n, \quad (2)$$

где $|\vec{r}_{1n}| = \sqrt{H^2 + y_n^2}$;

$$\beta_n = \begin{cases} \pi + \operatorname{arctg} \frac{H}{y_n} & \text{при } y_n < 0, \\ \operatorname{arctg} \frac{H}{y_n} & \text{при } y_n > 0; \end{cases} \quad (3)$$

$$\vec{r}_{2n} = \begin{cases} +|\vec{r}_{2n}|(\cos \alpha \vec{y}_0 + \sin \alpha \vec{z}_0) & \text{при } y_n > 0, \\ -|\vec{r}_{2n}|(\cos \alpha \vec{y}_0 + \sin \alpha \vec{z}_0) & \text{при } y_n < 0, \end{cases} \quad (4)$$

где $|\vec{r}_{2n}| = |\vec{r}_{1n}| \cos(\beta_n - \alpha)$.

Найдём \vec{r}_{3n} – радиус-вектор точки зеркального изображения излучателя в наклонной плоскости. Пусть $y_n > 0$.

$$\begin{aligned} \vec{r}_{3n} &= 2\vec{r}_{2n} - \vec{r}_{1n} = 2(|\vec{r}_{2n}| \cos \alpha \vec{y}_0 + |\vec{r}_{2n}| \sin \alpha \vec{z}_0) - (|\vec{r}_{1n}| \cos \beta_n \vec{y}_0 + |\vec{r}_{1n}| \sin \beta_n \vec{z}_0) = \\ &= 2(|\vec{r}_{1n}| \cos(\beta_n - \alpha) \cos \alpha \vec{y}_0 + |\vec{r}_{1n}| \cos(\beta_n - \alpha) \sin \alpha \vec{z}_0) - (|\vec{r}_{1n}| \cos \beta_n \vec{y}_0 + |\vec{r}_{1n}| \sin \beta_n \vec{z}_0) = \\ &= |\vec{r}_{1n}| \{ \vec{y}_0 [2 \cos(\beta_n - \alpha) \cos \alpha - \cos \beta_n] + \vec{z}_0 [2 \cos(\beta_n - \alpha) \sin \alpha - \sin \beta_n] \} = \\ &= |\vec{r}_{1n}| \{ \vec{y}_0 [\cos(\beta_n - 2\alpha) + \cos \beta_n - \cos \beta_n] + \vec{z}_0 [-\sin(\beta_n - 2\alpha) + \sin \beta_n - \sin \beta_n] \} = \\ &= |\vec{r}_{1n}| [\vec{y}_0 \cos(\beta_n - 2\alpha) - \vec{z}_0 \sin(\beta_n - 2\alpha)]. \end{aligned} \quad (5)$$

Запишем координаты мнимого источника:

$$q_n^1(0, |\vec{r}_{1n}| \cos(\beta_n - 2\alpha), -|\vec{r}_{1n}| \sin(\beta_n - 2\alpha)).$$

Анализ показывает, что координаты мнимых источников при положительных и отрицательных значениях угла наклона поверхности необходимо вычислять по одним и тем же формулам, приписывая местности с подъёмом при движении вдоль положительного направления оси Oy положительные значения угла $\alpha > 0$, отрицательные – при движении по спуску.

Амплитудные и фазовые диаграммы направленности (ДН) антенной решётки излучающих элементов антенны КРМ

Найдём ДН антенной решётки $2N$ излучающих элементов, расположенных над упомянутой наклонной плоскостью. Пусть \vec{r}_0 – единичный вектор радиуса-вектора \vec{r} точки наблюдения $P(r, \theta, \varphi)$, расположенной в дальней зоне антенной решётки излучателей:

$$\vec{r}_0 = \sin \theta \cos \varphi \vec{x}_0 + \sin \theta \sin \varphi \vec{y}_0 + \cos \theta \vec{z}_0, \quad (6)$$

где θ – меридиональный угол.

Тогда разность хода $\Delta r_{1n}(q_n)$ луча от n -го реального излучателя q_n в точку наблюдения и луча из начала координат равна:

$$\begin{aligned} \Delta r_{1n}(q_n) &= (\vec{r}_{1n}, \vec{r}_0) = (|\vec{r}_{1n}| \cos \beta_n \vec{y}_0 + |\vec{r}_{1n}| \sin \beta_n \vec{z}_0, \sin \theta \cos \varphi \vec{x}_0 + \sin \theta \sin \varphi \vec{y}_0 + \cos \theta \vec{z}_0) = \\ &= |\vec{r}_{1n}| \cos \beta_n \sin \theta \sin \varphi + |\vec{r}_{1n}| \sin \beta_n \cos \theta, \end{aligned} \quad (7)$$

или

$$\Delta r_{1n}(q_n) = (\vec{r}_{1n}, \vec{r}_0) = (y_n \vec{y}_0 + H \vec{z}_0, \sin \theta \cos \varphi \vec{x}_0 + \sin \theta \sin \varphi \vec{y}_0 + \cos \theta \vec{z}_0) = y_n \sin \theta \sin \varphi + H \cos \theta. \quad (8)$$

Разность хода луча от зеркального изображения излучателя q_n^1 в точку наблюдения и луча из начала координат равна:

$$\begin{aligned} \Delta r_{3n}(q_n) &= (\vec{r}_{3n}, \vec{r}_0) = \\ &= (\vec{y}_0 |\vec{r}_{1n}| \cos(\beta_n - 2\alpha) + \vec{z}_0 |\vec{r}_{1n}| \sin(\beta_n - 2\alpha), \sin \theta \cos \varphi \vec{x}_0 + \sin \theta \sin \varphi \vec{y}_0 + \cos \theta \vec{z}_0) = \\ &= |\vec{r}_{1n}| \cos(\beta_n - 2\alpha) \sin \theta \sin \varphi - |\vec{r}_{1n}| \sin(2\alpha + \beta_n) \cos \theta. \end{aligned} \quad (9)$$

Азимутальная составляющая напряжённости электрического поля $E_{1\varphi}(P)$ в точке $P(r, \theta, \varphi)$, созданная в результате излучения реальных источников, равна:

$$E_{1\varphi}(P) = C_1 \sum_{n=1}^{2N} \dot{A}_n e^{-ik\Delta r_{1n}(q_n)}, \quad (10)$$

где \dot{A}_n – комплексные амплитуды токов в излучающих элементах антенной решётки антенны КРМ;

C_1, C_2 – коэффициенты пропорциональности. При уклоне α , составляющем несколько градусов, $C_1 \approx C_2$. Далее будем полагать $C_1 \approx C_2 = 1$;

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \text{ – волновое число;}$$

λ – длина волны в свободном пространстве;

$$\Delta r_{1n}(q_n) = |\vec{r}_{1n}| [\cos \beta_n \sin \theta \sin \varphi + \sin \beta_n \cos \theta];$$

$$|\vec{r}_{1n}| = \sqrt{H^2 + y_n^2}; \quad \beta_n = \begin{cases} \pi + \operatorname{arctg} \frac{H}{y_n} & \text{при } y_n < 0, \\ \operatorname{arctg} \frac{H}{y_n} & \text{при } y_n > 0. \end{cases} \quad (11)$$

Азимутальная составляющая напряжённости электрического поля $E_{2\varphi}(P)$ в точке $P(r, \theta, \varphi)$, созданная в результате излучения мнимых источников, равна:

$$E_{2\varphi}(P) = -C_2 \sum_{n=1}^{2N} \dot{A}_n e^{-ik\Delta r_{3n}}, \quad (12)$$

где $\Delta r_{3n}(q_n) = |\vec{r}_1| [\cos(\beta_n - 2\alpha) \sin \theta \sin \varphi - \sin(\beta_n - 2\alpha) \cos \theta]$;

α – поперечный уклон местности.

Знак минус в выражении (12) означает, что падающая и отражённая волны на поверхности идеально проводящей плоскости отличаются друг от друга по фазе на 180° .

Азимутальная составляющая напряжённости суммарного электрического поля $E_\varphi^\Sigma(P)$ равна сумме напряжённостей полей, созданных реальными и мнимыми источниками:

$$E_\varphi^\Sigma(P) = E_{1\varphi}(P) + E_{2\varphi}(P). \quad (13)$$

Далее полагаем, что ДН антенны КРМ $F(\varphi, \theta) = E_\varphi^\Sigma(\varphi, \theta)$.

В соответствии с техническими требованиями норм ИКАО к ILS [2] глубина модуляции несущей высокой частоты сигналом 150 Гц преобладает справа (угол $\varphi > 0$), а глубина модуляции несущей тональным сигналом 90 Гц слева (угол $\varphi < 0$) для наблюдателя, находящегося на ВПП и обращенного лицом к КРМ. Областям с преобладающей модуляцией сигналом 150 Гц поставлены в соответствие положительные величины разности глубин модуляции (РГМ), а областям с преобладающей модуляцией сигналом 90 Гц – отрицательные величины РГМ в соответствии с АФР, приведенным в таблице, и определениями, представленными далее.

Сигналы «несущая частота плюс боковые частоты» (НБЧ) и «боковые частоты» (БЧ) узкого канала (УК) и широкого канала (ШК):

$$U_{\text{НБЧ}}^{\text{УК}}(\theta, \varphi, t) = x(\theta, \varphi, t) \cos[\omega^{\text{УК}}t + \psi^{\text{УК}} + \psi_1(\theta, \varphi)]; \quad (14)$$

$$U_{\text{БЧ}}^{\text{УК}}(\theta, \varphi, t) = y(\theta, \varphi, t) \cos(\omega^{\text{УК}}t - \psi^{\text{УК}} + \psi_2(\theta, \varphi)); \quad (15)$$

$$U_{\text{НБЧ}}^{\text{ШК}}(\theta, \varphi, t) = v(\theta, \varphi, t) \cos(\omega^{\text{ШК}} + \psi^{\text{ШК}} + \psi_3(\theta, \varphi)); \quad (16)$$

$$U_{\text{БЧ}}^{\text{ШК}}(\theta, \varphi, t) = w(\theta, \varphi, t) \cos(\omega^{\text{ШК}} - \psi^{\text{ШК}} + \psi_4(\theta, \varphi)), \quad (17)$$

где $x(\theta, \varphi, t) = \left| \dot{F}_{\text{НБЧ}}^{\text{УК}}(\theta, \varphi) \right| \cdot [1 + m \cos(\Omega_1 t) + m \cos(\Omega_2 t)]; \quad (18)$

$$y(\theta, \varphi, t) = a^{\text{УК}} \left| \dot{F}_{\text{БЧ}}^{\text{УК}}(\theta, \varphi) \right| \cdot [m \cos(\Omega_1 t) - m \cos(\Omega_2 t)]; \quad (18')$$

$$v(\theta, \varphi, t) = b \left| \dot{F}_{\text{НБЧ}}^{\text{ШК}}(\theta, \varphi) \right| \cdot [1 + m \cos(\Omega_1 t) + m \cos(\Omega_2 t)]; \quad (19)$$

$$w(\theta, \varphi, t) = a^{\text{ШК}} b \left| \dot{F}_{\text{БЧ}}^{\text{ШК}}(\theta, \varphi) \right| \cdot [m \cos(\Omega_1 t) - m \cos(\Omega_2 t)]; \quad (20)$$

φ – азимутальный угол;

t – время;

$\dot{F}_{\text{НБЧ}}^{\text{УК}}(\theta, \varphi)$ – комплексная диаграмма направленности (ДН) антенны КРМ по сигналу НБЧ

УК, $\left| \dot{F}_{\text{НБЧ}}^{\text{УК}}(\theta, \varphi) \right| e^{i\psi_1(\theta, \varphi)}$, $\left| \dot{F}_{\text{БЧ}}^{\text{УК}}(\theta, \varphi) \right|$ – амплитудная ДН;

$\psi_1(\theta, \varphi)$ – фазовая ДН антенны КРМ по сигналу НБЧ УК;

$\psi_2(\theta, \varphi)$ – фазовая ДН антенны КРМ по сигналу БЧ УК;

$\psi_3(\theta, \varphi)$ – фазовая ДН антенны КРМ по сигналу НБЧ ШК;

$\psi_4(\theta, \varphi)$ – фазовая ДН антенны КРМ по сигналу БЧ ШК;

$\dot{F}_{\text{БЧ}}^{\text{УК}}(\theta, \varphi)$ – комплексная ДН антенны КРМ по сигналу БЧ УК, $\dot{F}_{\text{БЧ}}^{\text{УК}}(\theta, \varphi) = \left| \dot{F}_{\text{БЧ}}^{\text{УК}}(\theta, \varphi) \right| e^{i\psi_2(\theta, \varphi)}$;

$\dot{F}_{\text{НБЧ}}^{\text{ШК}}(\theta, \varphi)$ – комплексная ДН антенны КРМ по сигналу НБЧ ШК;

$\dot{F}_{\text{БЧ}}^{\text{ШК}}(\theta, \varphi)$ – комплексная ДН антенны КРМ по сигналу БЧ ШК;

$\omega^{\text{УК}}$ – угловая частота несущей сигнала УК;

$\psi^{\text{УК}}$ – начальная фаза несущей частоты сигнала УК на входе антенны;

$\omega^{\text{ШК}}$ – угловая частота несущей сигнала ШК;

$\psi^{\text{ШК}}$ – начальная фаза несущей частоты сигнала ШК;

m – глубина модуляции сигнала УК (ШК) на входе антенны;

$\Omega_1 = 2\pi f_1$, $\Omega_2 = 2\pi f_2$;

$f_1 = 90$ Гц, $f_2 = 150$ Гц;

$a^{\text{УК}}$ – коэффициент, равный отношению амплитуд напряжений сигналов с угловыми частотами Ω_1 и Ω_2 модуляции в каналах БЧ и НБЧ узкого канала на входе антенны (величиной коэффициента $a^{\text{УК}}$ регулируют крутизну зоны УК);

$a^{\text{ШК}}$ – коэффициент, равный отношению амплитуд напряжений сигналов с угловыми частотами Ω_1 и Ω_2 в каналах БЧ и НБЧ широкого канала на входе антенны (величиной коэффициента $a^{\text{ШК}}$ регулируют уровень РГМ в широкой зоне);

b – коэффициент, равный соотношению амплитуды сигнала НБЧ ШК к амплитуде сигнала НБЧ УК на входе антенны.

Выберем в качестве опорной угловой частоты сигнала, получаемого в результате суммирования сигнала узкого и сигнала широкого каналов $U^{\Sigma}(\varphi, t)$, частоту ω_0 :

$$\omega_0 = \frac{\omega^{\text{ШК}} + \omega^{\text{УК}}}{2}. \quad (21)$$

Введём обозначение ω_p частоты, равной половине разности частот несущих частот широкого $\omega^{шк}$ и узкого $\omega^{ук}$ каналов:

$$\omega_p = \frac{\omega^{шк} - \omega^{ук}}{2}. \quad (21')$$

Тогда сигнал $U^\Sigma(\theta, \varphi, t)$ на входе приёмника может быть представлен в следующем виде:

$$\begin{aligned} U^\Sigma(\theta, \varphi, t) &= U_{нбч}^{ук}(\theta, \varphi, t) + U_{бч}^{ук}(\theta, \varphi, t) + U_{нбч}^{шк}(\theta, \varphi, t) + U_{бч}^{шк}(\theta, \varphi, t) = \\ &= \left| \dot{F}_{нбч}^{ук}(\theta, \varphi) \right| \cdot \left[1 + m \cos(\Omega_1 t) + m \cos(\Omega_2 t) \right] \cos\left((\omega_0 - \omega_p)t + \psi^{ук} + \psi_1(\theta, \varphi)\right) + \\ &+ a^{ук} \left| \dot{F}_{бч}^{ук}(\theta, \varphi) \right| \cdot \left[m \cos(\Omega_1 t) - m \cos(\Omega_2 t) \right] \cos\left((\omega_0 - \omega_p)t - \psi^{ук} + \psi_2(\theta, \varphi)\right) + \\ &+ b \left| \dot{F}_{нбч}^{шк}(\theta, \varphi) \right| \cdot \left[1 + m \cos(\Omega_1 t) + m \cos(\Omega_2 t) \right] \cos\left((\omega_0 + \omega_p)t + \psi^{шк} + \psi_3(\theta, \varphi)\right) + \\ &+ ba^{шк} \left| \dot{F}_{бч}^{шк}(\theta, \varphi) \right| \cdot \left[m \cos(\Omega_1 t) - m \cos(\Omega_2 t) \right] \cos\left((\omega_0 + \omega_p)t - \psi^{шк} + \psi_4(\theta, \varphi)\right). \end{aligned} \quad (22)$$

Преобразуем полученное выражение (24) к виду:

$$U^\Sigma(\varphi, t) = A(\theta, \varphi, t) \cos(\omega_0 t) - B(\theta, \varphi, t) \sin(\omega_0 t). \quad (23)$$

Как известно, узкополосные сигналы представляют собой квазигармонические колебания. Функцию $A(\theta, \varphi, t)$ принято называть синфазной амплитудой узкополосного сигнала $U^\Sigma(\theta, \varphi, t)$ при заданной опорной частоте ω_0 , а функцию $B(\theta, \varphi, t)$ – его квадратурной амплитудой.

Модуль огибающей узкополосного сигнала выражается через синфазную и квадратурную амплитуды сигнала $U^\Sigma(\theta, \varphi, t)$ на входе приёмника:

$$U(\varphi, t) = \sqrt{A^2(\theta, \varphi, t) + B^2(\theta, \varphi, t)}. \quad (24)$$

Сигнал на выходе НЧ-фильтра не будет содержать колебаний с разностной частотой $2\omega_p t$.

Обозначим амплитуду сигнала на выходе фильтра:

$$U_{нч}(\varphi, t) = \sqrt{A^2(\theta, \varphi, t) + B^2(\theta, \varphi, t)} \Big|_{нч}. \quad (25)$$

На выходе НЧ-фильтра получим:

$$\begin{aligned} A^2(\theta, \varphi, t) + B^2(\theta, \varphi, t) &= x^2(\theta, \varphi, t) + y^2(\theta, \varphi, t) + v^2(\theta, \varphi, t) + w^2(\theta, \varphi, t) + \\ &+ 2x(\theta, \varphi, t)y(\theta, \varphi, t) \cos\left(2\psi^{ук} + \psi_1(\theta, \varphi) - \psi_2(\theta, \varphi)\right) + \\ &+ 2x(\theta, \varphi, t)v(\theta, \varphi, t) \cos\left(\psi^{ук} - \psi^{шк} - 2\omega_p t + \psi_1(\theta, \varphi) - \psi_3(\theta, \varphi)\right) + \\ &+ 2x(\theta, \varphi, t)w(\theta, \varphi, t) \cos\left(\psi^{ук} + \psi^{шк} - 2\omega_p t + \psi_1(\theta, \varphi) - \psi_4(\theta, \varphi)\right) + \\ &+ 2y(\theta, \varphi, t)v(\theta, \varphi, t) \cos\left(-\psi^{ук} - \psi^{шк} - 2\omega_p t + \psi_2(\theta, \varphi) - \psi_3(\theta, \varphi)\right) + \\ &+ 2y(\theta, \varphi, t)w(\theta, \varphi, t) \cos\left(-\psi^{ук} + \psi^{шк} - 2\omega_p t + \psi_2(\theta, \varphi) - \psi_4(\theta, \varphi)\right) + \\ &+ 2v(\theta, \varphi, t)w(\theta, \varphi, t) \cos\left(2\psi^{шк} + \psi_3(\theta, \varphi) - \psi_4(\theta, \varphi)\right). \end{aligned} \quad (26)$$

В результате найдем РГМ:

$$\text{РГМ}^\Sigma(\theta, \varphi) = m_1(\theta, \varphi) - m_2(\theta, \varphi), \quad (27)$$

где $m_1(\theta, \varphi) = \frac{M_1(\theta, \varphi)}{M_0(\theta, \varphi)}$; $m_2(\varphi) = \frac{M_2(\theta, \varphi)}{M_0(\theta, \varphi)}$.

Амплитуда $M_1(\theta, \varphi)$ колебания с частотой 90 Гц равна:

$$M_1(\theta, \varphi) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} U(\theta, \varphi, \eta) \cos 3\eta d\eta. \quad (28)$$

Диаграммы направленности антенны курсового радиомаяка ILS на поверхности с поперечным уклоном

Аналогично получим, что амплитуда $M_2(\theta, \varphi)$ колебания с частотой 150 Гц и постоянная составляющая $M_0(\theta, \varphi)$ равны соответственно:

$$M_2(\theta, \varphi) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} U(\theta, \varphi, \eta) \cos 5\eta d\eta, \quad (29)$$

$$M_0(\theta, \varphi) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} U(\theta, \varphi, \eta) d\eta. \quad (30)$$

Диаграммы направленности антенны КРМ при наличии поперечного уклона подстилающей поверхности

Рассмотрим влияние поперечного уклона подстилающей поверхности на примере работы КРМ с 16-элементной линейной неэквилидистантной антенной решёткой. Расстояние излучающих элементов (ИЭ) от центра антенной решётки, АФР токов в ИЭ для сигналов НБЧ и БЧ узкого канала и широкого канала приведены в таблице.

АФР антенны КРМ

№ ИЭ	y – координата, м	НБЧ		БЧ	
		Нормированная амплитуда тока	Начальная фаза тока, °	Нормированная амплитуда тока	Начальная фаза тока, °
Узкий канал					
1	-19,23	0,1377	0	0,6003	-90
2	-16,09	0,2961	0	0,7450	-90
3	-13,13	0,5057	0	0,9605	-90
4	-10,34	0,7113	0	1,0	-90
5	-7,73	0,8764	0	0,8863	-90
6	-5,3	0,9746	0	0,6571	-90
7	-3,04	1,0	0	0,3817	-90
8	-0,95	0,9442	0	0,1118	-90
9	0,95	0,9442	0	0,1118	+90
10	3,04	1,0	0	0,3817	+90
11	5,3	0,9746	0	0,6571	+90
12	7,73	0,87646	0	0,8863	+90
13	10,34	0,7113	0	1,0	+90
14	13,13	0,5057	0	0,9605	+90
15	16,09	0,2961	0	0,7450	+90
16	19,23	0,1377	0	0,6003	+90
Широкий канал					
1	-19,23	0,0252	0	–	–
2	-16,09	–	–	0,0415	+90
3	-13,13	0,0317	180	0,0334	+90
4	-10,34	0,0582	180	0,0621	+90
5	-7,73	0,2036	180	0,0292	-90
6	-5,3	0,0227	180	0,0474	-90
7	-3,04	0,6192	180	0,2411	-90
8	-0,95	1,0	0	1,0	-90
9	0,95	1,0	0	1,0	+90
10	3,04	0,6192	180	0,2411	+90
11	5,3	0,0227	180	0,0474	+90
12	7,73	0,2036	180	0,0292	+90
13	10,34	0,0582	180	0,0621	-90
14	13,13	0,0317	180	0,0334	-90
15	16,09	–	–	0,0415	-90
16	19,23	0,0252	0	–	–

Как видно из таблицы, АФР токов сигналов НБЧ УК и НБЧ ШК является чётной функцией координат излучающих элементов относительно центра АР, а распределение токов сигналов БЧ УК и БЧ ШК является нечётной функцией. Причём токи сигналов БЧ УК (БЧ ШК) сдвинуты по фазе относительно токов НБЧ УК (НБЧ ШК) на 90° . Частота несущей равна 110 МГц. АР расположена на высоте 3 м относительно горизонтальной плоскости. При учёте наклона предположено, что плоскость с поперечным уклоном повёрнута на заданный угол относительно прямой, проходящей через точку O , являющуюся проекцией центра антенны на горизонтальную плоскость. Все расчёты выполнены для меридионального угла $\theta = 87^\circ$ и больших углов (в случае снижения точки наблюдения по глассе). Указанный угол выбран с учётом того, что стандартным углом для захода самолёта на посадку является угол глассы, равный 3° .

Амплитудные ДН АР $|\dot{F}_{\text{нбч}}^{\text{ук}}(\theta, \varphi)|$, $|\dot{F}_{\text{бч}}^{\text{ук}}(\theta, \varphi)|$, $|\dot{F}_{\text{нбч}}^{\text{шк}}(\theta, \varphi)|$ и $|\dot{F}_{\text{бч}}^{\text{шк}}(\theta, \varphi)|$ для сигналов НБЧ и БЧ УК, НБЧ и БЧ ШК приведены на рис. 3, 5, 7, 9 соответственно. Фазовые ДН АР $\psi_1(\theta, \varphi)$, $\psi_2(\theta, \varphi)$, $\psi_3(\theta, \varphi)$ и $\psi_4(\theta, \varphi)$ для упомянутых сигналов приведены на рис. 4, 6, 8, 10.

Амплитудные ДН антенны для сигналов НБЧ УК $|\dot{F}_{\text{нбч}}^{\text{ук}}(\theta, \varphi)|$

Амплитудная ДН для сигналов НБЧ УК при $\alpha = 0$ имеет вид так называемой суммарной ДН (рис. 3).

ДН $|\dot{F}_{\text{нбч}}^{\text{ук}}(\theta, \varphi)|$ имеет при $\alpha = 0$ имеет основной лепесток шириной $4,8^\circ$ на уровне -3 дБ и чётко выраженные боковые лепестки ниже уровня -38 дБ в секторе азимутальных углов от -40° до $+40^\circ$. При наличии небольшого поперечного уклона ширина основного лепестка остаётся практически неизменной, однако максимум ДН смещается на некоторую величину. Структура бокового излучения заметно изменяется.

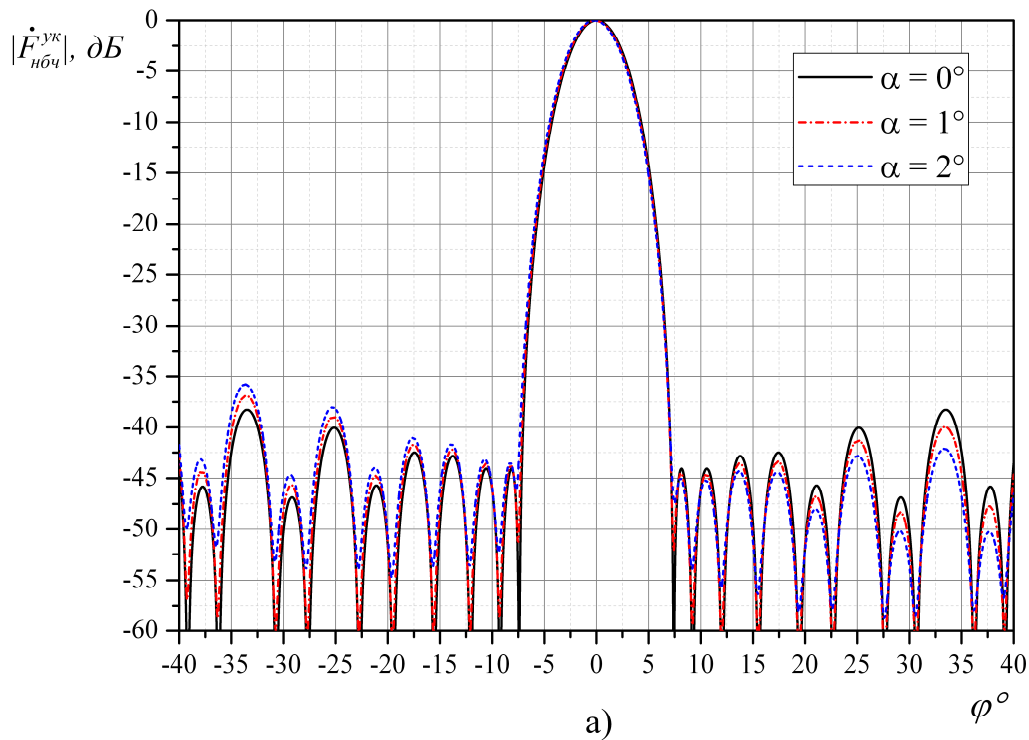


Рис. 3. Амплитудные диаграммы направленности антенны КРМ по сигналу НБЧ УК (см. также с. 13)

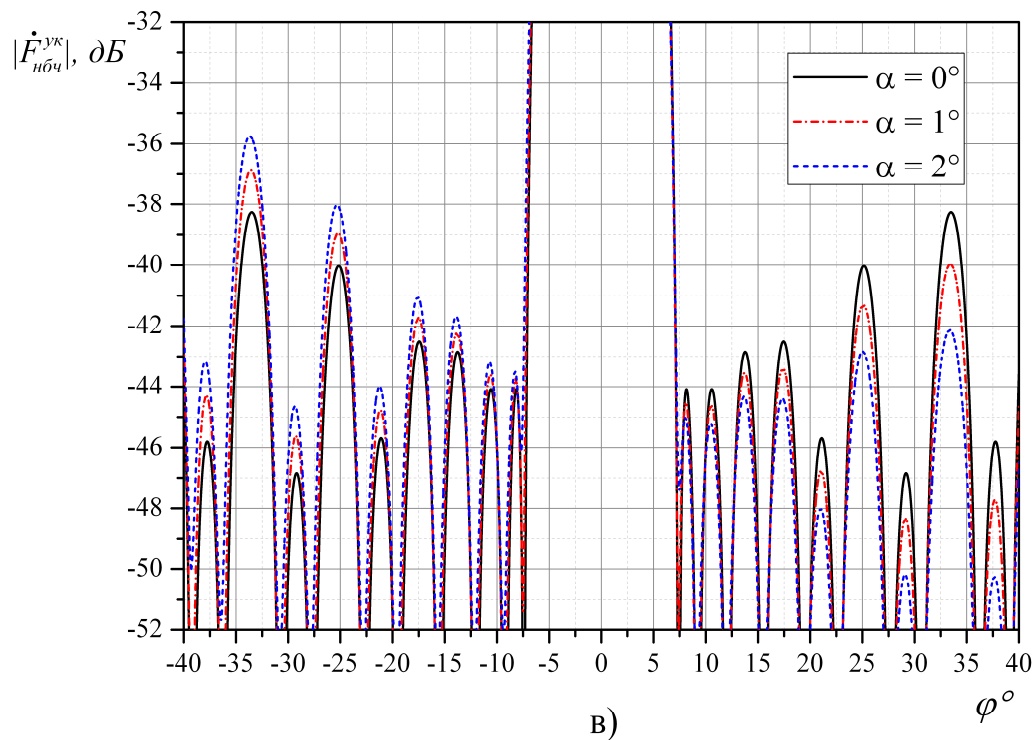
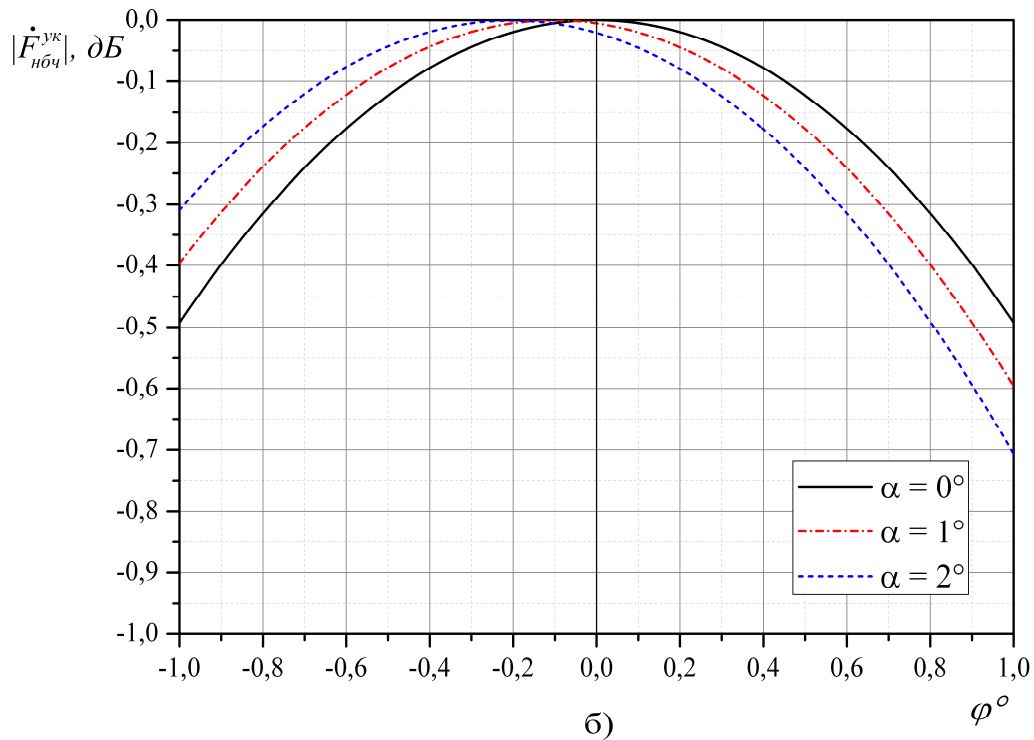


Рис. 3. Окончание

При $\alpha > 0$ ($\alpha < 0$) уровень боковых лепестков в области отрицательных азимутальных углов увеличивается (уменьшается), причём чем большее уклонение от направления $\varphi = 0$, тем на большую величину увеличивается (уменьшается) уровень бокового излучения. Так при $\alpha = 2^\circ$, $\varphi = -34^\circ$ боковой лепесток увеличился на 3 дБ. В области положительных азимутальных углов уровень боковых лепестков, напротив, уменьшается примерно на те же величины, на которые увеличивается уровень боковых лепестков в отрицательной области при соответствующих уклонениях.

При $\alpha < 0$ поведение уровня боковых лепестков в зависимости от азимутальных углов меняется на противоположное. В области $\varphi < 0$ ($\varphi > 0$) уровень боковых лепестков уменьшается (увеличивается).

Фазовые ДН антенны для сигнала НБЧ УК

Фазовая ДН антенны КРМ для сигнала НБЧ УК, представленная на рис. 4, при $\alpha = 0$ имеет вид ступенчатой функции.

В пределах каждого лепестка амплитудной ДН фаза имеет одно и то же значение. В пределах главного лепестка фаза сигнала равна -90° . Равенство фазы -90° объясняется тем, что напряжённость электрического поля формируется реальными источниками и мнимыми источниками, начальные фазы колебаний в которых отличаются от фаз реальных источников на 180° . При переходе из одного лепестка амплитудной ДН в другой фаза изменяется скачком на 180° .

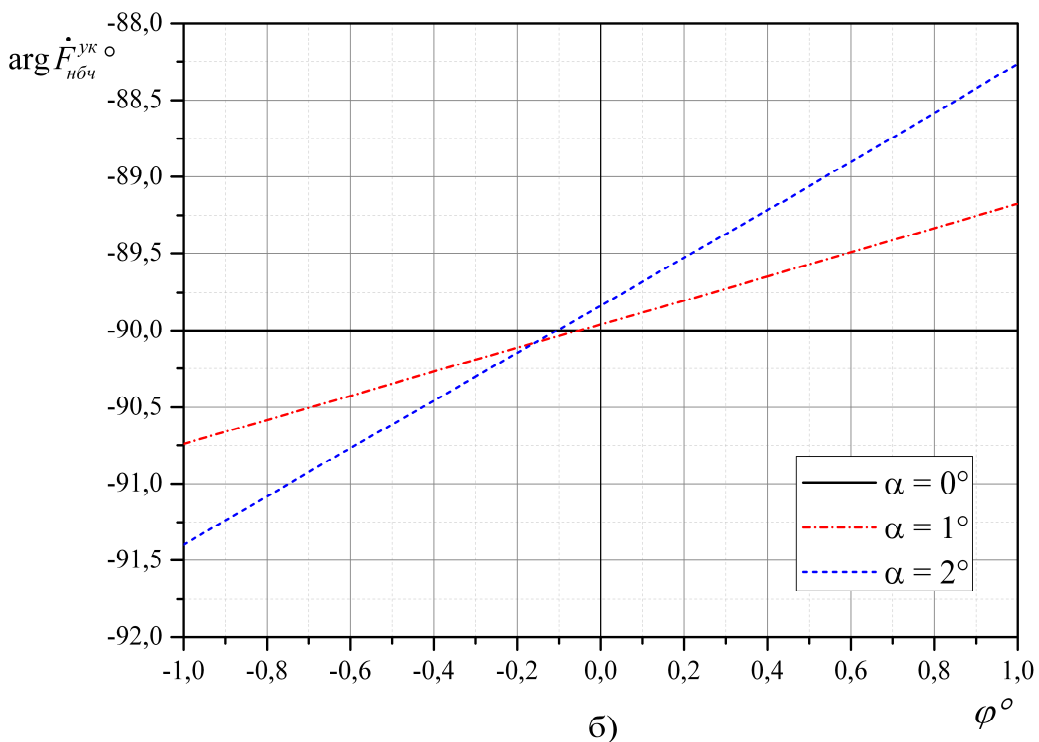
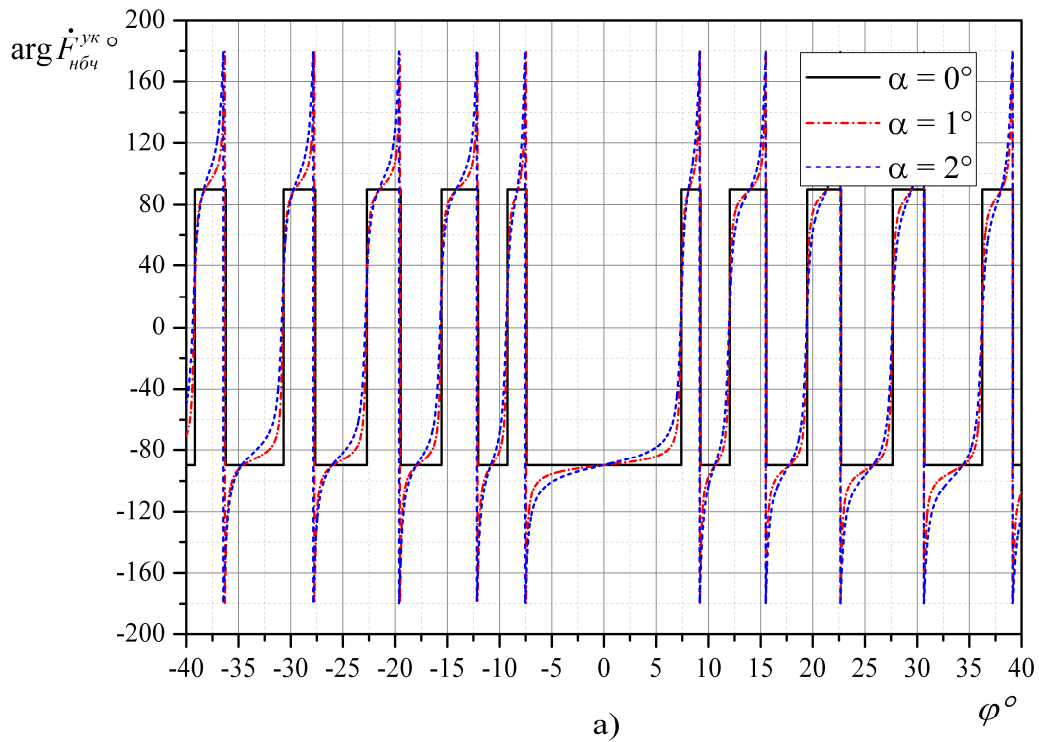


Рис. 4. Фазовые диаграммы направленности антенны КРМ по сигналу НБЧ УК (см. также с. 15)

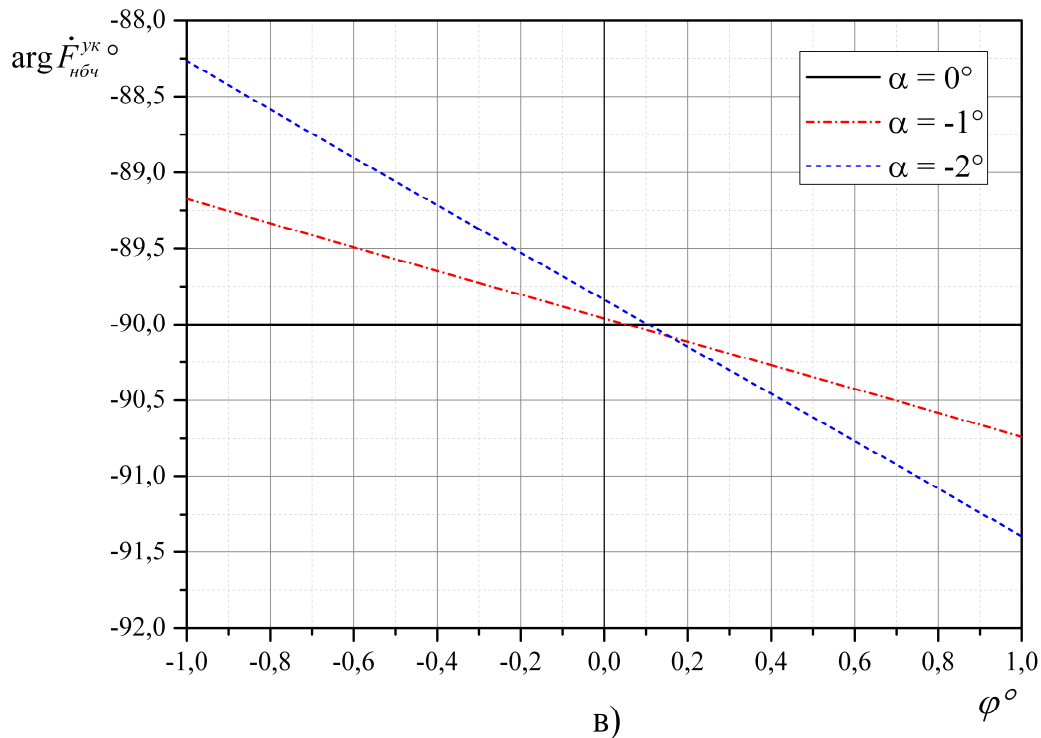


Рис. 4. Окончание

Рассмотрим закономерности в поведении фазовых ДН при положительных значениях угла поперечного уклона. С этой целью перенумеруем лепестки амплитудной ДН. Главный лепесток будем считать нулевым лепестком. Ближайший к нему лепесток в области $\varphi < 0$ назовём первым левым лепестком, следующий за ним – вторым левым лепестком и так далее. Ближайший к главному лепестку боковой лепесток в области $\varphi > 0$ назовём первым правым лепестком, следующий за ним – вторым правым лепестком и так далее. В области $\varphi < 0$ при постепенном переходе из главного лепестка в первый левый лепесток, а также при переходе из каждого чётного лепестка в соседний лепесток с большим номером фаза монотонно уменьшается, стремясь к значению -180° . При переходе через границу лепестка фаза изменяется скачкообразно. При постепенном переходе из нечётного лепестка в чётный лепесток фаза монотонно уменьшается, при этом при переходе через границу лепестков фаза оказывается величиной, близкой к нулевому значению.

В области $\varphi > 0$ поведение фазовой ДН имеет противоположный характер. На рис. 4, в с более крупным масштабом показано поведение фазовой ДН в окрестности $\varphi = 0$. Зависимость фазы ψ_1 от угла φ здесь близка к линейной, причём при $\varphi = 0$ фаза отличается от величины, равной 90° .

При отрицательных значениях угла поперечного наклона α поведение фазовых диаграмм направленности ψ_1 имеет характер, противоположный описанному характеру при положительных значениях α .

Поясним характер поведения фазовой ДН и вид графиков, отображающих фазовую ДН на рисунках на примере антенной решётки, состоящей из двух излучающих элементов.

Пример АР с двумя излучающими элементами

Пусть в свободном пространстве имеется два излучателя, разнесённых друг от друга на расстоянии $2d$. Пусть для определённости амплитуда тока первого излучателя с координатами $(0, d, 0)$ равна единице, а фаза тока равна нулю. Комплексная амплитуда второго излучателя с координатами $(0, -d, 0)$ равна $\dot{\chi}_m = |\dot{\chi}_m| e^{i\phi}$, $|\dot{\chi}_m| < 1$. Тогда в дальней зоне азимутальная составляющая напряжённости электрического поля пропорциональна сумме $\dot{T}(\varphi)$ двух слагаемых

$$\dot{T}(\varphi) = e^{ikd \sin \varphi} + \dot{\chi}_m e^{-ikd \sin \varphi}.$$

$$\begin{aligned} \dot{T}(\varphi) &= e^{ikd \sin \varphi} + |\dot{\chi}_m| e^{i\phi} e^{-ikd \sin \varphi} = e^{i\frac{\phi}{2}} \left[e^{i\left(kd \sin \varphi - \frac{\phi}{2}\right)} + |\dot{\chi}_m| e^{-i\left(kd \sin \varphi - \frac{\phi}{2}\right)} \right] = \\ &= e^{i\frac{\phi}{2}} \left[\cos\left(kd \sin \varphi - \frac{\phi}{2}\right) + i \sin\left(kd \sin \varphi - \frac{\phi}{2}\right) + |\dot{\chi}_m| \cos\left(kd \sin \varphi - \frac{\phi}{2}\right) - i |\dot{\chi}_m| \sin\left(kd \sin \varphi - \frac{\phi}{2}\right) \right] = \\ &= e^{i\frac{\phi}{2}} \left[(1 + |\dot{\chi}_m|) \cos\left(kd \sin \varphi - \frac{\phi}{2}\right) + i(1 - |\dot{\chi}_m|) \sin\left(kd \sin \varphi - \frac{\phi}{2}\right) \right] = e^{i\frac{\phi}{2}} A e^{i\delta}, \end{aligned} \quad (31)$$

где $\operatorname{tg} \delta = \frac{(1 - |\dot{\chi}_m|) \sin\left(kd \sin \varphi - \frac{\phi}{2}\right)}{(1 + |\dot{\chi}_m|) \cos\left(kd \sin \varphi - \frac{\phi}{2}\right)} = \frac{(1 - |\dot{\chi}_m|)}{(1 + |\dot{\chi}_m|)} \operatorname{tg}\left(kd \sin \varphi - \frac{\phi}{2}\right)$.

Найдём производную функции $\delta(\varphi)$, заданной неявно уравнением (32):

$$\begin{aligned} \frac{d(\operatorname{tg} \delta)}{d\delta} \frac{d\delta}{d\varphi} &= \frac{d}{d\varphi} \left[\frac{(1 - |\dot{\chi}_m|)}{(1 + |\dot{\chi}_m|)} \operatorname{tg}\left(kd \sin \varphi - \frac{\phi}{2}\right) \right]; \\ \frac{1}{\cos^2 \delta} \frac{d\delta}{d\varphi} &= \frac{(1 - |\dot{\chi}_m|)}{(1 + |\dot{\chi}_m|)} \frac{1}{\cos^2\left(kd \sin \varphi - \frac{\phi}{2}\right)} kd \cos \varphi. \end{aligned} \quad (32)$$

Как видно из (33), знак производной $\frac{d\delta}{d\varphi}$ определяется знаком множителя $(1 - |\dot{\chi}_m|)$ и знаком $\cos \varphi$.

Следовательно, в пределах переднего полупространства $\left(-\frac{\pi}{2} < \varphi < \frac{\pi}{2}\right)$, $\delta(\varphi)$ при $(1 - |\dot{\chi}_m|) > 0$ является монотонно возрастающей функцией переменной φ . При $(1 - |\dot{\chi}_m|) < 0$ функция $\delta(\varphi)$ является монотонно убывающей функцией переменной φ .

В частном случае, при $|\dot{\chi}_m| = 1$ $\operatorname{tg} \delta = 0$, следовательно, $\delta = N\pi$, где $N = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$. При $|\dot{\chi}_m| = 1$ фазовая диаграмма направленности представляет собой ступенчатую функцию. Тогда в предельном случае при $|\dot{\chi}_m| \rightarrow 1 - 0$ фазовую диаграмму направленности следует представить в виде восходящей лесенки с высотой ступеньки, равной π . При $|\dot{\chi}_m| \rightarrow 1 + 0$ фазовую диаграмму направленности следует представить в виде нисходящей лесенки с высотой ступеньки, равной π .

Так как в формулах используются тригонометрические функции, то целесообразно при отображении аргумента функции $\dot{T}(\varphi)$ в виде графиков прибегать к его отображению в пределах от $-\pi$ до $+\pi$. Тогда при этом соглашении график фазовой ДН будет иметь вид как бы разрывной функции первого рода с величиной скачков 2π .

При этом при $(1 - |\dot{\chi}_m|) > 0$ фаза монотонно возрастает от $-\pi$ до $+\pi$. При $(1 - |\dot{\chi}_m|) < 0$ фаза монотонно убывает от $+\pi$ до $-\pi$.

Амплитудная ДН АР для сигналов БЧ УК $|\dot{F}_{\text{бч}}^{\text{ук}}(\theta, \varphi)|$

Амплитудная ДН АР для сигналов БЧ УК $|\dot{F}_{\text{бч}}^{\text{ук}}(\theta, \varphi)|$ (рис. 5) при $\alpha = 0$ имеет вид так называемой разностной ДН.

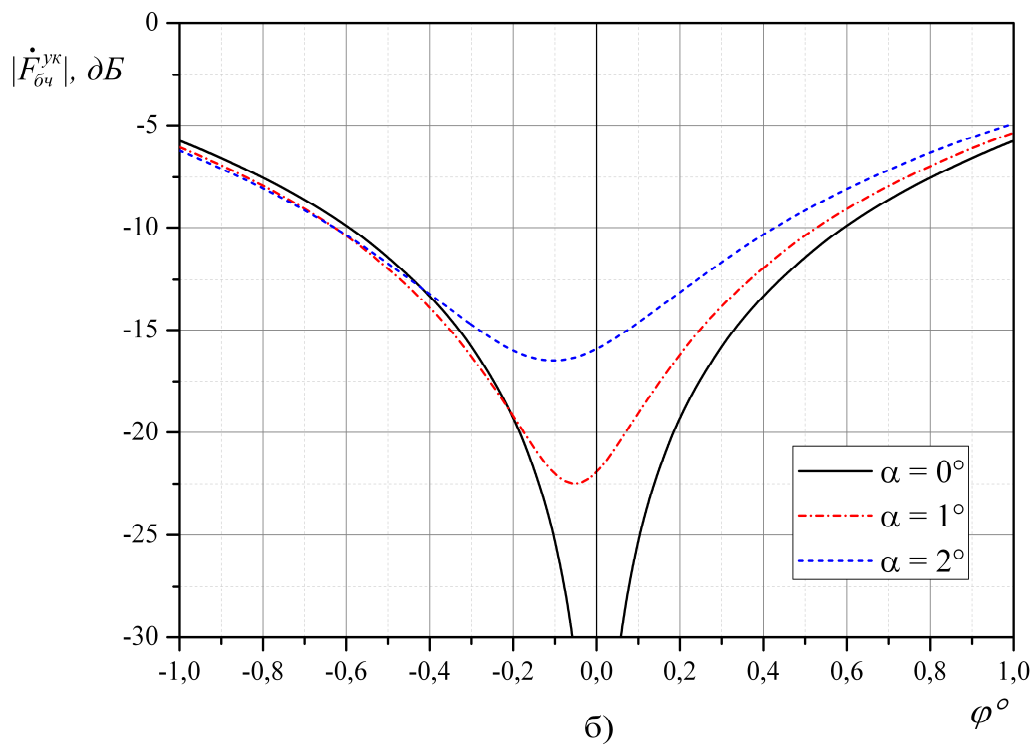
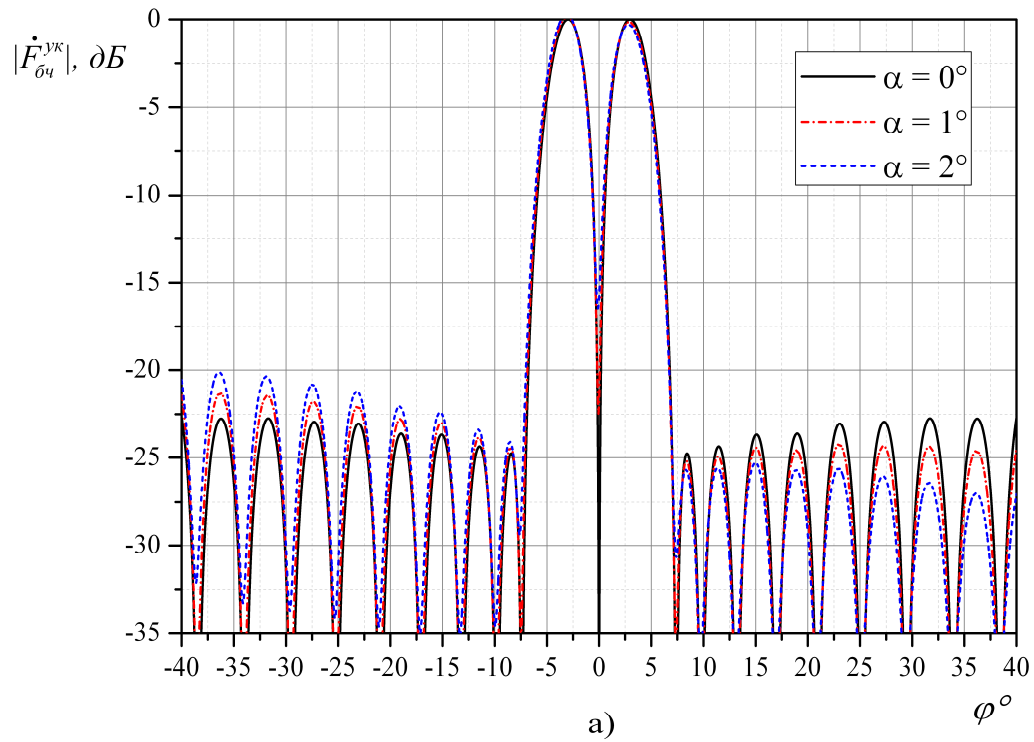


Рис. 5. Амплитудные диаграммы направленности антенны КРМ по сигналу БЧ УК (см. также с. 18)

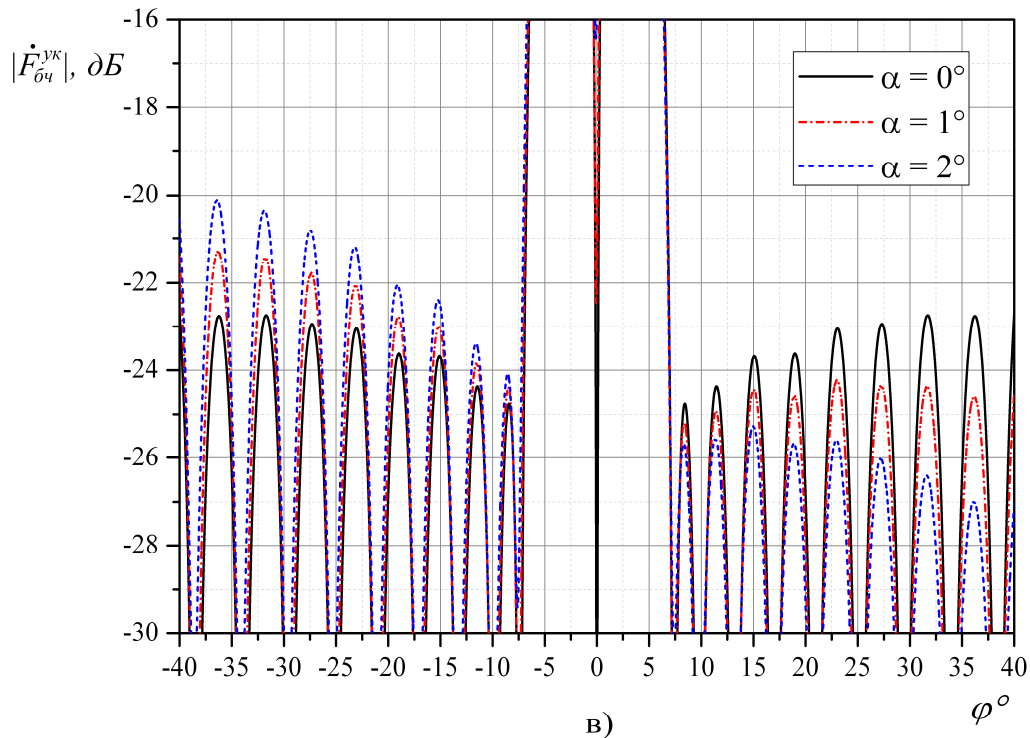


Рис. 5. Окончание

При наличии небольшого поперечного уклона подстилающей поверхности изменяются уровни основных лепестков. Нулевой уровень между основными лепестками «заплывает». Сформированный в результате «заплывания» минимум ДН смещён относительно направления $\varphi = 0$. Смещены внутренние фронты основных лепестков ДН. Изменения в структуре бокового излучения разностной диаграммы направленности аналогичны изменениям структуры бокового излучения суммарной ДН.

При $\alpha > 0$ ($\alpha < 0$) уровень боковых лепестков в области отрицательных азимутальных углов увеличивается (уменьшается); причём чем больше уклонение от направления $\varphi = 0$, тем на большую величину увеличивается (уменьшается) уровень бокового излучения. В области положительных азимутальных углов уровень боковых лепестков, напротив, уменьшается примерно на те же величины, на которые увеличивается уровень боковых лепестков в отрицательной области при соответствующих уклонениях.

При $\alpha < 0$ поведение уровня боковых лепестков в зависимости от азимутальных углов меняется на противоположное.

Фазовые ДН антенны для сигнала БЧ УК

Фазовые ДН антенны КРМ для сигнала БЧ УК, представленные на рис. 6, при $\alpha = 0$, так же, как и фазовые ДН антенны КРМ для сигнала НБЧ УК, имеют вид ступенчатой функции.

В пределах каждого лепестка фаза имеет одно и то же значение. В левом главном лепестке фаза равна $+90^\circ$, в правом главном лепестке фаза равна -90° . В результате в пределах правого главного лепестка разностной ДН величины фазовых ДН сигналов НБЧ и БЧ ψ_1 и ψ_2 равны друг другу, а в пределах левого главного лепестка величины фазовых ДН сигналов НБЧ и БЧ отличаются друг от друга на 180° . Таким образом, при наличии 90° -го сдвига сигналов НБЧ и БЧ на входе антенны в пространстве в области правого главного лепестка разностной ДН сигналы НБЧ и БЧ УК синфазны, а в области левого главного лепестка — противофазны.

При переходе из главного лепестка в боковой лепесток и из одного бокового лепестка в другой боковой лепесток амплитудной ДН БЧ УК фаза скачком изменяется на 180° . Скачок фазы величиной 180° наблюдается при $\varphi = 0$ при переходе из одного главного лепестка в другой главный лепесток.

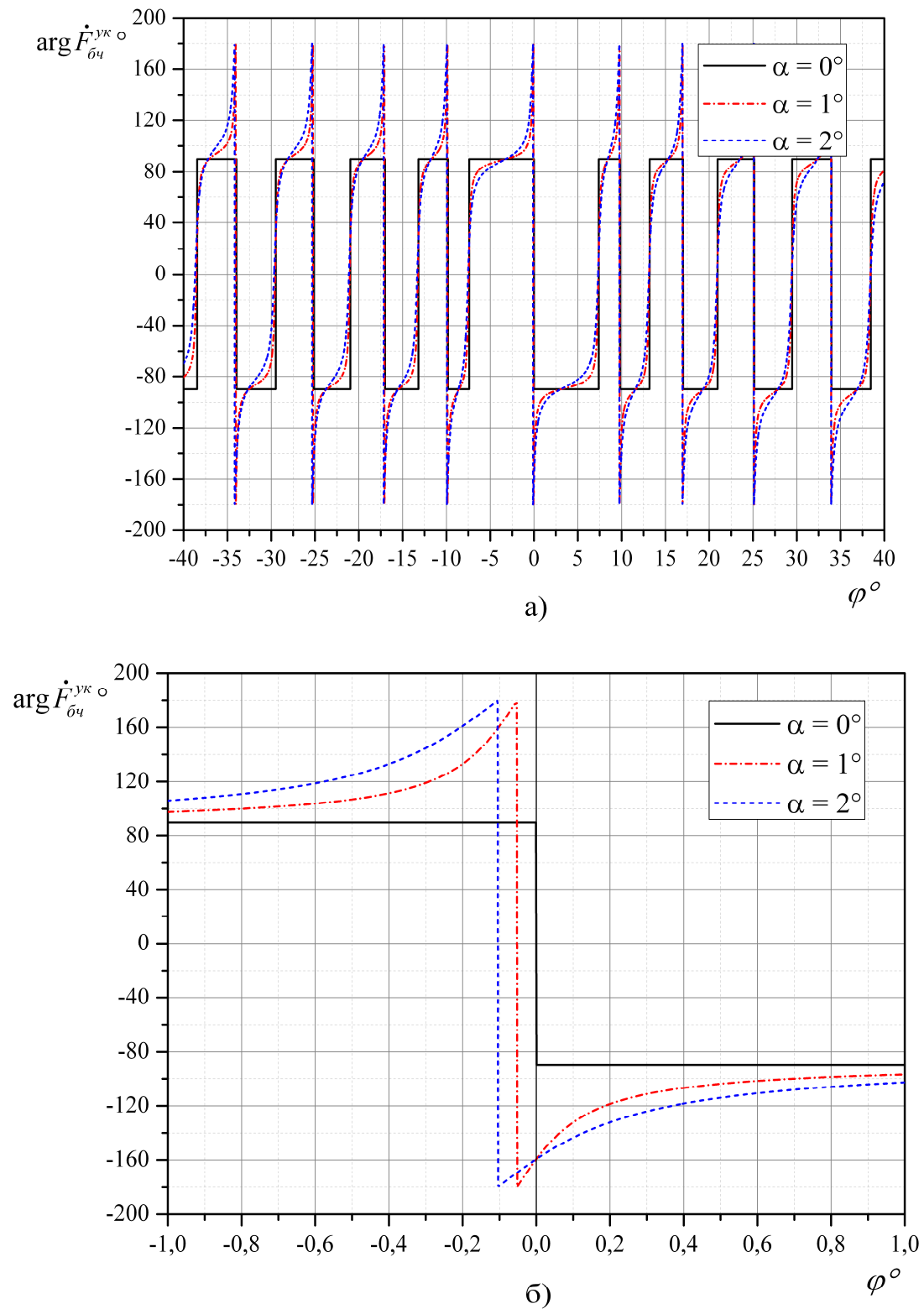


Рис. 6. Фазовые диаграммы направленности антенны КРМ по сигналу БЧ УК (см. также с. 20)

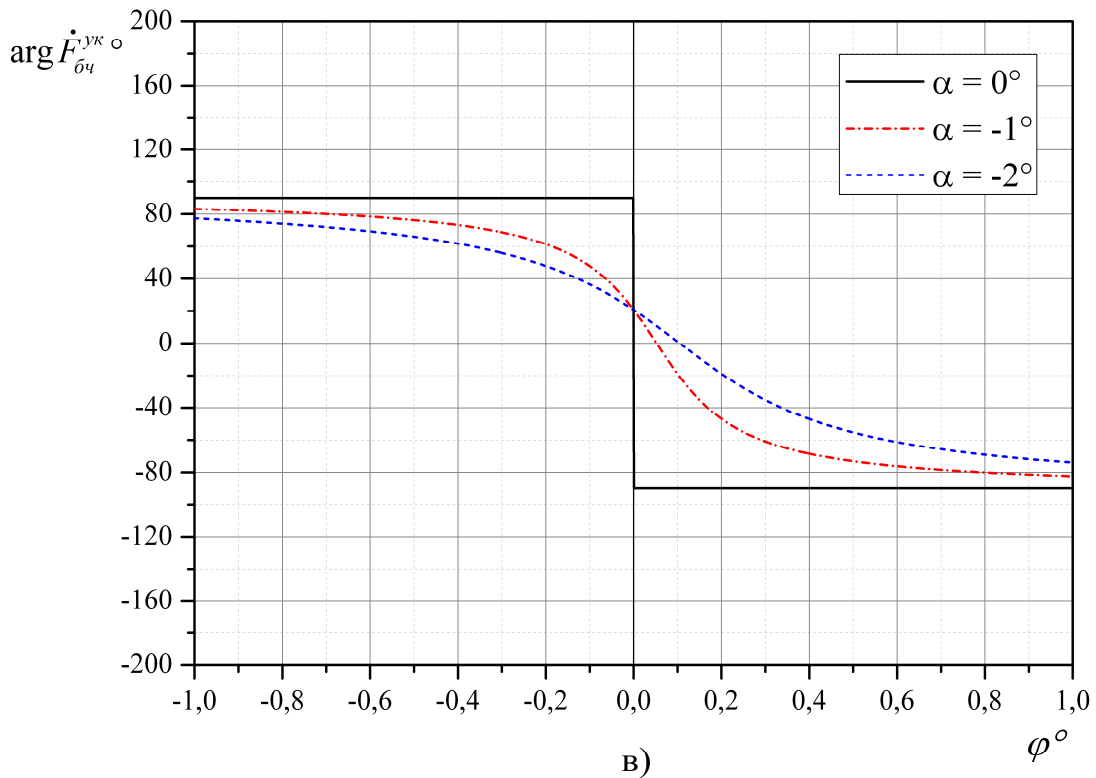


Рис. 6. Окончание

При $\alpha > 0$ переход из одного главного лепестка в другой главный лепесток сопровождается резким всплеском фазы и её скачком на величину, большую 180° . В области отрицательных азимутальных углов переход из четного лепестка в нечётный лепесток осуществляется скачкообразно с величиной скачка более 180° , а переход из нечётного лепестка в чётный происходит плавным образом. Угол φ , при котором происходит переход из одного главного лепестка в другой главный лепесток, с ростом α смещается в область отрицательных значений.

При $\alpha < 0$ переход из одного главного лепестка в другой главный лепесток происходит плавным образом. Характер поведения фазовых ДН при отрицательных значениях угла α противоположен характеру поведения ДН при положительных значениях α . Переход из нечётного лепестка в чётный лепесток осуществляется скачкообразно, с величиной скачка более 180° , а переход из чётного лепестка в нечётный происходит плавным образом. Угол φ , при котором происходит переход из одного главного лепестка в другой главный лепесток, с ростом α смещается в область положительных значений.

Амплитудные ДН НБЧ ШК $|\dot{F}_{нбч}^{шк}(\theta, \varphi)|$

Амплитудная ДН НБЧ ШК (рис. 7) является ДН разностного типа, имеет форму пьедестала с углублением до нулевого уровня при $\varphi = 0$.

При $\alpha = 0$ амплитудная ДН имеет симметричный вид. При наличии поперечного уклона симметрия ДН нарушается.

При $\alpha > 0$ высота левой половины пьедестала увеличивается по сравнению с исходным значением (при $\alpha = 0$), а высота правой половины – уменьшается. Точка минимума углубления смещается на некоторую величину в направлении отрицательных значений азимутального угла.

При $\alpha < 0$ характер поведения амплитудной ДН БЧ ШК меняется на противоположный (на рис. 7 не показано). Высота левой половины пьедестала уменьшается по сравнению с исходной высотой (при $\alpha = 0$), а высота правой половины – увеличивается. Точка минимума углубления смещается на некоторую величину в направлении положительных значений азимутального угла.

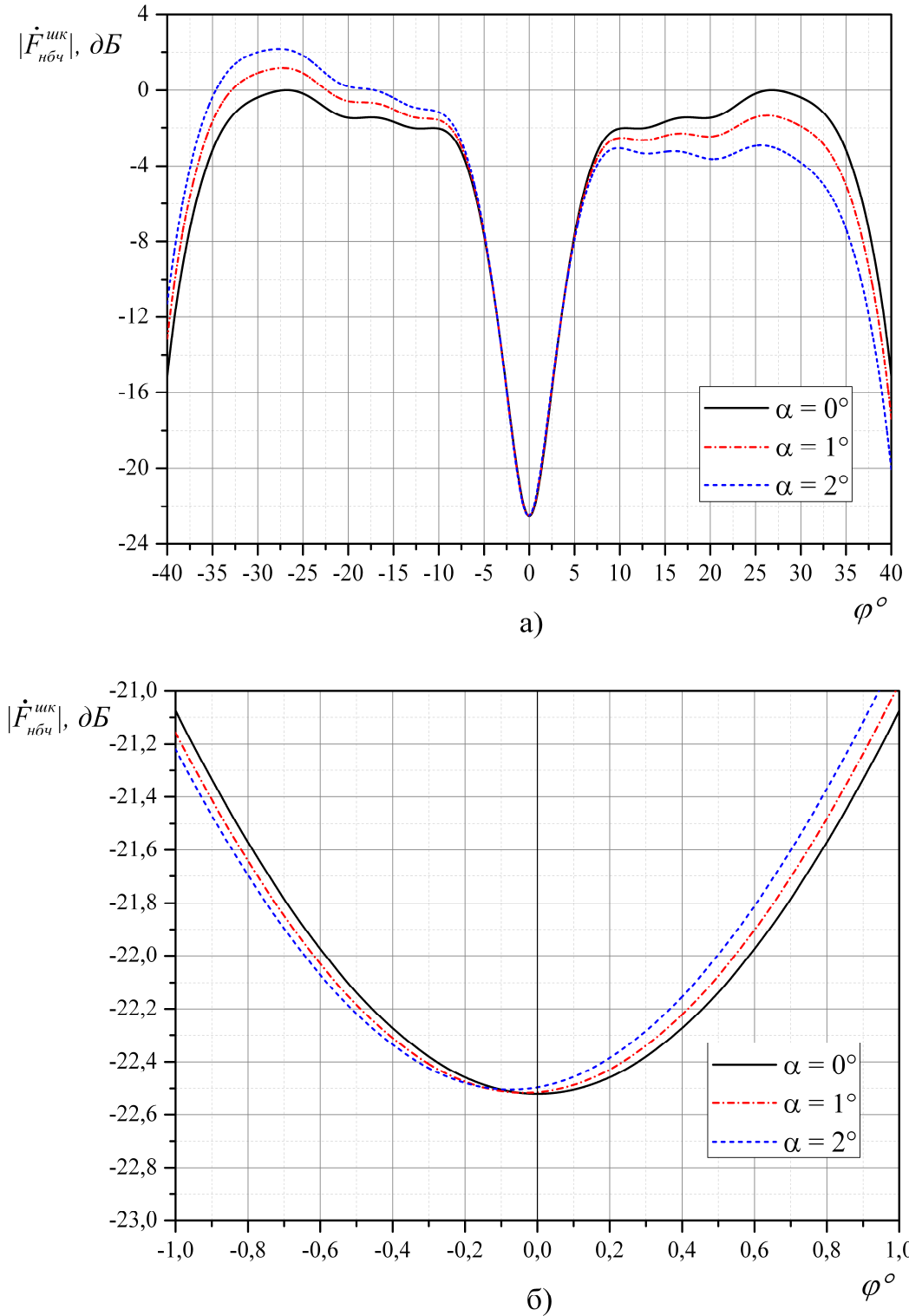


Рис. 7. Амплитудные диаграммы направленности антенны КРМ по сигналу НБЧ ШК

Фазовые ДН НБЧ ШК $\psi_3(\theta, \varphi)$

Фазовая ДН антенны для сигнала НБЧ ШК (рис. 8) при $\alpha = 0$ представляет собой постоянную величину $\psi_3(87^\circ, \varphi) = 90^\circ$.

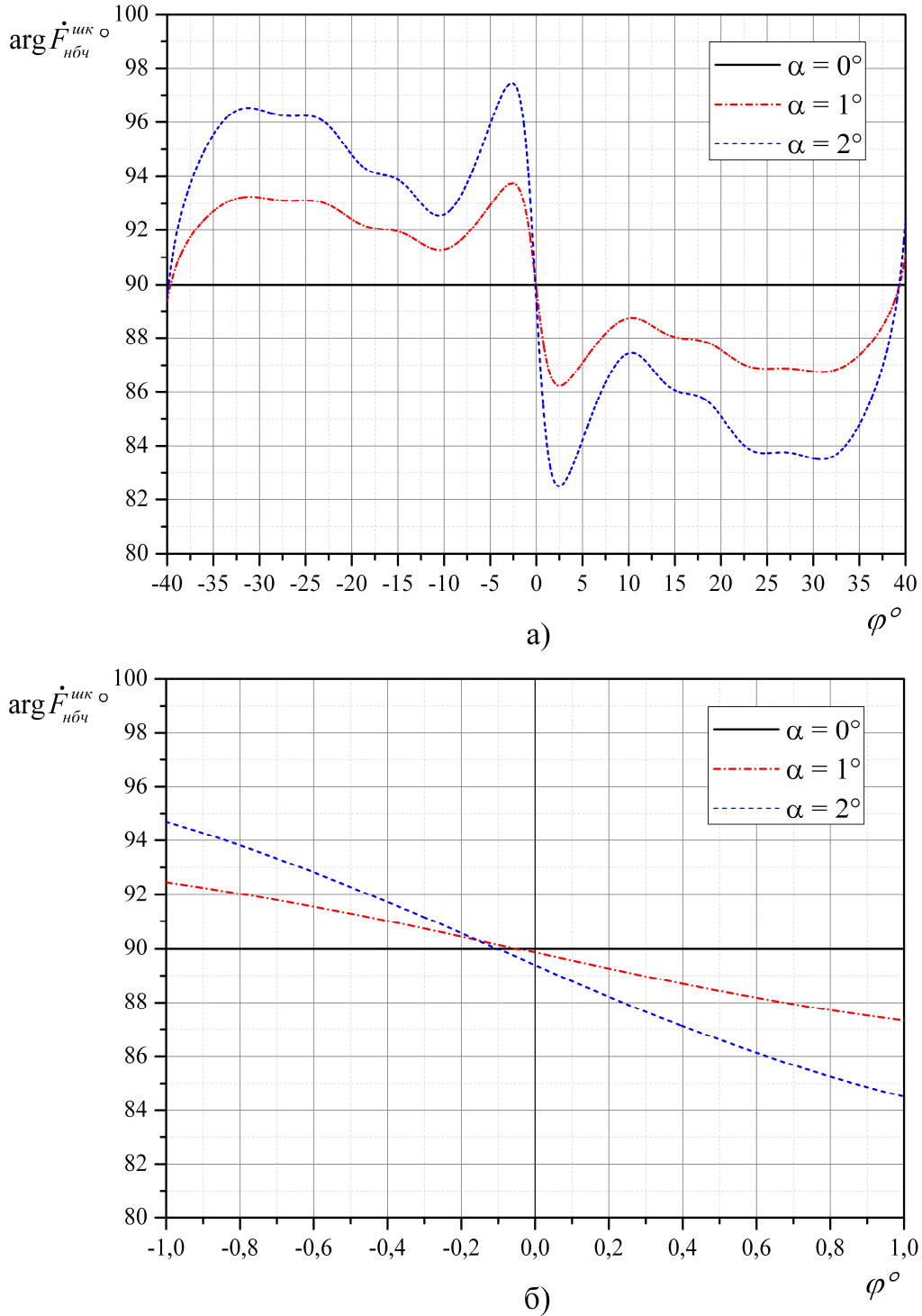


Рис. 8. Фазовые диаграммы направленности антенны КРМ по сигналу НБЧ ШК

При наличии поперечного уклона подстилающей поверхности фазовая ДН уклоняется от указанной величины. В области отрицательных азимутальных углов фаза превышает 90° на некоторую величину. В области положительных азимутальных углов фаза уменьшается относительно 90° на такую же величину.

Амплитудные ДН БЧ ШК $|\dot{F}_{бч}^{шк}(\theta, \varphi)|$

Амплитудные ДН БЧ ШК (рис. 9) также имеют форму пьедестала с углублением в окрестности направления $\varphi = 0$. Однако в амплитудной ДН БЧ ШК провал углубляется до нулевого значения.

Диаграммы направленности антенны курсового радиомаяка ILS на поверхности с поперечным уклоном

При $\alpha = 0$ амплитудная ДН БЧ ШК имеет симметричный вид.

При наличии поперечного уклона $\alpha \neq 0$ симметрия ДН нарушается. «Ноль» в ДН «заплывает» на некоторую небольшую величину.

При $\alpha > 0$ высота левой половины пьедестала увеличивается по сравнению с исходным значением (при $\alpha = 0$), а высота правой половины – уменьшается. Точка минимума углубления смещается на некоторую величину в направлении отрицательных значений азимутального угла.

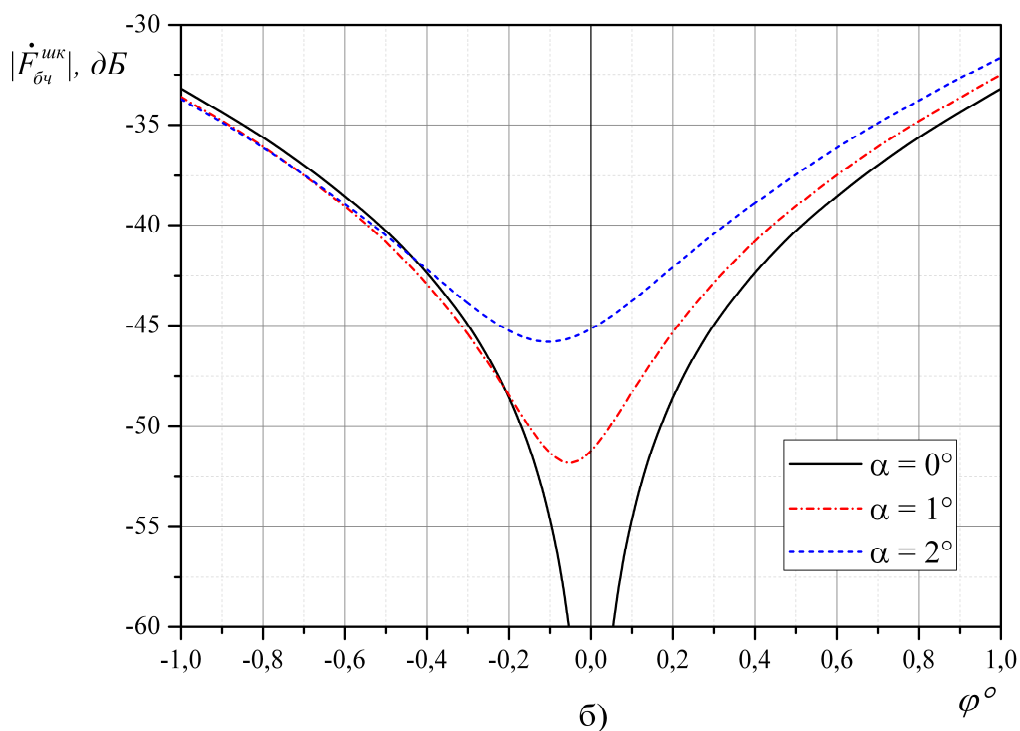
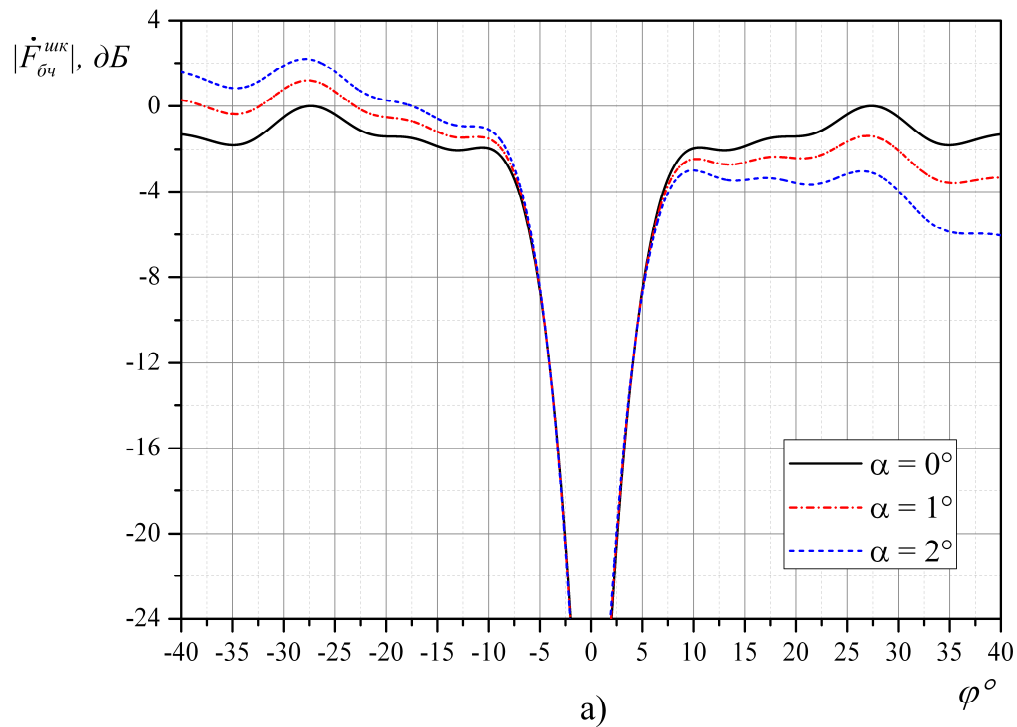


Рис. 9. Амплитудные диаграммы направленности антенны КРМ по сигналу БЧ ШК

При $\alpha < 0$ характер поведения амплитудной ДН БЧ ШК меняется на противоположный (на рис. 9 не показано). Высота левой половины пьедестала уменьшается по сравнению с исходной

высотой (при $\alpha = 0$), а высота правой половины – увеличивается. Точка минимума углубления смещается на некоторую величину в направлении положительных значений азимутального угла.

Фазовые ДН БЧ ШК $\psi_4(\theta, \varphi)$

Фазовая ДН антенны для сигнала БЧ ШК (рис. 10) при $\alpha = 0$ представляет собой ступенчатую функцию с постоянным значением фазы в пределах каждой ступеньки. При $\varphi < 0$ фаза равна -90° , при $\varphi > 0$ фаза равна $+90^\circ$. При $\varphi = 0$ фазовая ДН терпит разрыв.

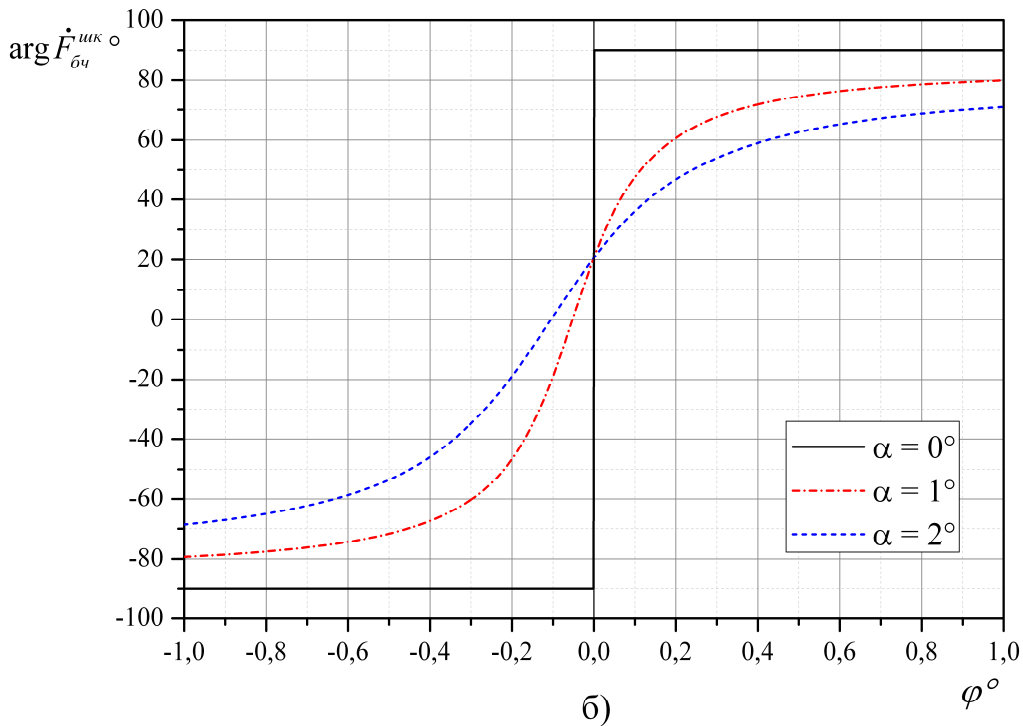
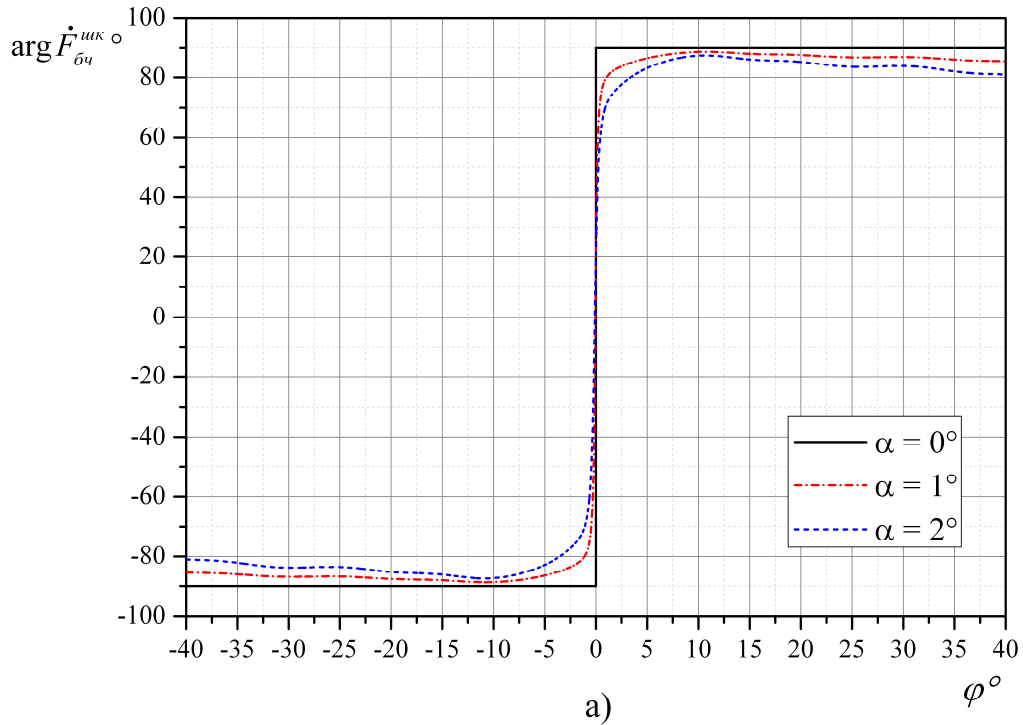


Рис. 10. Фазовые диаграммы направленности антенны КРМ по сигналу БЧ ШК

При наличии поперечного уклона подстилающей поверхности разрыв фазовой ДН устраняется. В области отрицательных азимутальных углов фаза превышает -90° на некоторую величину. В области положительных азимутальных углов фаза уменьшается относительно $+90^\circ$ на такую же величину.

Влияние изменений в амплитудных и фазовых ДН на поведение информационного параметра (разности глубин модуляции) рассматривается в следующей статье авторов в этом журнале.

Выводы

1. При работе антенны КРМ, расположенного на горизонтальной идеально проводящей плоскости, излучающая система, состоящая из реальных источников и мнимых источников, описывающих отражение электромагнитных волн от подстилающей поверхности, имеет фазовый центр. В этом случае амплитудные диаграммы направленности являются чётными функциями относительно начала координат, фазовые ДН имеют вид ступенчатых (разрывных) функций, изменяющих своё значение на 180° при переходе из одного лепестка амплитудной ДН в другой (соседний) лепесток.

2. При наличии поперечного по отношению к оси ВПП уклона подстилающей поверхности излучающая система, состоящая из реальных источников и мнимых источников, не имеет фазового центра. В наиболее неблагоприятных условиях поперечного уклона, встречающихся на аэродромах, в сечении ДН (при угле глиссады 3°):

– максимум амплитудной ДН для сигналов НБЧ УК в азимутальной плоскости смещается на величину порядка $0,2^\circ$;

– заметно изменяется структура бокового излучения, а именно: в области с восходящим поперечным уклоном местности увеличивается уровень боковых лепестков; в области с нисходящим поперечным уклоном уровень бокового излучения уменьшается;

– фазовые ДН для сигналов НБЧ УК имеют над горизонтальной плоскостью ступенчатый вид, при переходе из одного лепестка амплитудной ДН в другой фаза изменяется скачком на 180° ; при наличии положительного уклона подстилающей поверхности в области при постепенном переходе из главного лепестка в первый левый лепесток, а также при переходе из каждого чётного лепестка в соседний лепесток с большим номером фаза монотонно уменьшается, стремясь к значению -180° ; при переходе через границу лепестка ДН фаза изменяется скачкообразно; при постепенном переходе из нечётного лепестка в чётный лепесток фаза монотонно уменьшается, при этом при переходе через границу лепестков фаза оказывается равной примерно 200° ;

– амплитудная ДН АР для сигналов БЧ УК (см. рис. 5) имеет вид так называемой разностной ДН; при наличии поперечного уклона местности нулевой уровень между основными лепестками «заплывает». Сформированный в результате «заплывания» минимум ДН смещён относительно направления $\varphi = 0^\circ$; при $\alpha > 0$ уровень боковых лепестков в области отрицательных азимутальных углов увеличивается; причём чем больше уклонение от направления, тем на большую величину увеличивается уровень бокового излучения. В области положительных азимутальных углов уровень боковых лепестков, напротив, уменьшается примерно на те же величины, на которые увеличивается уровень боковых лепестков в отрицательной области при соответствующих уклонах;

– фазовые ДН антенны КРМ для сигнала БЧ УК, так же как и фазовые ДН антенны КРМ для сигнала НБЧ УК, имеют вид ступенчатой функции;

– амплитудная ДН НБЧ ШК имеет форму пьедестала с некоторым углублением в окрестности направления $\varphi = 0$, при наличии поперечного уклона симметрия ДН нарушается. При $\alpha = 2^\circ$ высота левой половины пьедестала увеличивается по сравнению с исходным значением (при $\alpha = 0^\circ$), а высота правой половины – уменьшается;

– фазовая ДН антенны для сигнала НБЧ ШК при $\alpha = 0^\circ$ представляет собой постоянную величину; при наличии поперечного уклона фазовая ДН имеет в окрестности 0° вид наклонной прямой, причём фаза, равная 90° , смещена относительно указанного направления на величину порядка $0,1^\circ$;

– амплитудные ДН БЧ ШК так же имеют форму пьедестала с углублением в окрестности направления $\varphi = 0$, при наличии поперечного уклона симметрия ДН нарушается. «Ноль» в ДН «за-

плавает» на некоторую небольшую величину. При $\alpha = 2^\circ$ высота левой половины пьедестала увеличивается по сравнению с исходным значением (при $\alpha = 0^\circ$), а высота правой половины – уменьшается. Точка минимума углубления смещается на некоторую величину в направлении отрицательных значений азимутального угла;

– фазовая ДН антенны для сигнала БЧ ШК (см. рис. 7) при $\alpha = 0^\circ$ представляет собой ступенчатую функцию с постоянным значением фазы в пределах каждой ступеньки. При $\varphi < 0$ фаза равна -90° , при $\varphi > 0$ фаза равна $+90^\circ$. При $\varphi = 0$ фазовая ДН терпит разрыв. При наличии поперечного уклона подстилающей поверхности разрыв фазовой ДН устраняется. В области отрицательных азимутальных углов фаза превышает -90° на некоторую величину. В области положительных азимутальных углов фаза уменьшается относительно $+90^\circ$ на такую же величину.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках комплексного проекта «Создание высокотехнологичного производства антенн и аппаратных модулей для двухчастотного радиомаячного комплекса системы посадки метрового диапазона формата ILS III категории ICAO для аэродромов гражданской авиации, включая аэродромы с высоким уровнем снежного покрова и сложным рельефом местности» по договору № 02.G25.31.0046 между Министерством образования и науки Российской Федерации и Открытым акционерным обществом «Челябинский радиозавод «Полёт» в кооперации с головным исполнителем НИОКТР – Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет).

Литература

1. Войтович, Н.И. Моделирование работы двухчастотной системы посадки самолётов / Н.И. Войтович, Б.В. Жданов, А.В. Зотов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2013. – Т. 13, № 4. – С. 55–69.
2. Приложение 10 к Конвенции о международной гражданской авиации. Авиационная электросвязь. Т. 1: Радионавигационные средства. – Монреаль (Канада): ИКАО, 2006. – 606 с.

Зотов Андрей Васильевич, аспирант кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск); tnt1000@mail.ru.

Жданов Борис Викторович, канд. техн. наук, доцент кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск); boris.z@inbox.ru.

Войтович Николай Иванович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоаппаратуры, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск); voytovichni@mail.ru.

Поступила в редакцию 30 августа 2014 г.

ANTENNA PATTERN OF ILS LOCALIZER ON THE SURFACE WITH TRANSVERSE-SLOPE

A.V. Zotov, *South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,*
tnt1000@mail.ru,

B.V. Zhdanov, *South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,*
boris.z@inbox.ru,

N.I. Voytovich, *South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,*
voytovichni@mail.ru

This article presents a generalization of the model localizer antenna that is given in an previously published article (Voytovich N.I., Zhdanov B.V., Zotov A.V. Simulation of the Fwo-Frequency Instrument Landing System, 2013). It's assumed that the antenna array of radiating antenna elements LOC is horizontal and the underlying surface in the essential for the reflection of radio waves field (in the area of the Fresnel zone on the underlying surface) represents a part of a plane with a transverse-slope relative to the direction of the axis of the runway. Radiant system has no phase center due to the lack of axial symmetry of the problem mentioned. Regularities in the behavior of the amplitude and phase of the antenna patterns for course and clearance signals: "carrier plus sideband" and "suppressed carrier sideband only" are founded.

Keywords: antenna, simulation, localizer, slope, terrain.

References

1. Voytovich N.I., Zhdanov B.V., Zotov A.V. [Simulation of the Fwo-Frequency Instrument Landing System]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2013, vol. 13, no. 4, pp. 55–69. (in Russ.)

2. Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation. Vol. 1. Radio Navigation Aids. Montreal (Canada), ICAO, 2006. 606 p.

Received 30 August 2014