



Министерство транспорта и связи Украины  
Государственная администрация связи  
Одесская национальная академия связи им. А. С. Попова

# **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

по выполнению лабораторной работы

## **«Исследование принципов построения и характеристик антенн базовых станций мобильной связи»**

по дисциплине

### **«Системы мобильной связи»**

Модуль 1 — Функциональные устройства  
радиоканала систем мобильной связи

для студентов дневной и заочной форм обучения  
факультетов информационных сетей и  
телекоммуникационных систем

Одесса 2011

УДК 629.396.67

Составитель М.Б. Проценко

Рецензенты: проф. кафедры ТЭД и СРС, д.т.н., проф. ОНАС Цалиев Т.А.;  
доц. кафедры ТЭД и СРС, доц. ОНАС Бойко Н.Ф.;  
старш. препод. кафедры ТЭД и СРС, к.т.н. Нестерук С.В.

Целью методических указаний является помощь студентам при изучении теоретических положений модуля 1 — Функциональные устройства радиоканала систем мобильной связи, темы 1.3 — Антенные устройства базовых и абонентских станций систем мобильной связи, а именно, принципов построения антенн базовых станций мобильной связи в виде панельных антенн, исследовании их характеристик в рамках лабораторного практикума, ознакомление с основными этапами проведения лабораторной работы и особенностями оформления результатов исследования в отчетном протоколе.

Методические указания предназначены для студентов дневной и заочной форм обучения факультетов информационных сетей и телекоммуникационных систем.

Методические указания рассмотрены и утверждены на заседании методического семинара кафедры технической электродинамики и систем радиосвязи (протокол № 1 от 28.09.2010 г.)

## СОДЕЖАНИЕ

1 Общие требования к выполнению лабораторной работы	4
2 Лабораторная работа	4
2.1 Цель работы	4
2.2 Ключевые положения	4
2.3 Ключевые вопросы	15
2.4 Домашнее задание	16
2.5 Лабораторное задание	18
2.6 Описание алгоритма и особенностей программы	19
2.7 Содержание отчета	22
2.8 Рекомендуемая литература	22
Приложение А. Исходные данные для выполнения исследований	23
Приложение Б. Текст программы «Анализ геометрических параметров и характеристик излучения панельных антенн»	24
Приложение В. Образец отчета	28

## **1 ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ**

Содержание выполняемой работы должно быть предварительно изучено на основе методических указаний с привлечением теоретического материала из лекционного курса, соответствующей литературы.

Лабораторная работа выполняется бригадами в составе 2-х — 3-х студентов, каждый из которых выполняет индивидуальное задание.

Отчет составляется каждым студентом и защищается в индивидуальном порядке.

Исходные данные для выполнения заданий исследований выбираются каждым студентом в соответствии с предпоследней (m) и последней (n) цифрами номера зачетной книжки, приведенных в Приложении А.

## **2 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА**

**«Исследование принципов построения и характеристик антенн базовых станций мобильной связи»**

### **2.1 Цель работы**

Целью лабораторной работы является углубление теоретических знаний по теме 1.3 — Антенные устройства базовых и абонентских станций систем мобильной связи и овладение расчетными методиками анализа характеристик излучения панельных антенн базовых станций мобильной связи.

### **2.2 Ключевые положения**

**Структурная схема антенно-фидерного тракта базовой станции мобильной связи, элементы входящие в ее состав**

На рис. 1 изображены типовые (примерные) схемы антенно-фидерных трактов базовых станций мобильной связи, в частности, на рис. 1,а показана схема антенно-фидерного тракта с коллинеарной (всенаправленной) антенной, а на рис.1,б — с панельной (направленной) антенной.

Цифрами на рис. 1 обозначены следующие элементы, входящие в состав базовой станции мобильной связи, точнее ее антенно-фидерного тракта: 1) всенаправленная антенна; 2) направленная антенна; 3) кабельная вставка; 4) главный фидер; 5) грозозащитник; 6) устройство заземления фидера; 7) двухполосный сумматор; 8) приемопередатчик базовой станции.

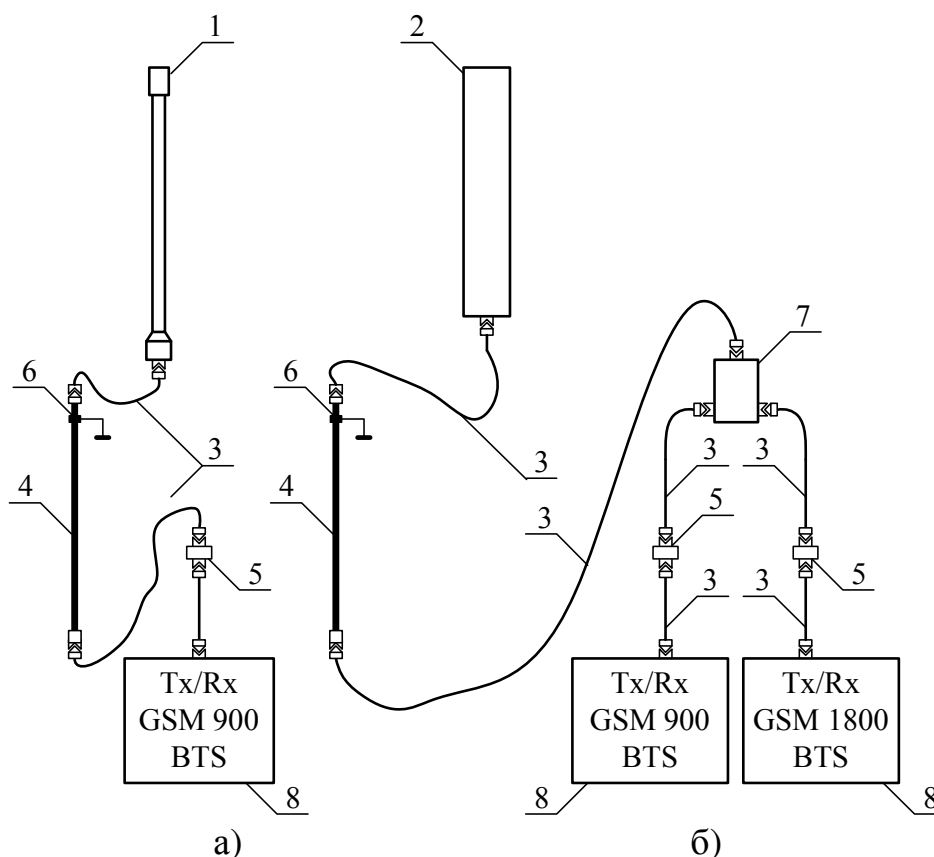


Рисунок 1 — Типовые схемы антенно-фидерного тракта базовых станций мобильной связи

**Антенны** базовых станций мобильной связи выпускаются в двух основных модификациях: **всенаправленные антенны** и **направленные антенны**.

**Всенаправленная антенна** (Omni) базовой станции мобильной связи, представляет собой антенную решетку, состоящую из полуволновых вибраторов, расположенных соосно, так называемая *коллинеарная* антенна. Как правило, полуволновые вибраторы возбуждаются равноамплитудно и синфазно, иногда с запаздыванием по фазе, что обеспечивает наклон главного лепестка диаграммы направленности (ДН) в вертикальной плоскости для оптимизации зоны покрытия. В зависимости от количества полуволновых вибраторов диапазон изменения коэффициентов усиления (КУ) антенн составляет 2,15...11,0 дБи.



**Направленная антенна** базовой станции мобильной связи в виде *панельной* антенны (Panel) представляет собой антенную решетку, состоящую из полуволновых вибраторов, расположенных над металлическим экраном и объединенных с помощью жестких коаксиальных кабелей. В зависимости от типа, антенна имеет один, два, четыре или шесть внешних разъемов, что фактически указывает на число независимых антенн, размещенных в одном корпусе. Модели различаются шириной главного лепестка ДН в горизонтальной плоскости ( $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $105^\circ$  или

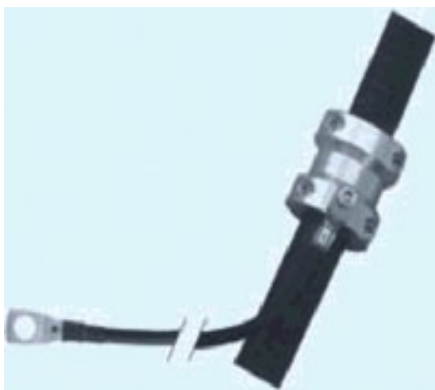
120°), КУ (6,5... 18,5 дБи), а также величиной подводимой мощности (100...500 Вт). В ряде моделей предусмотрен электрический наклон луча (фиксированный или регулируемый), обеспечиваемый соответствующей схемой питания.

Среди последних разработок, особое место занимают панельные антенны с двойной наклонной поляризацией (XPol, XXPol — антенны). Подобные антенны состоят из двух, четырех или шести независимых дипольных систем. На основе таких антенн разработаны многодиапазонные антенны (Multi-band), в частности: двухдиапазонные (Dual-band) на частоты 900/1800 МГц, трехдиапазонные (Triple-band) на частоты 900/1800/2000 МГц.

**Делители (сумматоры) мощности** предназначены для распределения мощности между несколькими антеннами (излучающими элементами) в сложных антенных системах. Они могут быть также использованы для формирования разветвленных кабельных сетей. Делители мощности выпускаются на все требуемые частотные диапазоны, уровни подводимой мощности от 100 до 500 Вт. Известны делители мощности с равным делением (splitter) на 2/3/4 канала и неравным делением на 2 канала (tapper) с потерями на деление 6/10/15 дБ. Конструкции делителей мощности и технология их производства обеспечивают уровень собственных потерь не более 0,05 дБ, а герметичный корпус позволяет использовать их в сложных погодных условиях при температурах  $-60^{\circ}\dots+55^{\circ}\text{C}$ .

**Грозоразрядники** необходимы для защиты оборудования от разряда молнии. Варианты разрядников существенно различаются как по конструкции, так и по принципу действия. Так, в разряднике POLYPHASER установлены диодные вставки, закорачивающие линию при определенных значениях наведенного напряжения. Принцип действия разрядника TERACOM основан на использовании шунтирующего по постоянному току отрезка коаксиальной линии в четверть длины рабочей волны. Разрядники SPINNER представлены в двух модификациях. Первая имеет отрезок шунтирующей линии, а вторая содержит газовую капсулу с инертным газом, который ионизируется под действием импульса высокого напряжения. Все указанные типы разрядников имеют ряд моделей, отличающихся рабочим диапазоном частот, уровнем пропускаемой мощности, предельными величинами пробивного напряжения и тока разряда. Разрядники имеют низкие собственные потери (менее 0,2 дБ) и широкий диапазон рабочих температур  $-40^{\circ}\dots+50^{\circ}\text{C}$ .





**Устройство заземления фидера (заземлитель)** применяется для снятия наведенного статического потенциала с внешнего проводника кабеля, а также для обеспечения эффективной работы грозоразрядника, конструкция которого не предусматривает наличие отдельного заземляющего проводника. Совокупность заземлитель-грозоразрядник наиболее эффективно защищает оборудование от электрических разрядов и статического заряда. Заземлители выпускаются на все диаметры кабелей.

**Радиочастотные коаксиальные кабели**, применяемые в базовых станциях мобильной связи, можно условно разделить на две основные группы: *кабели общего применения* и *особо гибкие*.

**Кабели общего применения** (маркировка RF) обеспечивают передачу радиочастотного сигнала от базовой станции к антенне и обратно. Диаметр кабеля: 3/8", 1/2", 5/8", 7/8", 1 1/4", 1 5/8" и 2 1/4". Кабели характеризуются низким затуханием за счет использования в них вспененного полиэтилена высокой плотности (маркировка HD) и постоянным волновым сопротивлением (50 Ом) в широком диапазоне частот. Внутренний проводник кабеля выполняется из медного провода, медной трубки или алюминиевого провода, покрытого медью. Внешний проводник представляет собой медную гофрированную трубку либо медную ленту, свернутую в спираль. Снаружи внутренний и изнутри внешний проводники покрыты тонкой полиэтиленовой пленкой, а пространство между



проводниками заполнено вспененным полиэтиленом со степенью расширения до 80%. Такая многослойная конструкция дополнительно обеспечивает повышенную влагостойкость. Кабели способны работать в диапазоне температур – 60°...+70°С.

**Особо гибкие кабели** (маркировка RFF) используются в кабельных вставках, соединяющих основной фидер с антенной, либо с оборудованием. Диаметр кабеля также стандартизован: 1/4", 3/8", 1/2", 7/8". В отличие от кабелей общего назначения, в данных кабелях применяется вспененный полиэтилен низкой плотности (маркировка LD), а внешний проводник выполнен из спиралевидной гофры с меньшим шагом. Такое техническое решение позволяет существенно уменьшить минимальный радиус многократного изгиба кабеля и повысить его гибкость.

**Кабельные вставки** применяются для соединения основного фидера с антенной, либо с базовой станцией. Кроме того, вставки демпфируют механические колебания, возникающие под действием погодных факторов, и тем самым снимают механическую нагрузку с разъемов на антенне, главном фидере и базовой станции. Готовые кабельные вставки имеют длину 1,2 и 3 метра, изготавливаются из особо гибкого кабеля с прямыми или угловыми разъемами на концах.



**Коаксиальные разъемы** изготавливаются на все диаметры кабелей общего применения и особо гибких и отличаются соответствующими типами (типа N; 7/16 DIN и др.) Кроме кабельных разъемов, изготавливаются панельные или аппаратные разъемы, используемые в различной аппаратуре, а также



коаксиальные адаптеры для перехода с одного типа разъема на другой. Разъемы характеризуются низким переходным сопротивлением контактов (менее 0,001 Ом), низким относительным уровнем интермодуляционных составляющих (–156 дБ), высокой степенью согласования с кабелем (КСВН не более 1,03), многократностью использования (до 10000 свинчиваний). Разъемы различаются по конструкции, методу сборки и установки их на кабель и способу герметизации. Так, герметизация разъемов SPINNER обеспечивается специальным силиконовым компаундом, который закачивается внутрь разъема в пространство между внешней частью разъема и внешним проводником кабеля, разъемы WISI — компаундом либо термоусадочной трубкой. Разъемы TERACOM не требуют специальной защиты. Кроме того, дополнительные кольца в конструкциях этих разъемов обеспечивают их работоспособность даже при повреждении оболочки кабеля.

### **Конструктивные особенности и характеристики излучения панельных антенн базовых станций мобильной связи**

Панельная антенна представляет собой плоскую антенную решетку с аperiодическим рефлектором (плоским металлическим экраном), в качестве антенных элементов которой часто используются симметричные полуволновые вибраторы (длина симметричного вибратора  $2l = \lambda/2$ , где  $\lambda$  — длина электромагнитной волны).

Эскиз панельной антенны базовой станции мобильной связи изображен на рис. 2. Здесь же поясняются основные геометрические параметры антенны, в частности: количество антенных элементов и расстояние между ними в этаже



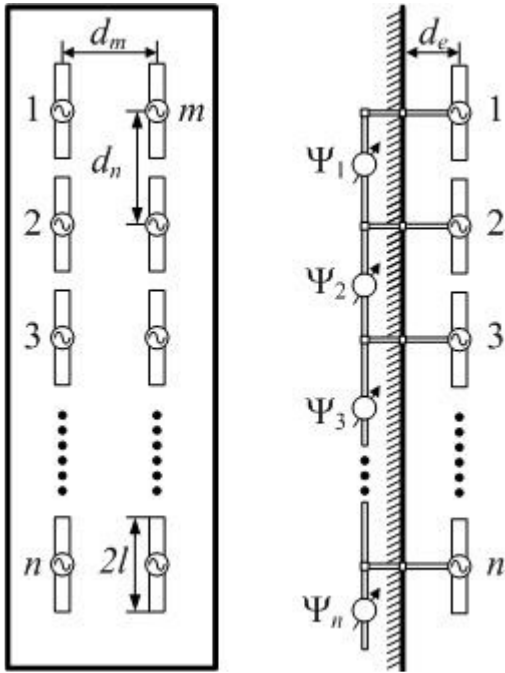


Рисунок 2 — Эскиз панельной антенны базовой станции мобильной связи

обозначено соответственно  $m$  и  $d_m$ ; количество этажей и расстояние между ними обозначено соответственно  $n$  и  $d_n$ ; расстояние от антенных элементов до аperiodического рефлектора (металлического экрана) обозначено переменной  $d_e$ .

Антенные элементы на этаже панельной антенны обычно возбуждаются равноамплитудно и синфазно, а этажи панельной антенны или равноамплитудно и синфазно  $\Psi_1 = \Psi_2 = \Psi_3 = \dots = \Psi_n$ , или равноамплитудно и с линейным фазовым сдвигом  $\Delta\Psi$ . Линейный фазовый сдвиг  $\Delta\Psi = \Psi_1 - \Psi_2 = \Psi_2 - \Psi_3 = \dots$  источников возбуждения позволяет в незначительных пределах изменять направление максимального излучения  $\theta_{\max}$  антенны без существенного изменения формы ее диаграммы направленности (ДН).

Для инженерного (приближенного) расчета и анализа характеристик направленности панельной антенны, в частности, ДН в основных ортогональных плоскостях ( $E$ - и  $H$ -плоскости) можем воспользоваться следующими формулами:

$$f^E(\theta) = f_{\dot{y}\ddot{e}}^E(\theta) f_{\dot{y}\ddot{\delta}}^E(\theta, d_e) f_{\delta\dot{\alpha}\dot{\phi}}^E(\theta, n, d_n, \Delta\Psi) \text{ при } -\pi/2 < \theta < \pi/2, \quad (1)$$

$$f^H(\varphi) = f_{\dot{y}\ddot{e}}^H(\varphi) f_{\dot{y}\ddot{\delta}}^H(\varphi, d_e) f_{\delta\dot{\alpha}\dot{\phi}}^H(\varphi, m, d_m) \text{ при } -\pi/2 < \varphi < \pi/2, \quad (2)$$

где  $f_{\dot{y}\ddot{e}}^E(\theta)$ ,  $f_{\dot{y}\ddot{e}}^H(\varphi)$  — ДН антенного элемента (симметричного вибратора) в ортогональных плоскостях;  $f_{\dot{y}\ddot{\delta}}^E(\theta, d_e)$ ,  $f_{\dot{y}\ddot{\delta}}^H(\varphi, d_e)$  — множители системы, характеризующие влияние аperiodического рефлектора (плоского металлического экрана) на ДН антенной системы в соответствующих ортогональных плоскостях;  $f_{\delta\dot{\alpha}\dot{\phi}}^E(\theta, n, d_n, \Delta\Psi)$ ,  $f_{\delta\dot{\alpha}\dot{\phi}}^H(\varphi, m, d_m)$  — множители решетки в соответствующих ортогональных плоскостях, зависящие от количества антенных элементов, расстояния между ними и фазового сдвига источников возбуждения.

Расположение панельной антенны в соответствующих плоскостях ( $E$ - и  $H$ -плоскости) и отсчет углов  $\theta$  и  $\varphi$  в этих плоскостях поясняется на рис. 3.

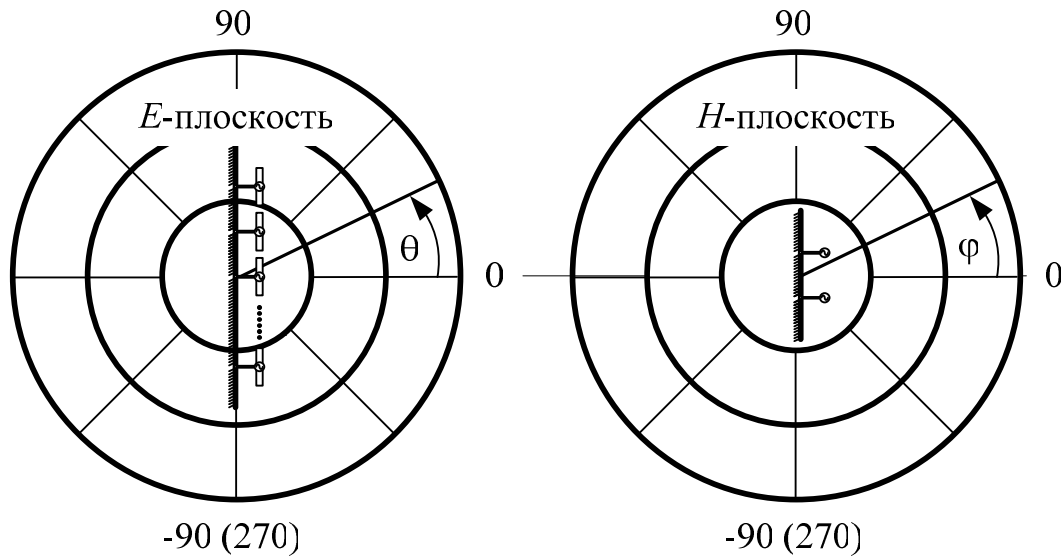


Рисунок 3 — Основные ортогональные плоскости и отсчет углов

ДН симметричного вибратора в  $E$ -плоскости можно вычислить по формуле

$$f_{\text{дн}}^E(\theta) = \left| \frac{\cos(kl \sin \theta) - \cos kl}{\cos \theta} \right|, \quad (3)$$

где  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число свободного пространства; угол  $\theta$  отсчитывается от нормали к антенному элементу (см. рис. 3).

При  $2l = \lambda/2$  значение  $kl = \pi/2$  и выражение (3) преобразуется к виду

$$f_{\text{дн}}^E(\theta) = \left| \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin \theta\right)}{\cos \theta} \right|. \quad (4)$$

При  $\theta = \pm \pi/2$  выражение (4) равно

$$f_{\text{дн}}^E\left(\pm \frac{\pi}{2}\right) = \left| \frac{0}{0} \right| \equiv 0.$$

ДН симметричного вибратора в  $H$ -плоскости можно вычислить по формуле

$$f_{\text{дн}}^H(\varphi) = |1 - \cos kl|. \quad (5)$$

При  $2l = \lambda/2$  выражение (5) преобразуется к виду

$$f_{\dot{y}\ddot{e}}^H(\varphi) = 1, \quad (6)$$

то есть ДН симметричного вибратора в  $H$ -плоскости не зависит от угловой переменной  $\varphi$ .

Для вычисления множителей системы, характеризующих влияние аperiодического рефлектора (плоского металлического экрана), будем считать, что размеры экрана достаточно большие, а это в свою очередь позволяет воспользоваться методом зеркальных изображений и рассмотреть антенный элемент с экраном как двухэлементную антенную решетку с противофазным возбуждением элементов, расположенных на расстоянии  $2d_e$  друг от друга. Исключая промежуточные преобразования, получаем выражения для расчета множителя системы в соответствующих ортогональных плоскостях

$$f_{\dot{y}\ddot{e}\delta}^E(\theta, d_e) = |\sin(kd_e \cos \theta)|; \quad (7)$$

$$f_{\dot{y}\ddot{e}\delta}^H(\varphi, d_e) = |\sin(kd_e \cos \varphi)|. \quad (8)$$

При  $d_e = \lambda/4$  значение  $kd_e = \pi/2$  и выражения (7) и (8) преобразуется к виду

$$f_{\dot{y}\ddot{e}\delta}^E\left(\theta, d_e = \frac{\lambda}{4}\right) = \left| \sin\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right) \right|; \quad (9)$$

$$f_{\dot{y}\ddot{e}\delta}^H\left(\varphi, d_e = \frac{\lambda}{4}\right) = \left| \sin\left(\frac{\pi}{2} \cos \varphi\right) \right|. \quad (10)$$

Множители решетки с учетом равноамплитудного с линейным фазовым сдвигом  $\Delta\Psi$  возбуждения в  $E$ -плоскости и равноамплитудного синфазного возбуждения антенных элементов в  $H$ -плоскости можно вычислить по формулам

$$f_{\delta\dot{\alpha}\delta}^E(\theta, n, d_n, \Delta\Psi) = \left| \frac{\sin\left[\frac{n(kd_n \sin \theta - \Delta\Psi)}{2}\right]}{n \sin\left[\frac{kd_n \sin \theta - \Delta\Psi}{2}\right]} \right|; \quad (11)$$

$$f_{\delta\alpha\phi}^H(\varphi, m, d_m) = \left| \frac{\sin\left[\frac{m(kd_m \sin \varphi)}{2}\right]}{m \sin\left[\frac{kd_m \sin \varphi}{2}\right]} \right|. \quad (12)$$

В случае, когда расстояние между этажами плоской антенной решетки  $d_n = \lambda/2$  значение  $kd_n = \pi$  и выражение (11) можно представить в следующем виде

$$f_{\delta\alpha\phi}^E\left(\theta, n, d_n = \frac{\lambda}{2}, \Delta\Psi\right) = \left| \frac{\sin\left[\frac{n(\pi \sin \theta - \Delta\Psi)}{2}\right]}{n \sin\left[\frac{\pi \sin \theta - \Delta\Psi}{2}\right]} \right|. \quad (13)$$

Взаимосвязь между направлением максимального излучения и линейным фазовым сдвигом возбуждающих источников определяется выражением

$$\Delta\Psi = kd_n \sin \theta_{\max} \quad (14)$$

или с учетом  $d_n = \lambda/2$ ,  $kd_n = \pi$

$$\Delta\Psi = \pi \sin \theta_{\max}. \quad (15)$$

При  $m = 2$  (два антенных элемента в этаже) выражение (12) можно преобразовать к виду

$$f_{\delta\alpha\phi}^H(\varphi, m = 2, d_m) = \left| \cos\left(\frac{kd_m \sin \varphi}{2}\right) \right|. \quad (16)$$

Таким образом с учетом приведенных формул (3) — (16) выражения (1) и (2) можно представить в виде

$$f^E(\theta) = \left| \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin \theta\right)}{\cos \theta} \right| \left| \sin\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right) \right| \left| \frac{\sin\left[\frac{n(\pi \sin \theta - \Delta\Psi)}{2}\right]}{n \sin\left[\frac{\pi \sin \theta - \Delta\Psi}{2}\right]} \right|, \quad (17)$$

$$f^H(\varphi, d_m) = \left| \sin\left(\frac{\pi}{2} \cos \varphi\right) \right| \left| \cos\left(\frac{kd_m \sin \varphi}{2}\right) \right|, \quad (18)$$

при  $-\pi/2 < \theta < \pi/2$  и  $-\pi/2 < \varphi < \pi/2$ .

В формулах (17) и (18) учтено, что длина антенного элемента (симметричного вибратора)  $2l = \lambda/2$ , расстояние до аperiodического рефлектора (плоского металлического экрана)  $d_e = \lambda/4$ , расстояние между этажами плоской антенной решетки  $d_n = \lambda/2$ , количество антенных элементов в этаже  $m = 2$ .

При анализе ДН антенны часто используют параметры, определяющие ширину главного лепестка ДН по уровню половинной мощности в соответствующих ортогональных плоскостях  $2\Delta\theta_{0,707}$  и  $2\Delta\varphi_{0,707}$ . Так как ДН антенны обычно изображают в виде угловой зависимости амплитуды напряженности электромагнитного поля, то уровень половинной мощности соответствует значению 0,707 от максимальной амплитуды напряженности электрического поля. В логарифмическом масштабе уровень половинной мощности соответствует значению  $-3$  дБ от максимальной амплитуды напряженности электромагнитного поля.

Для инженерного (приближенного) расчета КУ антенны (будем считать, что потери в антенне отсутствуют, то есть КПД антенны равен единице и соответственно КУ равен коэффициенту направленного действия) можем воспользоваться следующей формулой

$$G = G_{y\bar{e}} G_{y\bar{e}d} G_{\bar{d}\bar{a}\bar{o}}^A(n, d_n) G_{\bar{d}\bar{a}\bar{o}}^H(m, d_m), \quad (19)$$

где  $G_{y\bar{e}}$  — КУ антенного элемента (симметричного вибратора);  $G_{y\bar{e}d}$  — парциальный КУ, учитывающий влияние аperiodического рефлектора (плоского металлического экрана);  $G_{\bar{d}\bar{a}\bar{o}}^A(n, d_n)$ ,  $G_{\bar{d}\bar{a}\bar{o}}^H(m, d_m)$  — парциальные КУ плоской антенной решетки в соответствующих ортогональных плоскостях.

При  $2l = \lambda/2$

$$G_{y\bar{e}} = 1,64 \text{ (2,15 дБи)}. \quad (20)$$

Предполагая, что размеры экрана достаточно большие относительно длины волны  $\lambda$ , экран плоский высокопроводящий

$$G_{y\bar{e}d} = 2,0 \text{ (3,01 дБи)}. \quad (21)$$

Парциальные КУ плоской антенной решетки в соответствующих ортогональных плоскостях можно вычислить по формулам

$$G_{\bar{d}\bar{a}\bar{o}}^A(n, d_n) = \frac{n^2}{n + 2 \sum_{i=1}^{n-1} (n-i) \frac{\sin i kd_n}{i kd_n}}; \quad (22)$$

$$G_{\text{дд}\phi}^H(m, d_m) = \frac{m^2}{m + 2 \sum_{i=1}^{m-1} (m-i) \frac{\sin i kd_m}{i kd_m}}. \quad (23)$$

где  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число свободного пространства.

При  $d_n = d_m = \lambda/2$  значение аргумента синуса  $kd_n = kd_m = \pi$  и формулы (22), (23) упрощаются к виду

$$G_{\text{дд}\phi}^A\left(n, d_n = \frac{\lambda}{2}\right) = n; \quad (24)$$

$$G_{\text{дд}\phi}^H\left(m, d_m = \frac{\lambda}{2}\right) = m. \quad (25)$$

Для случая, когда количество антенных элементов в этаже  $m = 2$  и элементы располагаются на произвольном расстоянии  $d_m$  друг от друга выражение (23) преобразуется к виду

$$G_{\text{дд}\phi}^H(m = 2, d_m) = \frac{2}{1 + \frac{\sin kd_m}{kd_m}}. \quad (26)$$

Таким образом с учетом приведенных формул (20) — (26) выражение (19) можно представить в виде

$$G(n, d_m) = 1,64 \cdot 2 \cdot n \cdot \frac{2}{1 + \frac{\sin kd_m}{kd_m}}. \quad (27)$$

или

$$G(n, d_m) = 2,15 + 3,01 + 10 \cdot \lg n + 10 \cdot \lg \frac{2}{1 + \frac{\sin kd_m}{kd_m}}, \text{ дБи.} \quad (28)$$

В формулах (27) и (28) также учтено, что длина антенного элемента (симметричного вибратора)  $2l = \lambda/2$ , расстояние до апериодического рефлектора (плоского металлического экрана)  $d_e = \lambda/4$ , расстояние между этажами плоской антенной решетки  $d_n = \lambda/2$ , количество антенных элементов в этаже  $m = 2$ .

Для вычисления КУ произвольной антенны (также с учетом КПД = 1) известна общая формула вида

$$G = \frac{4\pi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} f^2(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi}, \quad (29)$$

однако при непосредственном использовании формулы (29) особую математическую сложность представляет определение пространственной характеристики направленности антенны по мощности  $f^2(\theta, \varphi)$ .

С учетом дополнительных упрощений и преобразований выражение (29) может быть приведено к виду

$$G = \frac{4\pi}{2\Delta\theta_{0,707} 2\Delta\varphi_{0,707}} \quad (30)$$

или

$$G = 10 \log \frac{4\pi}{2\Delta\theta_{0,707} 2\Delta\varphi_{0,707}} \text{ дБи}, \quad (31)$$

где численные значения ширины главного лепестка ДН в основных ортогональных плоскостях  $2\Delta\theta_{0,707}$  и  $2\Delta\varphi_{0,707}$  необходимо подставлять в радианах.

### 2.3 Ключевые вопросы

Вопросы для допуска к лабораторной работе:

1. Кратко поясните схему антенно-фидерного тракта базовой станции мобильной связи, включая входящие в ее состав элементы.
2. Поясните конструктивные отличия и особенности характеристик направленности коллинеарных и панельных антенн, применяемых в составе базовых станций мобильной связи.
3. Поясните назначение и особенности делителей (сумматоров) мощности.
4. Поясните назначение и особенности грозоразрядников и заземлителей кабеля.
5. Поясните назначение и особенности радиочастотных коаксиальных кабелей (кабелей общего назначения и особо гибких кабелей).
6. Поясните назначение и особенности кабельных вставок и коаксиальных разъемов.

Вопросы к защите лабораторной работы:

1. Запишите инженерную формулу для вычисления ДН панельной антенны в вертикальной плоскости ( $E$ -плоскость). Поясните каждый из множителей.
2. Запишите инженерную формулу для вычисления ДН панельной антенны в горизонтальной плоскости ( $H$ -плоскость). Поясните каждый из множителей.

лей.

3. Поясните зависимость ширины главного лепестка ДН от относительных размеров антенны, количества элементов и относительного расстояния между ними.

4. Поясните зависимость направления максимального излучения антенны от линейного фазового сдвига источников возбуждения элементов и от относительного расстояния между ними.

5. Поясните взаимосвязь КУ панельной антенны с ее относительными размерами, шириной главного лепестка ДН.

Вопросы повышенной сложности\*:

1. Выведите формулу (7) или (8).
2. Выведите формулу (11) или (12).
3. Выведите формулу (16).
4. Выведите формулу (22) или (23).
5. Выведите формулу (30).

\*Обоснованный ответ на любой вопрос повышенной сложности засчитывается как выполнение и защита лабораторной работы с максимальным баллом.

## 2.4 Домашнее задание

1. Изучите теоретические положения (ключевые положения), используя методические указания, конспект лекций и рекомендованную литературу.

2. Подготовьте ответы на ключевые вопросы (вопросы для допуска к лабораторной работе).

3. Подготовьте макет отчета (образцы титульного листа и содержания протокола приведены в Приложении В).

4. Изучите алгоритм и особенности программы.

5. Решите задачу (результат решения задачи относится к исходным данным для выполнения лабораторной работы).

6. Ознакомьтесь с содержанием каталога фирмы KATHREIN (электронный вариант данного каталога прилагается к электронному варианту методических указаний, а также находится в распечатанном виде в лаборатории).

**Задача.** Определите требуемый коэффициент усиления (КУ) антенны базовой станции мобильной связи  $G_{\text{БС}}$  при заданной дальности  $D$  и заданном запасе на замирание  $L_{\text{зам}}$ . Численные значения  $D$  и  $L_{\text{зам}}$  выбрать из табл. А1 «Исходные данные к домашнему заданию» (см. Приложение А).

**Методические рекомендации к решению задачи.** Мощность сигнала на входе приемника абонентской станции мобильной связи определяется согласно выражения



$$P_{\text{ào } \lambda \tilde{N}} = \frac{P_{\text{ào } \tilde{A} \tilde{N}} G_{\tilde{A} \tilde{N}} G_{\tilde{A} \tilde{N}}}{L_{\tilde{A} \tilde{N}} L_{\tilde{A} \tilde{N}} L_{\tilde{n} \tilde{a}} L_{\tilde{\varsigma} \tilde{a} \tilde{i}}}, \quad (32)$$

где  $P_{\text{ào } \tilde{A} \tilde{N}}$ ,  $P_{\text{ào } \lambda \tilde{N}}$  — мощности сигнала на выходе передатчика базовой станции и на входе приемника абонентской станции мобильной связи, соответственно, Вт (или мВт — милливатт);  $G_{\tilde{A} \tilde{N}}$ ,  $G_{\tilde{A} \tilde{N}}$  — КУ антенн базовой и абонентской станции мобильной связи, соответственно (безразмерные величины);  $L_{\tilde{A} \tilde{N}} L_{\tilde{A} \tilde{N}}$  — ослабление сигнала за счет потерь в антенно-фидерных трактах базовой и абонентской станции мобильной связи, соответственно (безразмерные величины);  $L_{\tilde{n} \tilde{a}}$ ,  $L_{\tilde{\varsigma} \tilde{a} \tilde{i}}$  — ослабления сигнала, обусловленные затуханием при распространении и замираниями, соответственно (безразмерные величины).

В логарифмическом виде формулу (32) можно записать как

$$P_{\text{ào } \lambda \tilde{N}} = P_{\text{ào } \tilde{A} \tilde{N}} + G_{\tilde{A} \tilde{N}} + G_{\tilde{A} \tilde{N}} - L_{\tilde{A} \tilde{N}} - L_{\tilde{A} \tilde{N}} - L_{\tilde{n} \tilde{a}} - L_{\tilde{\varsigma} \tilde{a} \tilde{i}}, \quad (33)$$

где  $P_{\text{ào } \tilde{A} \tilde{N}}$ ,  $P_{\text{ào } \lambda \tilde{N}}$  определены в дБВт (или дБм);  $G_{\tilde{A} \tilde{N}}$ ,  $G_{\tilde{A} \tilde{N}}$  — в дБи (размерность дБи обозначает, что КУ определен относительно изотропного излучателя);  $L_{\tilde{A} \tilde{N}} L_{\tilde{A} \tilde{N}}$  и  $L_{\tilde{n} \tilde{a}}$ ,  $L_{\tilde{\varsigma} \tilde{a} \tilde{i}}$  — в дБ.

Перевод единиц измерения в дБ и наоборот осуществляется по формулам

$$P, \text{ä} \hat{A} \hat{\Delta} \hat{\Delta} = 10 \lg \left( \frac{P, \hat{A} \hat{\Delta} \hat{\Delta}}{1, \hat{A} \hat{\Delta} \hat{\Delta}} \right); \quad P, \text{ä} \hat{A} \hat{\Delta} \hat{\Delta} = 10 \lg \left( \frac{P, \hat{A} \hat{\Delta} \hat{\Delta}}{1, \hat{A} \hat{\Delta} \hat{\Delta}} \right);$$

$$P, \text{ä} \hat{A} \hat{\Delta} \hat{\Delta} = P, \text{ä} \hat{A} \hat{\Delta} \hat{\Delta} - 30 \quad \text{и} \quad P, \text{ä} \hat{A} \hat{\Delta} \hat{\Delta} = P, \text{ä} \hat{A} \hat{\Delta} \hat{\Delta} + 30$$

$$P, \hat{A} \hat{\Delta} \hat{\Delta} = 10^{\frac{P, \text{ä} \hat{A} \hat{\Delta} \hat{\Delta}}{10}}; \quad P, \hat{A} \hat{\Delta} \hat{\Delta} = 10^{\frac{P, \text{ä} \hat{A} \hat{\Delta} \hat{\Delta}}{10}};$$

$$G, \text{ä} \hat{A} \hat{\Delta} \hat{\Delta} = 10 \lg \left( \frac{G}{G_{\hat{\epsilon}}} \right), \quad \text{где } G_{\hat{\epsilon}} = 1 \text{ — КУ изотропного излучателя;}$$

$$G = 10^{\frac{G, \text{ä} \hat{A} \hat{\Delta} \hat{\Delta}}{10}}.$$

Для вычисления требуемого КУ антенны базовой станции мобильной связи  $G_{\text{БС}}$  в разгах согласно формулы (32) можно воспользоваться выражением

$$G_{\tilde{A} \tilde{N}} = \frac{P_{\text{ào } \lambda \tilde{N}} L_{\tilde{A} \tilde{N}} L_{\tilde{A} \tilde{N}} L_{\tilde{n} \tilde{a}} L_{\tilde{\varsigma} \tilde{a} \tilde{i}}}{P_{\text{ào } \tilde{A} \tilde{N}} G_{\tilde{A} \tilde{N}}}, \quad (34)$$

или для определения  $G_{\text{БС}}$  в дБ согласно формулы (33) выражением

$$G_{\tilde{A} \tilde{N}} = P_{\text{ào } \lambda \tilde{N}} + L_{\tilde{A} \tilde{N}} + L_{\tilde{A} \tilde{N}} + L_{\tilde{n} \tilde{a}} + L_{\tilde{\varsigma} \tilde{a} \tilde{i}} - P_{\text{ào } \tilde{A} \tilde{N}} - G_{\tilde{A} \tilde{N}}. \quad (35)$$

Численные значения  $P_{\text{до АН}}, P_{\text{до АН}}, G_{\text{АН}}, L_{\text{АН}}, L_{\text{АН}}$  заданы для всех вариантов одинаковыми (см. дополнение к табл. А1, Приложение А). Численное значение  $L_{\text{сai}}$  выбирается из табл. А1 «Исходные данные к домашнему заданию» (см. Приложение А) в соответствии с вариантом.

Для вычисления  $L_{\text{на}}$  можно воспользоваться формулами

$$L_{\text{на}} = \left( \frac{4\pi D}{\lambda} \right)^2 \text{ или } L_{\text{на}}, \text{ дБ} = 10 \lg \left( \frac{4\pi D}{\lambda} \right)^2 = 20 \lg \left( \frac{4\pi D}{\lambda} \right), \quad (36)$$

где  $D$  — максимальная дальность действия базовой станции мобильной связи;  $\lambda$  — длина электромагнитной волны.

Численное значение  $D$  выбирается из табл. А1 «Исходные данные к домашнему заданию» (см. Приложение А) в соответствии с вариантом. Численное значение  $\lambda$  задано для всех вариантов одинаковым (см. дополнение к табл. А1, Приложение А).

При расчете  $L_{\text{на}}$  согласно (36) значения  $D$  и  $\lambda$  необходимо привести к единым единицам измерения.

## 2.5 Лабораторное задание

1) На основе заданного значения ширины главного лепестка ДН антенны по уровню половинной мощности в  $H$ -плоскости  $2\Delta\varphi_{0,707}$  (см. табл. А2 «Исходные данные к лабораторному заданию», Приложение А) определите расстояние  $d_m$  между антенными элементами на этаже.

Для этого воспользуйтесь формулой (18) и ее программной реализацией (см. Приложение Б).

Промежуточные результаты отразите в табл. 1

Таблица 1

$d_m/\lambda$								
$2\Delta\varphi_{0,707}$ , град								

2) На основе рассчитанного в ходе выполнения домашнего исследования значения КУ антенны базовой станции  $G_{\text{БС}}$  определите необходимое количество этажей  $n$  в плоской антенной решетке.

Для этого воспользуйтесь формулой (27) или (28) и ее программной реализацией (см. Приложение Б). При дробном значении произведите округление до целого. Результат запишите в отчет.

3) На основе заданного направления главного лепестка ДН антенны  $\theta_{\max}$  (см. табл. А2 «Исходные данные к лабораторному заданию», Приложение А) определите требуемый фазовый сдвиг  $\Delta\Psi$ .

Для этого воспользуйтесь формулой (15) и ее программной реализацией (см. Приложение Б). Результат запишите в отчет.

4) С использованием полученных значений  $n$  — количества этажей в плоской антенной решетке (п.2 лабораторного задания) и  $\Delta\Psi$  — требуемого фазового сдвига (п.3 лабораторного задания) определите ширину главного лепестка ДН антенны по уровню половинной мощности в  $E$ -плоскости  $2\Delta\theta_{0,707}$  и уточненное значение  $\theta_{\max}$ .

Для этого воспользуйтесь формулой (17) и ее программной реализацией (см. Приложение Б). Результаты запишите в отчет.

5) С использованием полученных значений  $2\Delta\phi_{0,707}$  (п.1 лабораторного задания) и  $2\Delta\theta_{0,707}$  (п.4 лабораторного задания) определите КУ панельной антенны.

Для этого воспользуйтесь формулой (30) или (31) и ее программной реализацией (см. Приложение Б). Результат запишите в отчет и сравните с полученным в ходе домашних исследований значением.

6. Качественно изобразите в отчете полученные ДН панельной антенны базовой станции мобильной связи.

7. Сделайте подробные выводы.

## 2.6 Описание алгоритма и особенностей программы

Макет лабораторной работы «Исследование принципов построения и характеристик антенных систем базовых станций мобильной связи» представляет собой программу (см. Приложение Б), написанную в программной среде MathCAD — математически ориентированной универсальной системе. Программа позволяет производить расчеты и моделирование характеристик излучения панельных антенн базовых станций мобильной связи в виде плоской антенной решетки. Расчет и анализ характеристик излучения производится в зависимости от количества, геометрических параметров антенных элементов, их расположения в плоской антенной решетке и основан на использовании инженерных (приближенных) формул.

Главными особенностями программы, определяемые в первую очередь возможностями программной среды MathCAD являются: осуществление вычислений с использованием специальной системы символов наиболее приближенных к традиционной форме записи; проведение сложных вычислений и осуществление в соответствии с ними построения графиков.

Алгоритм работы с программой состоит в следующем:

1) Запуск программной среды MathCAD на персональном компьютере, установленном на рабочем месте (включение персонального компьютера и запуск программной среды MathCAD осуществляет преподаватель).

2) Открытие файла «СМЗ М1 Антенны базовых станций. xmscd» (местонахождение файла «СМЗ М1 Антенны базовых станций. xmscd» указывает преподаватель).

3) Проверка результата решения домашней задачи (в случае несоответствия результата, требуемый КУ антенны базовой станции мобильной связи пересчитывается с использованием программы).

4) Ввод исходных данных (местонахождение исходных данных в программе иллюстрируется на рис. 4).

5) Ввод численного значения переменной, определяющей расстояния между антенными элементами на этаже антенной решетки в пределах  $d_m = 0,1 \lambda \dots 0,5 \lambda$  (местонахождение переменной, определяющей расстояние между антенными элементами в программе, иллюстрируется на рис. 5).

6) Расчет ДН антенны в  $H$ -плоскости (расчет и построение графика ДН антенны в  $H$ -плоскости в полярной системе координат по заданным данным осуществляется в программе автоматически).

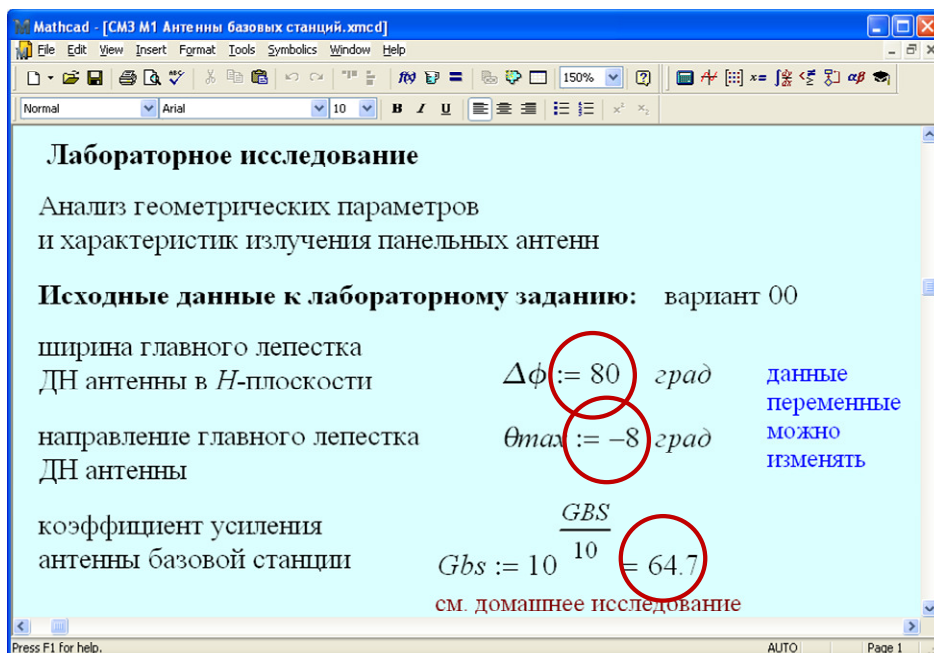


Рисунок 4 — Ввод исходных данных

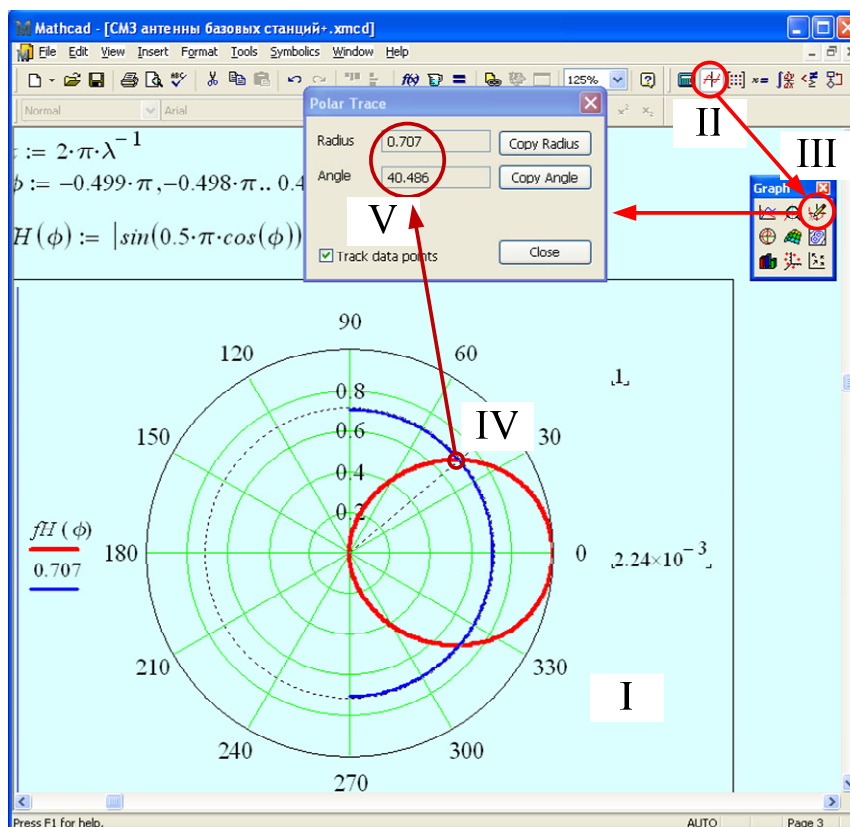


Рисунок 5 — Ввод численного значения переменной, определяющей расстояния между антенными элементами на этаже антенной решетки

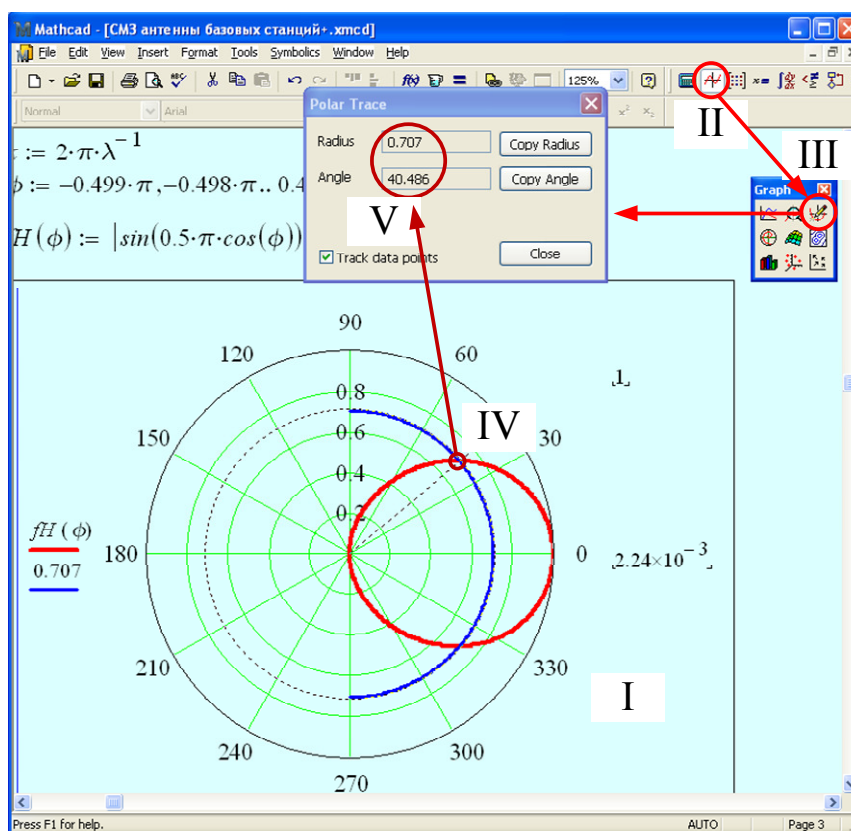


Рисунок 6 — Определение ширины ДН антенны

7) Измерение ширины главного лепестка ДН антенны по уровню половинной мощности в  $H$ -плоскости.

Процедура измерения ширины главного лепестка ДН антенны по уровню половинной мощности поясняется на рис. 6, в частности:

— выделение рисунка — I (выделение рисунка осуществляется нажатием левой кнопкой «мышки» при нахождении курсора на рисунке);

— открытие окна «Polar Trace» (открытие окна «Polar Trace» осуществляется последовательным выполнением следующих действий: активизация пиктограммы «Graph Toolbar» — II, в результате чего появляется окно «Graph»; активизация пиктограммы «Trace» в окне «Graph» — III, в результате чего появляется окно «Graph Toolbar»);

— измерение угловой координаты  $\varphi_1$  одной из точек пересечения ДН антенны (красная кривая) и окружности радиусом 0,707 (синяя кривая) (выделение интересующей точки на графике осуществляется нажатием левой кнопкой «мышки» при нахождении курсора на этой точке, что приводит к появлению пунктирной линии, проходящей через центр системы координат и интересующую точку — IV, в результате в окне «Polar Trace» появляются полярные координаты точки пересечения кривых — V);

— измерение угловой координаты  $\varphi_2$  другой точки пересечения ДН антенны (красная кривая) и окружности радиусом 0,707 (синяя кривая) (процесс аналогичен вышеописанному);

— определение ширины главного лепестка ДН антенны по уровню половинной мощности (с учетом расположения ДН антенны в полярной системе координат и отсчета углов в данной системе ширина главного лепестка ДН антенны по уровню половинной мощности определяется по формуле  $2\Delta\varphi_{0,707} = |\varphi_1 - (\varphi_2 - 360)|$ , град.)

8) Подбор оптимального расстояния между антенными элементами на этаже антенной решетки (изменяя расстояние  $d_m/\lambda$  (см. п. 5)) и проводя последующее измерение ширины ДН антенны в  $H$ -плоскости (см. п. 7)) нужно добиться, чтобы  $2\Delta\varphi_{0,707}$  соответствовало заданному значению).

9) Определение количества этажей в антенной решетке (вычисление количества этажей в антенной решетке по заданным и рассчитанным данным, а также округление полученного результата до целого числа осуществляется в программе автоматически).

10) Определение линейного фазового сдвига источников возбуждения (определение линейного фазового сдвига источников возбуждения по заданным данным осуществляется в программе автоматически).

11) Расчет ДН антенны в  $E$ -плоскости (расчет и построение графика ДН антенны в  $E$ -плоскости в полярной системе координат по заданным данным осуществляется в программе автоматически).

12) Измерение ширины главного лепестка ДН по уровню половинной мощности в  $E$ -плоскости и уточнение угла наклона ДН (процедура измерения

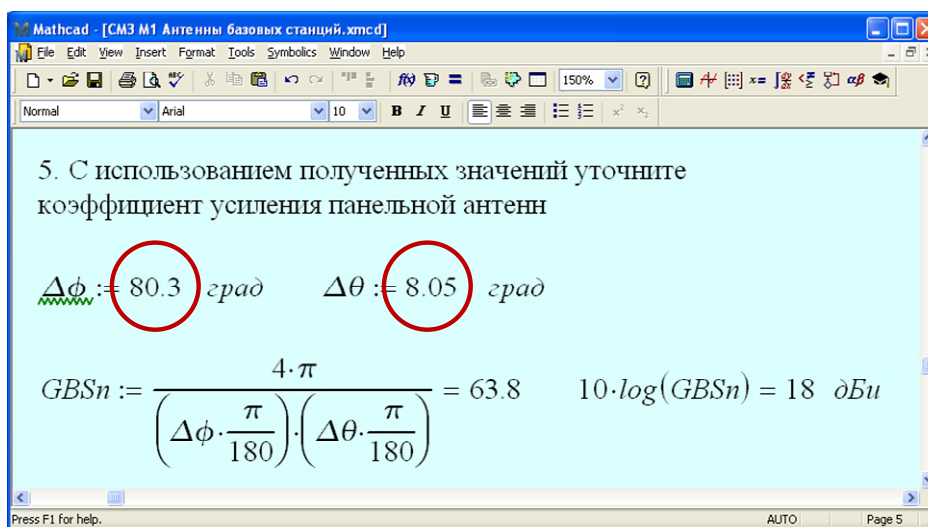


Рисунок 7 — Ввод численных значений ширины главного лепестка ДН в  $E$ - и  $H$ -плоскостях

ширины ДН антенны по уровню половинной мощности в  $E$ -плоскости и уточнение угла наклона главного лепестка ДН аналогичны вышеописанной (см. п. 7) с учетом формулы  $2\Delta\theta_{0,707} = |\theta_1 - \theta_2|$ , град.).

13) Определение уточненного значения КУ панельной антенны (после ввода полученных данных, а именно  $2\Delta\phi_{0,707}$  (см. п.7)) и  $2\Delta\theta_{0,707}$  (см. п.12)), определение КУ антенны по рассчитанным данным осуществляется в программе автоматически). Местонахождение вводимых данных в программе иллюстрируется на рис. 7.

## 2.7 Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе (см. Приложение В) должен содержать:

- 1) Титульный лист установленного образца.
- 2) Цель работы.
- 3) Задание на домашние исследования и их результаты.
- 4) Задание на лабораторные исследования и их результаты.
- 5) Выводы.

Выводы по работе должны включать как констатируемую часть, отражающую основные полученные результаты, так и аналитическую, в которой проводится сравнительный анализ данных теоретического и экспериментального исследований, а также объяснение полученных результатов.

## 2.8 Рекомендуемая литература

### Основная

- 1) Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн: учебник для вузов [Ерохин Г.А. , Чернышев О.В. , Козырев Н.Д. и др.]; под. ред. Г.А. Ерохина. — [3-е изд.] — М.: Горчая линия – Телеком, 2007. — С.58-247.
- 2) Кочержевский В.Г. Антенно-фидерные устройства: учебник для вузов / В.Г. Кочержевский, Г.А. Ерохин, Н.Д. Козырев. — М.: Радио и связь, 1989. — С.74-244.

### Дополнительная

- 3) Base Station Antennas, Filters, Combiners and Ampilifers for Mobile Communications 790...6000 MHz / KATHREIN Antennen Electronic / Catalogue Issue 01.2009. — [www.kathrein.de](http://www.kathrein.de)
- 4) Алехин Ю.Н. Антенно-фидерные устройства для базовых станций сотовой и подвижной связи / Ю.Н. Алехин, Е.В. Лазарева // Мобильные системы. — 2002.— №3.



## Приложение А

Таблица А1 — Исходные данные к домашнему заданию

<b>n</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
<i>D</i> , км	17,2	17,5	17,9	18,2	18,9	19,4	20,0	20,6	21,2	21,8
<b>m</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
<i>L</i> <sub>зам</sub> , дБ	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5

Дополнение к таблице А1

$$P_{\text{до АН}} = -77 \text{ дБм}; P_{\text{до АН}} = 5 \text{ Вт (или 37 дБм)}; G_{\text{АН}} = 0 \text{ дБи}; L_{\text{АН}} = 2 \text{ дБ};$$

$L_{\text{АН}} = 1 \text{ дБ}; \lambda = 0,324 \text{ м} (f = 925 \text{ МГц — среднее значение диапазона } 890 \dots 960 \text{ МГц}).$

Таблица А2 — Исходные данные к лабораторному заданию

<b>n</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
$2\Delta\varphi_{0,707}$ , град	120	105	90	60	120	105	90	60	120	105
<b>m</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
$\theta_{\text{max}}$ , град	-8	-6	-4	-8	-6	-4	-8	-6	-4	-8

n – последняя цифра номера зачетной книжки

m – предпоследняя цифра номера зачетной книжки

## Приложение Б

### Лабораторное исследование

Анализ геометрических параметров  
и характеристик излучения панельных антенн



**Исходные данные к лабораторному заданию:** вариант 00

ширина главного лепестка  
ДН антенны в  $H$ -плоскости  $\Delta\phi := 70$   $\tilde{a}\tilde{d}\tilde{a}\tilde{c}$  данные переменные можно изменить

направление главного лепестка  
ДН антенны  $\theta_{max} := -7$   $\tilde{a}\tilde{d}\tilde{a}\tilde{c}$

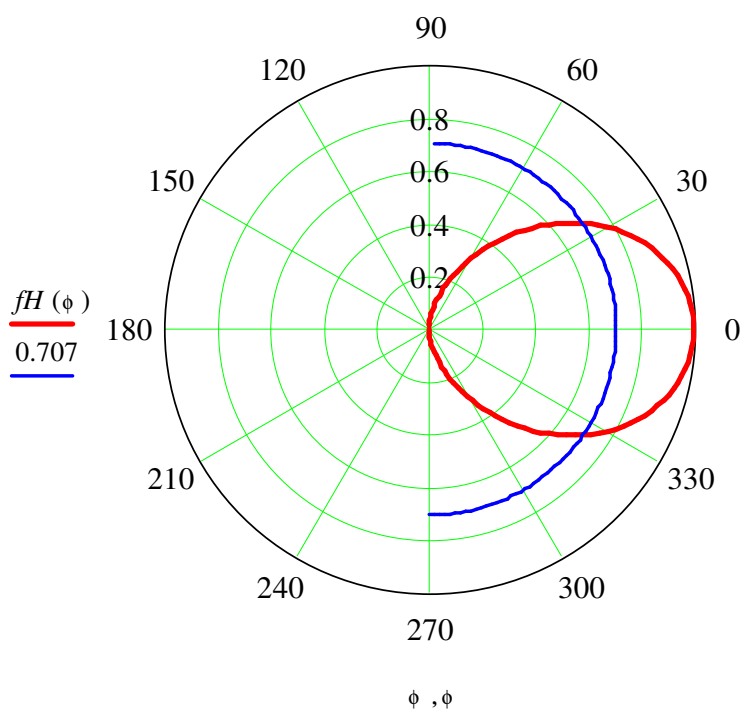
коэффициент усиления  
антенны базовой станции  $G_{bs} := 10^{\frac{GBS}{10}} = 64.685$   
см. домашнее исследование

### Выполнение

1. На основе заданного значения ширины главного лепестка ДН антенны по уровню половинной мощности в  $H$ -плоскости определите расстояние между антенными элементами на этаже  $d_m$

$k := 2 \cdot \pi$   
 $\phi := -0.499 \cdot \pi, -0.49 \cdot \pi .. 0.499 \cdot \pi$   $d_m := 0.415$  данную переменную нужно изменить

$$fH(\phi) := |\sin(0.5 \cdot \pi \cdot \cos(\phi))| \cdot |\cos(0.5 \cdot k \cdot d_m \cdot \sin(\phi))|$$



2. На основе рассчитанного в ходе выполнения домашнего исследования значения коэффициента усиления антенны базовой станции  $G_{bs}$  определите необходимое количество этажей  $n$  плоской антенной решетки

$$dm \cdot \lambda^{-1} = 0.35 \quad dm = 0.114 \quad \text{м}$$

$$G_{bs} = 64.7$$

$$nn := \frac{G_{bs}}{1.64 \cdot 2 \cdot 2} \cdot \left( 1 + \frac{\sin(k \cdot dm)}{k \cdot dm} \right) = 13.5 \quad n := \text{round}(nn) = 13$$

3. На основе заданного направления главного лепестка ДН панельной антенны определите требуемый фазовый сдвиг источников возбуждения

$$\theta_{max} = -8 \quad \text{град} \quad \theta_{max} \cdot \frac{\pi}{180} = -0.14 \quad \text{рад}$$

$$\Delta\Psi := \pi \cdot \sin\left(\theta_{max} \cdot \frac{\pi}{180}\right) = -0.437 \quad \text{рад} \quad \Delta\Psi \cdot \frac{180}{\pi} = -25.1 \quad \text{град}$$

4. С использованием полученных значений: количества этажей плоской антенной решетки и требуемого фазовый сдвиг определите ширину главного лепестка ДН по уровню половинной мощности в  $E$ -плоскости

$$n = 13 \quad \Delta\Psi = -0.437 \quad \text{рад}$$

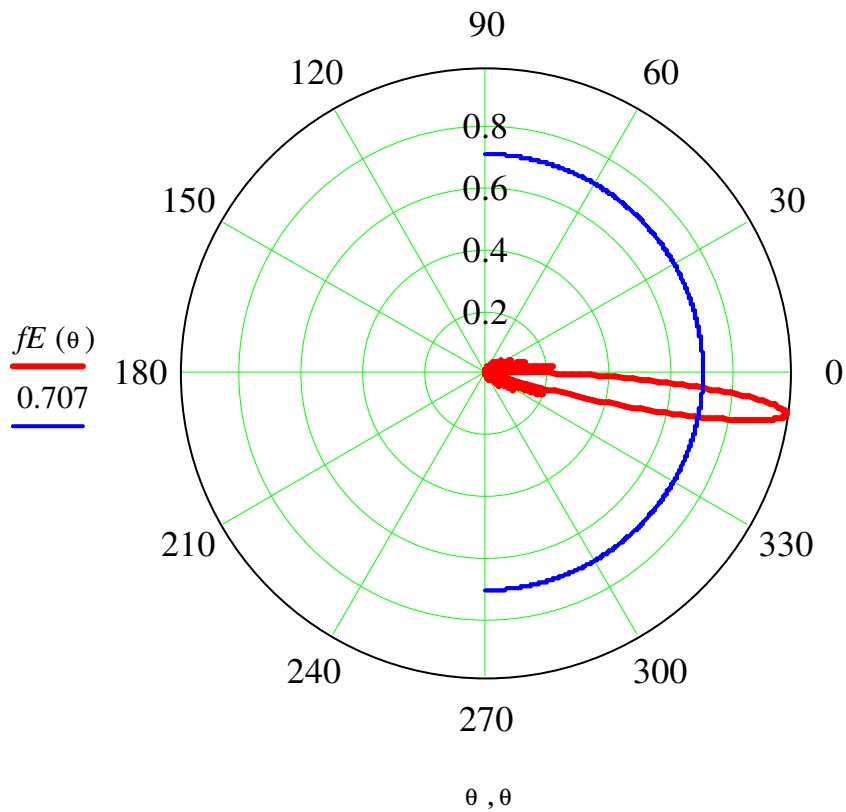
$$\theta := -0.499 \cdot \pi, -0.498 \cdot \pi \dots 0.499 \cdot \pi$$

$$f1E(\theta) := \left| \frac{\cos(0.5 \cdot \pi \cdot \sin(\theta))}{\cos(\theta)} \right|$$

$$f2E(\theta) := |\sin(0.5 \cdot \pi \cdot \cos(\theta))|$$

$$f3E(\theta) := \left| \frac{\sin[0.5 \cdot n \cdot (\pi \cdot \sin(\theta) - \Delta\Psi)]}{n \cdot \sin[0.5 \cdot (\pi \cdot \sin(\theta) - \Delta\Psi)]} \right|$$

$$fE(\theta) := f1E(\theta) \cdot f2E(\theta) \cdot f3E(\theta)$$



5. С использованием полученных значений уточните коэффициент усиления панельной антенны

$$\Delta\phi := 80.3 \quad \text{рад} \quad \Delta\theta := 8.05 \quad \text{рад}$$

$$GBSn := \frac{4 \cdot \pi}{\left(\Delta\phi \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot \left(\Delta\theta \cdot \frac{\pi}{180}\right)} = 63.8$$

$$10 \cdot \log(GBSn) = 18$$

## Приложение В

*Министерство транспорта и связи Украины  
Государственная администрация связи  
Одесская национальная академия связи им. А. С. Попова*

*Кафедра технической  
электродинамики  
и систем радиосвязи*

### ОТЧЕТ

*по лабораторной работе*

*«Исследование принципов построения и характеристик  
антенн базовых станций мобильной связи»*

*Выполнил: студент гр. ТС 3.401  
Петров Петр Петрович  
Номер зачетной книжки 000000*

*Проверил: проф. каф. ТЭД и СРС  
Проценко М.Б.*

*Одесса  
2011*

Целью лабораторной работы является углубление теоретических знаний по теме 1.3 — Антенные устройства базовых и абонентских станций систем мобильной связи и овладение расчетными методиками анализа характеристик излучения антенн базовых станций мобильной связи в виде панельных антенн.

### **Задание на домашнее исследование**

**Задача.** Определите требуемый коэффициент усиления антенны базовой станции мобильной связи  $G_{BC}$  при заданной дальности  $D$  и заданном запасе на замирание  $L_{зам}$ .

### **Исходные данные к домашнему заданию**

$$L_{зам} = 11 \text{ дБ}; D = 18,5 \text{ км (вариант 00)}$$

$$P_{\text{до АН}} = -77 \text{ дБм}; P_{\text{от АН}} = 37 \text{ дБм}; G_{АН} = 0 \text{ дБи}; L_{АН} = 3 \text{ дБ}; L_{АН} = 1 \text{ дБ}; \\ \lambda = 0,324 \text{ м (} f = 925 \text{ МГц — среднее значение диапазона 890...960 МГц)}.$$

### **Результаты домашнего исследований**

Для вычисления требуемого коэффициента усиления антенны базовой станции мобильной связи  $G_{BC}$  в дБ воспользуемся выражением

$$G_{АН} = P_{\text{до АН}} + L_{АН} + L_{АН} + L_{\text{на}} + L_{\text{за}} - P_{\text{от АН}} - G_{АН},$$

$$\text{где } L_{\text{на}} = 20 \lg \left( \frac{4\pi D}{\lambda} \right), \text{ дБ.}$$

$$L_{\text{на}} = 20 \lg \left( \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 18500}{0,324} \right) = 117,1 \text{ [дБ]},$$

$$G_{АН} = -77 + 3 + 1 + 117,1 + 11 - 37 - 0 = 18,1 \text{ [дБи]} \text{ или } G_{АН} = 64,7$$

**Ответ:** требуемый коэффициент усиления антенны базовой станции мобильной связи  $G_{АН} = 18,1$  дБи или  $G_{АН} = 64,7$ .

## **Задание на лабораторные исследования**

### **Исходные данные к лабораторному заданию**

$$G_{\text{АН}} = 64,7; \quad \Delta\varphi_{0,707} = 80 \text{ град}; \quad \theta_{\text{max}} = -8 \text{ град.} \quad (\text{вариант 00})$$

### **Результаты лабораторных исследований**

1. На основе заданного значения ширины главного лепестка ДН панельной антенны в  $H$ -плоскости  $2\Delta\varphi_{0,707} = 80$  град определяем расстояние между антенными элементами в этаже  $d_m$ .

Таблица 1

$d_m/\lambda$	0,1	0,2	0,3	0,34	0,35	0,36	0,4	0,5
$2\Delta\varphi_{0,707}$ , град	115,9	106,7	90,0	82,5	80,3	78	73,3	61

Наиболее соответствует заданию  $d_m = 0,35\lambda$

2. На основе рассчитанного в ходе выполнения домашнего исследования значения коэффициента усиления антенны базовой станции  $G_{\text{БС}}$  определяем необходимое количество этажей  $n$  плоской антенной решетки.

Полученное значение  $n = 13$

3. На основе заданного направления главного лепестка ДН антенны, а именно  $\theta_{\text{max}} = -8$  град., определяем требуемый фазовый сдвиг  $\Delta\Psi$ .

Полученное значение  $\Delta\Psi = 21,5$  град.

4. С использованием полученных значений  $n = 13$  и  $\Delta\Psi = 21,5$  град определяем ширину главного лепестка ДН антенны по уровню половинной мощности в  $E$ -плоскости  $2\Delta\theta_{0,707}$  и уточненное значение  $\theta_{\text{max}}$ .

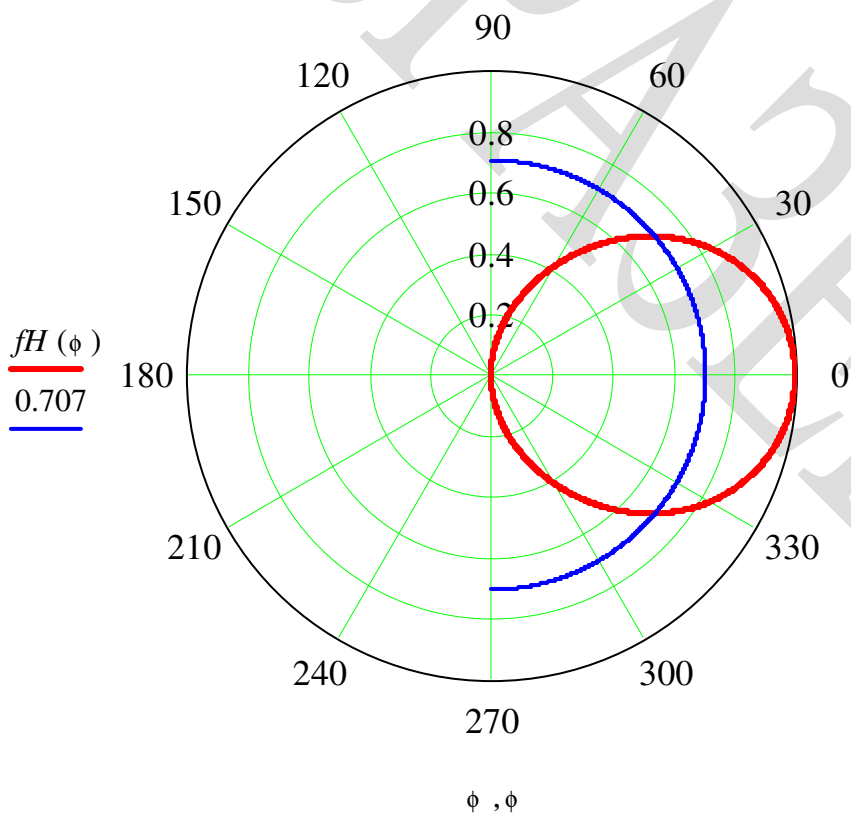
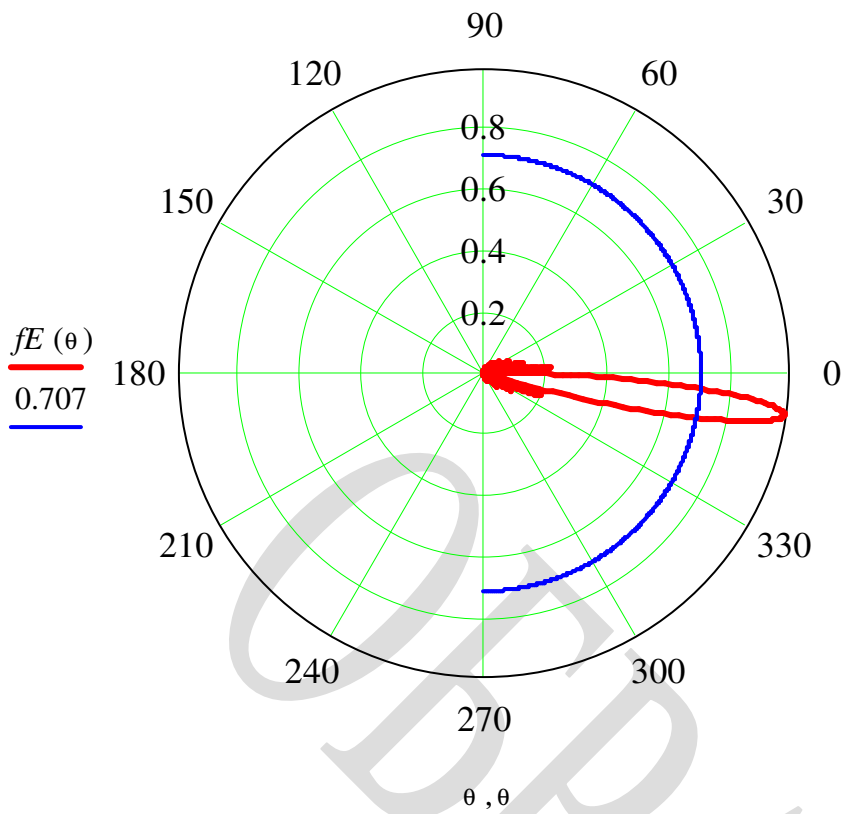
Полученное значение  $2\Delta\theta_{0,707} = 8,05$  град и  $\theta_{\text{max}} = -8$  град

5. С использованием полученных значений  $2\Delta\varphi_{0,707} = 80,3$  град и  $2\Delta\theta_{0,707} = 8,05$  град определяем коэффициент усиления панельной антенны.

Полученное значение  $G_{\text{АН}} = 63,8$  или  $G_{\text{АН}} = 18$  дБи

Результат домашних исследований  $G_{\text{АН}} = 64,7$  или  $G_{\text{АН}} = 18,1$  дБи.

6. ДН панельной антенны базовой станции мобильной связи



**Выводы:.** В ходе выполнения лабораторной работы проведены следующие исследования... В результате исследований получено... Согласно полученным результатам... Таким образом цель лабораторной работы достигнута.