

Численно-экспериментальная оценка характеристик зигзагообразной антенны УВЧ-диапазона средств радиорелейной связи на соответствие требованиям действующего законодательства и международных норм

Ю.В. Медведев 

ФГБУ «16 ЦНИИИ» Минобороны России
141006, Россия, Московская обл., г. Мытищи,
ул. Комарова, 17

Аннотация – Обоснование. Для обеспечения целостности, устойчивости функционирования и безопасности единой сети электросвязи Российской Федерации, а также для решения вопросов электромагнитной совместимости средств радиорелейной связи требуется применение антенн, удовлетворяющих как обязательным требованиям, закрепленным на законодательном уровне, так и требованиям рекомендательного характера международного и регионального уровней. **Цель.** Установление соответствия наиболее часто применяемых в средствах радиорелейной связи зигзагообразных антенн требованиям действующего законодательства и международных норм на основе численно-экспериментальной оценки их характеристик. **Методы.** На основе численных методов проведены расчеты характеристик рассматриваемых антенн, а также проведены измерения данных характеристик в безэховой экранированной камере. **Результаты.** Представлены результаты численной и экспериментальной оценки коэффициента усиления, коэффициента стоячей волны по напряжению, диаграмм направленности, кроссполяризационной развязки и комплексного сопротивления двойной зигзагообразной антенны с рефлектором УВЧ-диапазона средств радиорелейной связи. Показано, что данная антенна обеспечивает работу в широкой полосе частот и на рассматриваемом участке диапазона не в полной мере удовлетворяет требованиям, предъявляемым к антеннам средств радиорелейной связи. **Заключение.** На основе анализа требований действующего законодательства и международных требований, предъявляемых к антеннам средств радиорелейной связи, и результатов численно-экспериментальной оценки характеристик рассматриваемых антенн установлено их соответствие по уровню огибающей ДН, бокового и заднего излучения требованиям Рекомендаций МСЭ ITU-R F.699, за исключением начала участка диапазона, где имеется некоторое превышение уровня огибающей. Требования ГОСТ Р 50867-96 по уровню максимумов кроссполяризации (или уровню кроссполяризационного излучения в заданном пространственном секторе углов вблизи направления главного излучения) не выполняются.

Ключевые слова – зигзагообразная антенна; коэффициент стоячей волны по напряжению; коэффициент усиления; диаграмма направленности; ширина диаграммы направленности; побочные излучения; средства радиорелейной связи.

Введение

Существующие средства радиорелейной связи (СРРС), работающие в диапазоне частот 160...645 МГц, комплектуются как направленными, так и ненаправленными антеннами [1], при этом наиболее часто применяются Z-образные излучатели (решетки излучателей) с рефлектором и дополнительными шунтами. Данные типы антенн являются зигзагообразными антеннами (Z-антеннами) усовершенствованных конструкций К.П. Харченко, которые широко начали использоваться для приема телевизионного вещания в середине прошлого столетия и получили обоснованную популярность. С целью установления соответствия применяемых в СРРС зигзагообразных антенн требованиям действующего законодательства и международных норм проведена численно-экспериментальная оценка их основных характеристик с соответствующими выводами.

1. Конструкции и основные характеристики зигзагообразных антенн

В отечественной печати ранние конструкции зигзагообразных антенн представлены инженером К.П. Харченко в журналах «Радио» [2–4], а также в его брошюре «УКВ антенны» [5].

Полотно зигзагообразной антенны К.П. Харченко образовано восемью проводниками, которые соединены в виде двух ромбовидных ячеек (рис. 1). К точкам питания a – a подключается фидер. При питании антенны коаксиальным кабелем, который прокладывается через точку нулевого потенциала, не требуется симметрирующего устройства, так как в точках соединения проводников n – n находится пучность тока и ноль напряжения в независимости от длины волны, что и делает антенное полотно диапазоным, поскольку полуволновые участки проводников в области точек n – n всегда

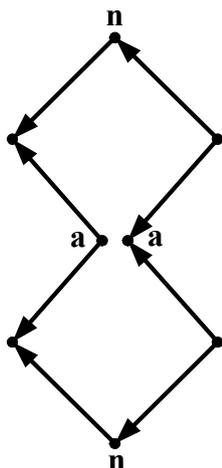


Рис. 1. Антенна К.П. Харченко
Fig. 1. Antenna K.P. Kharchenko

имеют одинаковое направление токов (на рисунке указано стрелками), то есть находятся в одинаковой фазе. Показанная на рис. 1 антенна имеет горизонтальную поляризацию. Расчетные значения коэффициента направленного действия (КНД) и коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) для участка диапазона 250...600 МГц (длина стороны ромбовидной ячейки 23 см) отображены на рис. 2 в виде графиков.

Как видно из графиков, данная антенна имеет ограниченные возможности по диапазонности и сравнительно невысокий КНД и, соответственно, коэффициент усиления (КУ).

Для улучшения характеристик антенны предложена усовершенствованная конструкция [6], в которой за счет особенностей геометрии антенны и использования в качестве нагрузки двухпроводной линии, согласованной с парами ромбических антенн в точках их подключения, достигается увеличение КУ, а также расширение полосы рабочих частот. В полосе от 700 до 900 МГц расчетные значения КСВН предложенной антенны не превышают значения 2,0. При этом в полосе 850...930 МГц КУ достигает величины 13 дБ.

С целью расширения рабочей полосы частот, снижения КСВ в широком диапазоне, сохранения односторонней диаграммы направленности (ДН) и реализации возможностей замены нескольких широкополосных антенн одной антенной предложена конструкция сверхширокополосной комбинированной зигзагообразной антенны [7], которая содержит зигзагообразный вибратор метрового диапазона радиоволн, рефлектор, зигзагообразный вибратор дециметрового диапазона радиоволн и две двухпроводные соединительные линии.

Данная антенна имеет расчетный КСВ, не превышающий значения 2,0 в полосе частот от 500 до 860 МГц при КУ до 12 дБ.

Задача создания диапазонной направленной антенны на основе Z-антенны с максимально возможным КУ решена в полезной модели [8]. В данной конструкции повышение КУ, а также согласование с 75-омным кабелем достигается за счет того, что стороны ромбических ячеек излучателя, примыкающие к точке питания, выполнены по меньшей мере из двух веерно исходящих от точки питания проводников, а в ромбических ячейках излучателя размещены согласующие неоднородности в виде параллельных вектору напряженности электрического поля металлических отрезков. Данная конструкция в диапазоне частот 390...470 МГц обеспечивает КСВ не менее 0,6, а установка второго излучателя позволяет увеличить КУ антенны на 2,5 дБ.

Для обеспечения неизменной формы двусторонней диаграммы направленности в горизонтальной плоскости в широкой полосе рабочих частот предлагается конструкция [9], которая снабжена определенным образом двумя одинаковыми замкнутыми треугольными рамками. Наличие в конструкции двух емкостных нагрузок, выполненных в виде плоскостных фигур ромбов, позволяет добиться расширения полосы пропускания в более низкочастотную часть, обеспечив работу в полосе частот от 100 до 700 МГц.

Универсальный по поляризации антенный элемент повышенной направленности предложен в [10]. Данная конструкция обеспечивает работу с линейной горизонтальной или вертикальной поляризацией или с эллиптической поляризацией. Смена поляризации обеспечивается за счет питания конструкции в разных точках.

Для повышения направленности при горизонтальной поляризации поля излучения, а также увеличения КУ предлагается конструкция двойной зигзагообразной антенны [11] с использованием рефлектора. Увеличение КУ достигается за счет использования большего числа излучающих элементов, размеры которых, как и расстояние между ними, изменяются по логарифмическому закону.

Усовершенствованная конструкция зигзагообразного излучателя, полотно которого сформировано выполненными из металлической трубки зигзагообразными проводниками, описана в полезной модели [12]. Усиление жесткости рамочной конструкции данной антенны достигается благо-

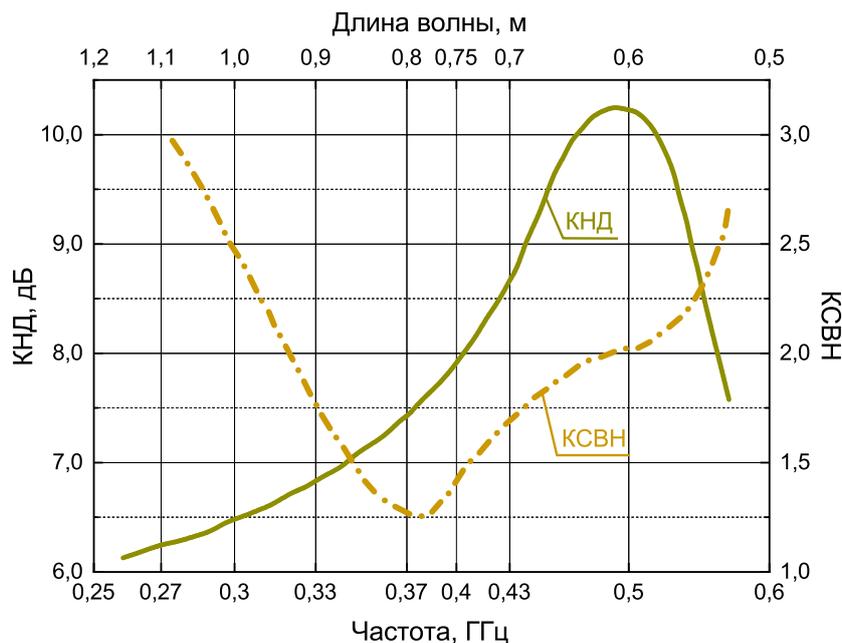


Рис. 2. КНД и КСВН антенны К.П. Харченко
 Fig. 2. Directional coefficient and VSWR antenna K.P. Kharchenko

даря исполнению по меньшей мере двух дополнительных проводников, размещенных в двух смежных ячейках излучателя в виде единого, цельного по длине стержня, пропущенного практически по всему размеру излучателя, а также за счет того, что стержень и зигзагообразный проводник имеют определенную толщину и при наложении одного на другой между их осями всегда имеется определенное расстояние. Расположение стержня, образующего дополнительные проводники излучателя, позволяет выполнить его с согласующими неоднородностями в виде металлических отрезков, размещенных в ромбических ячейках параллельно вектору электрической составляющей поля.

Для упрощения конструкции и сборки устройства при установке и улучшения согласования антенны с питающим фидером при сохранении направленности антенны в заданном рабочем диапазоне предлагается широкополосная направленная зигзагообразная квазишунтовая антенна [13]. Данная конструкция выполнена в виде двух витков проводников в форме квадратов. Витки проводников расположены вдоль общей диагонали по обе стороны, разомкнуты по всей длине и замкнуты шунтами. Полотно перегнуто по линии симметрии и расположено перед рефлектором. Плоскости ветвей расположены с уклоном к центру. Согласно расчетам, данная антенна предназначена для работы в диапазоне частот 475...825 МГц с

КСВН, не превышающим значения 2,5 и КУ от 10 до 12 дБ.

Рассмотренные модификации конструкций зигзагообразных антенн направлены на увеличение КУ до 12...13 дБ, причем одновременно с уменьшением КСВН до двух в рабочей полосе частот, что соответствует не более 11% мощности, отраженной от выхода передатчика.

2. Требования, предъявляемые к антеннам средств радиорелейной связи

В целях обеспечения целостности, устойчивости функционирования и безопасности единой сети электросвязи Российской Федерации, а также для решения вопросов электромагнитной совместимости СРРС к параметрам их антенных устройств предъявляются как обязательные требования, закрепленные на законодательном уровне, так и требования рекомендательного характера международного и регионального уровней.

Приказом Министерства информационных технологий и связи РФ от 23 ноября 2006 г. № 153 утверждены «Правила применения антенн и фидерных устройств». Согласно Приложению 1 данного приказа, устанавливаются следующие обязательные требования для антенн радиорелейных систем связи, работающих в диапазоне частот от 300 МГц до 60 ГГц.

Таблица. Координаты изломов огибающей $G(\theta)$ для антенн группы 0 класса 1
Table. Envelope $G(\theta)$ break coordinates for group 0 class 1 antennas

Угол θ , град	Основная поляризация $G(\theta)$, дБи	Угол θ , град	Кросс-поляризация $G(\theta)$, дБи
20	12	20	0
40	4	30	0
110	-7	100	-10
180	-7	180	-10

КУ антенн G , дБи, относительно изотропного излучателя должен удовлетворять условию

а) для антенн с осесимметричным раскрывом:

$$G \geq 20 \times \log_{10}(D/\lambda) + 7, \text{ дБи},$$

где D – диаметр антенны; λ – длина волны;

б) для антенн с неосесимметричным раскрывом:

$$G \geq 10 \times \log_{10}(S/\lambda^2) + 7, \text{ дБи},$$

где S – площадь раскрыва; λ – длина волны.

Ширина главного лепестка диаграммы направленности ($\Delta\varphi_{0,5}$), определяемая в градусах по уровню половинной мощности, должна удовлетворять условию:

$$2\Delta\varphi_{0,5} < 80\lambda/D,$$

где D – диаметр антенны; λ – длина волны.

Значения КСВ не должны превышать следующих значений:

- для антенн частотного диапазона от 0,3 ГГц до 3,0 ГГц, соединяемых с приемопередатчиком радиорелейной станции протяженным фидером, предельно допустимое значение КСВ = 1,40;

- для антенн частотного диапазона от 0,3 ГГц до 3,0 ГГц, непосредственно соединяемых с приемопередатчиком радиорелейной станции, предельно допустимое значение КСВ = 1,45.

Значение развязки между входами/выходами антенн, функционирующих на двух ортогональных поляризациях или в двух или более диапазонах частот, должно составлять величину не менее 25,0 дБ.

Менее жесткие требования данного приказа установлены для нулевой группы антенн частотного диапазона 0,3 до 3,0 ГГц первого класса для второго варианта исполнения с предельно допустимым КСВ = 1,45.

Огибающие диаграммы направленности $G(\theta)$ (θ – угол в горизонтальной плоскости относительно оси направления основного излучения) и кроссполяризационной развязки для первого класса антенн группы ноль задаются в виде кусоч-

но-ломаных линий, координаты изломов которых приведены в таблице.

Государственный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 50867-96 устанавливает общие технические требования к номенклатуре электрических параметров и конструкций антенн РРЛ, а также определяет методы измерения электрических параметров.

Согласно Приложению А данного стандарта, КСВ антенн, используемых для работы в зонавых системах и системах, не имеющих протяженного волноводного тракта (аппаратура непосредственно присоединена ко входу антенны), составляет величину от 1,15 до 1,40. Ширина главного лепестка по уровню половинной мощности однолучевых остронаправленных антенн РРЛ составляет величину от долей градуса до нескольких градусов. Относительное защитное действие стандартных антенн – от 0 до 10 дБ, высококачественных – от 10 до 20 дБ, сверхвысококачественных – от 20 до 40 дБ. Уровень первого бокового лепестка составляет от -15 до -30 дБ, а при одновременной работе на двух поляризациях – от -30 до -35 дБ.

Уровень максимумов кроссполяризации (или уровень кроссполяризационного излучения в заданном пространственном секторе углов вблизи направления главного излучения) варьируется от -15 до -30 дБ.

Приложение В данного стандарта определяет справочные диаграммы направленности, соответствующие Рекомендациям МСЭ Rec. ITU-R F.699, которые используются при отсутствии реальных диаграмм направленности для решения вопросов электромагнитной совместимости, а также могут являться для разработчиков ориентиром при оценке качества вновь разрабатываемой или приобретаемой антенной техники относительно некоего среднего мирового уровня.

Согласно данным Рекомендациям, для частот в диапазоне от 100 МГц до менее 1 ГГц в случаях, когда отношение диаметра антенны к рабочей

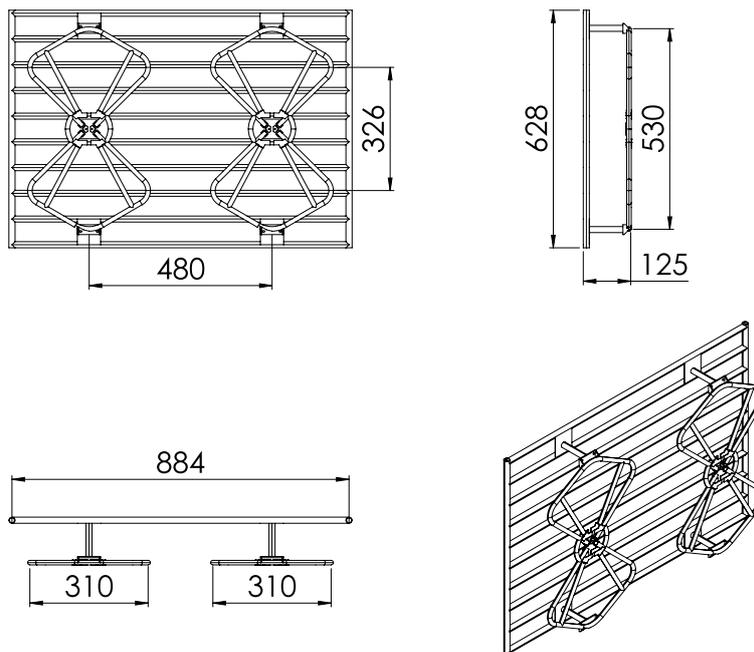


Рис. 3. Двойная зигзагообразная антенна с рефлектором
Fig. 3. Double zigzag antenna with reflector

длине волны больше чем 0,63 ($G_{\max} > 3,7$ дБи), для определения справочных диаграмм направленности используются следующие соотношения:

$$G(\varphi) = G_{\max} - 2,5 \times 10^{-3} \left(\frac{D}{\lambda} \varphi \right)^2 \quad (1)$$

при $0^\circ < \varphi < \varphi_m$;

$$G(\varphi) = G_1 \text{ при } \varphi_m \leq \varphi < 100 \frac{\lambda}{D};$$

$$G(\varphi) = 52 - 10 \log_{10} \left(\frac{D}{\lambda} \right) - 25 \log_{10}(\varphi)$$

при $100 \frac{\lambda}{D} \leq \varphi < \varphi_s$;

$$G(\varphi) = -2 - 5 \log_{10} \left(\frac{D}{\lambda} \right)$$

при $\varphi_s \leq \varphi \leq 180^\circ$,

где

$$\varphi_m = \frac{20\lambda}{D} \sqrt{G_{\max} - G_1}; \quad \varphi_s = 144,5 \left(\frac{D}{\lambda} \right)^{-0,2};$$

$$G_1 = 2 + 15 \log_{10} \left(\frac{D}{\lambda} \right).$$

В случаях когда известно только максимальное значение коэффициента усиления антенны, D/λ оценивается с помощью следующего выражения:

$$20 \log_{10} \left(\frac{D}{\lambda} \right) \approx G_{\max} - 7,7, \quad (2)$$

где G_{\max} – коэффициент усиления главного лепестка диаграммы направленности антенны (дБи).

Как видно из рассмотренных документов, наиболее строгие и полные требования к характеристикам антенн СРРС предъявляются ГОСТ Р 50867-96.

3. Результаты численной и экспериментальной оценки характеристик зигзагообразной антенны

Численная и экспериментальная оценка характеристик проведена для конструкции двойной зигзагообразной антенны с рефлектором, представленной на рис. 3. Рассматриваемая конструкция по своему исполнению наиболее близка к описанной в полезной модели [8]. Для предварительной оценки широкополосности и энергетических параметров данной антенны в программе электродинамического расчета трехмерных антенных устройств открытого доступа 4NEC2 выполнено численное моделирование, а также в безэховой камере в полосе частот от 200 до 2000 МГц проведены измерения КУ и КСВН рассматриваемой антенны. Расчетные и измеренные значения КУ и КСВН представлены на рис. 4 в виде графиков. Как видно из графиков, данная антенна имеет неплохие характеристики. Согласно результатам расчета, КСВН антенны не превышает значения 2,0 (на отражения теряется примерно не более 11 % мощности передатчика) в полосах частот 534...725 МГц и 945...1127 МГц. Более высо-

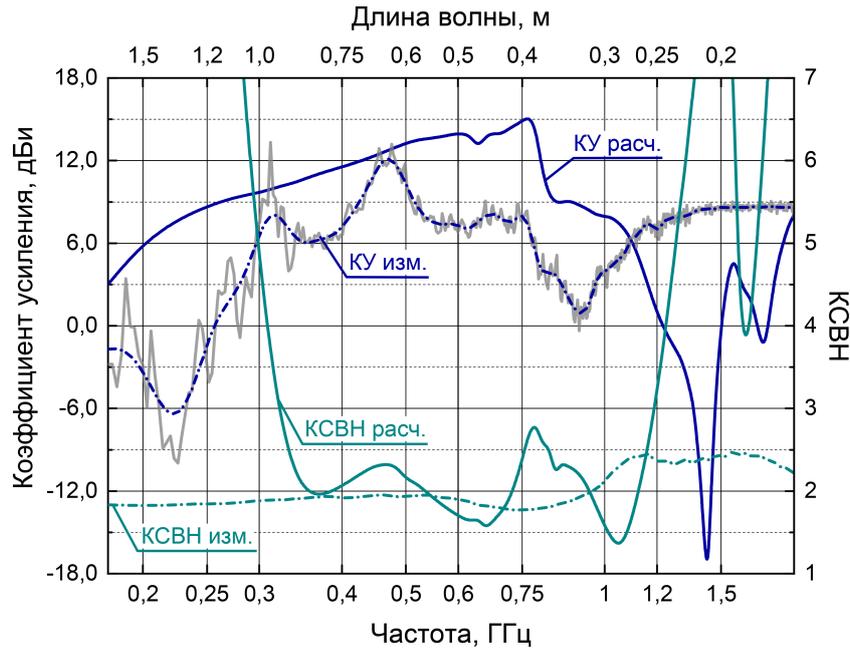


Рис. 4. КУ и КСВН двойной зигзагообразной антенны с рефлектором
Fig. 4. Amplification coefficient and VSWR of a double zigzag antenna with a reflector

кочастотный участок диапазона рассматривать не имеет смысла, так как КУ при этом имеет низкие значения. Значения КСВН, не превышающие значения 2,5 (на отражения теряется не более 18 % мощности передатчика), данная антенна имеет в полосах частот 330...755 МГц и 825...1160 МГц, также с низкими значениями КУ в более высокочастотной области. Измеренные значения КСВН не превышают 2,5 во всей рассматриваемой полосе и 2,0 в полосе от 200 до 950 МГц. Достаточно низкие и стабильные значения измеренного КСВН возможно объяснить применением устройства для согласования входного сопротивления каждого из излучателей, равного 75 Ом с сопротивлением приемно-передающего устройства, равного 50 Ом. Расчетное значение КУ имеет максимальное значение 15 дБи (относительно изотропного излучателя) на частоте 765 МГц. При снижении КУ не более чем на 3 дБ относительно максимума антенна обеспечивает работу в полосе частот 430...800 МГц. Измеренные значения КУ на некоторых участках диапазона схожи с расчетными с некоторой разницей в уровне. Максимум измеренного КУ находится на частоте 475 МГц с уровнем 12,5 дБи. Неравномерность измеренного КУ в пределах 3 дБ, за исключением максимума, наблюдается в полосе частот 300...780 МГц. Снижение измеренного КУ относительно максимума, не превышающее 3 дБ, наблюдается в полосе частот 425...520 МГц. С учетом полученных в ходе численного моделирования и проведения измерений КУ и КСВН при

условии снижения КУ относительно максимума в пределах 6 дБ и непревышении КСВН значений 2,5 данная антенна обеспечивает работу в полосе частот 330...760 МГц.

Согласно проведенной оценке КУ и КСВН рассматриваемой антенны, численная и экспериментальная оценка характеристик направленности данной антенны выполнена на трех частотах рабочей полосы: начальной $F_l = 330$ МГц, конечной $F_h = 750$ МГц и центральной $F_0 = 0,5 [F_l + F_h] = 545$ МГц. Расчетные и измеренные нормированные диаграммы направленности в вертикальной и горизонтальной плоскостях на основной поляризации приведены в полярной системе координат на рис. 5–7 в виде графиков. Как видно из графиков, результаты расчетов ДН повторяют результаты измерений с некоторыми отклонениями.

Для оценки величины кроссполяризационной развязки расчетные и измеренные нормированные диаграммы направленности в вертикальной и горизонтальной плоскостях на основной и перекрестной поляризациях приведены в декартовой системе координат на рис. 8–13.

Так как данная антенна предназначена для применения с использованием горизонтальной поляризации и не предназначена для работы в режиме поляризационной развязки, измерения кроссполяризационных диаграмм в вертикальной плоскости не проводились. Для оценки ширины ДН расчетные и измеренные нормированные

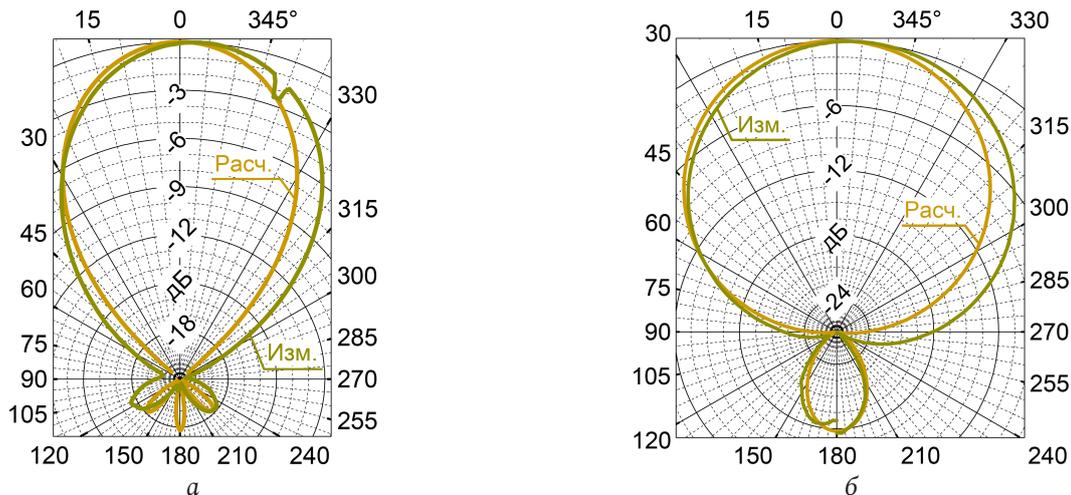


Рис. 5. ДН в горизонтальной (а) и вертикальной (б) плоскостях на частоте F_1
 Fig. 5. RP in the horizontal (a) and vertical (b) planes at the frequency F_1

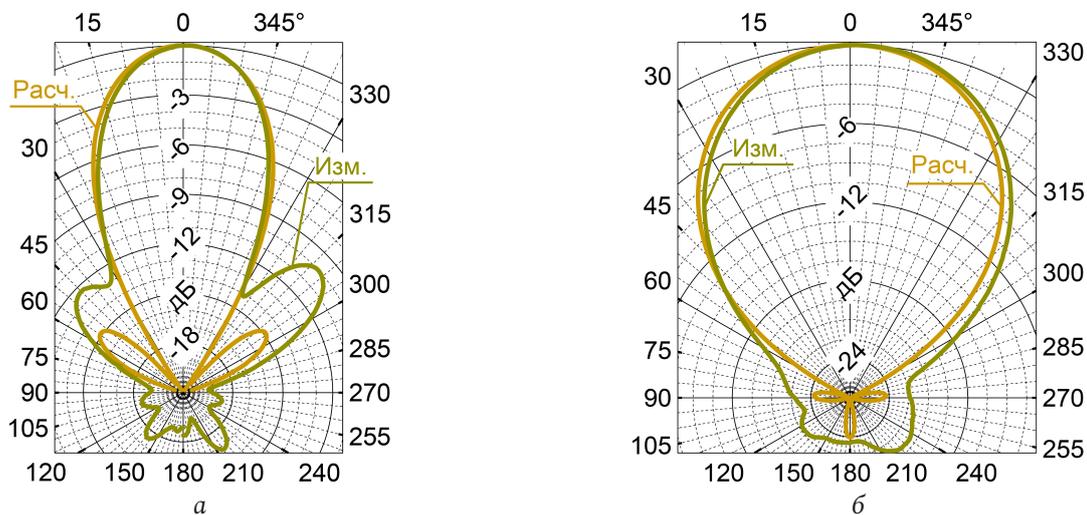


Рис. 6. ДН в горизонтальной (а) и вертикальной (б) плоскостях на частоте F_0
 Fig. 6. RP in the horizontal (a) and vertical (b) planes at the frequency F_0

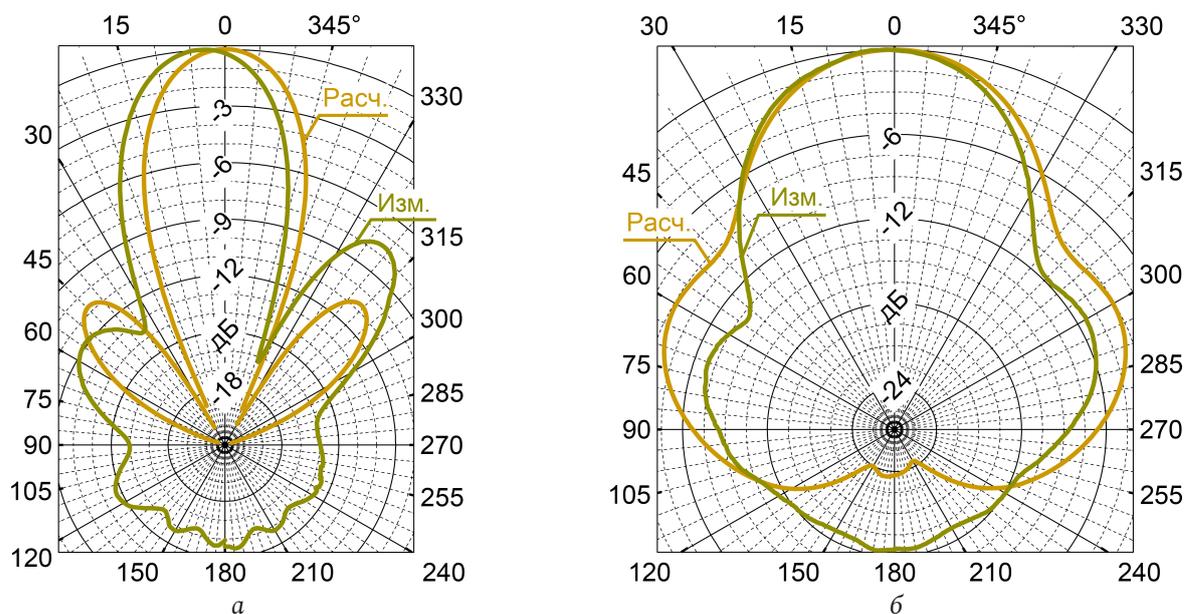


Рис. 7. ДН в горизонтальной (а) и вертикальной (б) плоскостях на частоте F_h
 Fig. 7. RP in horizontal (a) and vertical (b) planes at frequency F_h

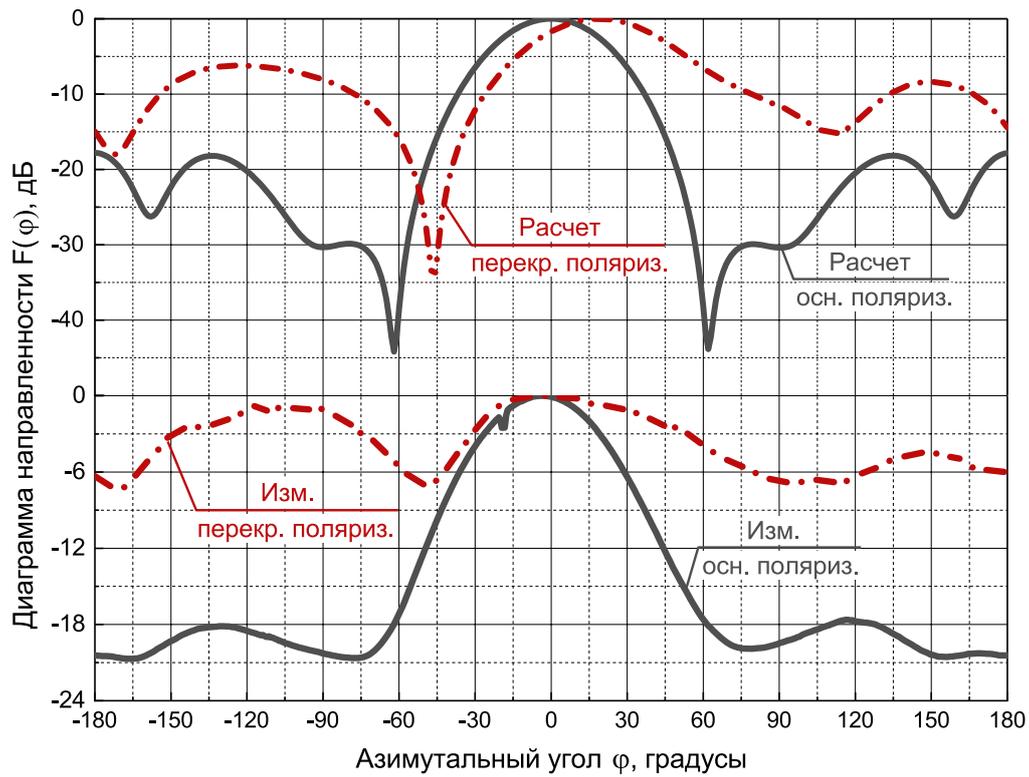


Рис. 8. ДН в горизонтальной плоскости на частоте F_1
 Fig. 8. RP in the horizontal plane at the frequency F_1

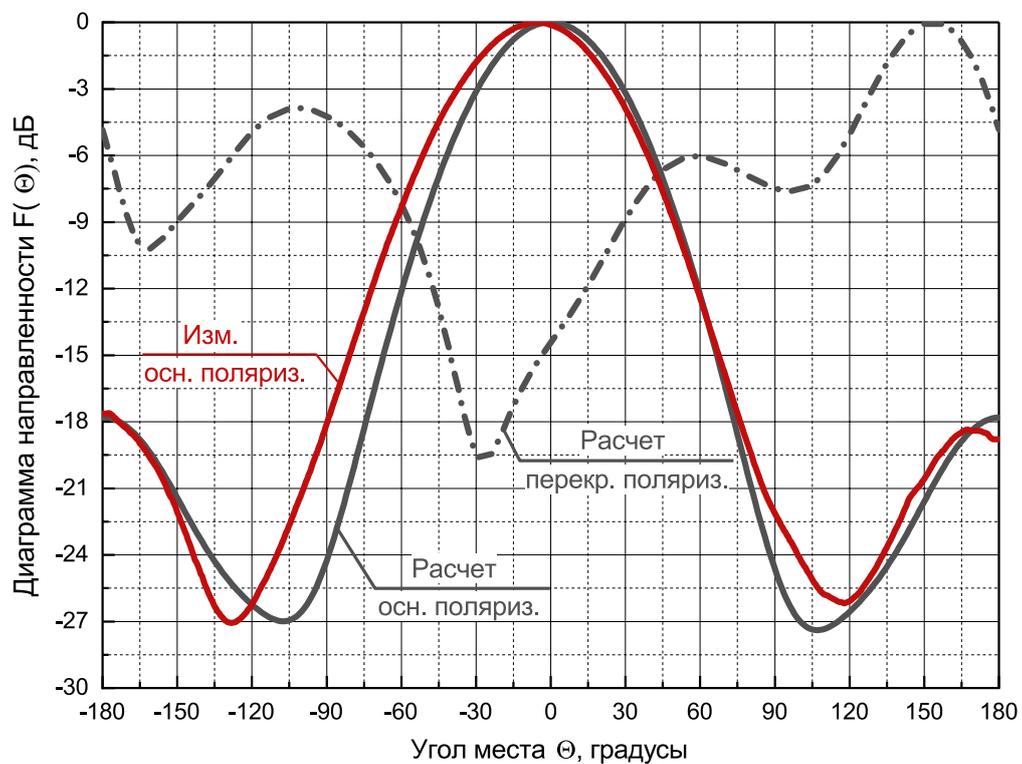


Рис. 9. ДН в вертикальной плоскости на частоте F_1
 Fig. 9. RP in the vertical plane at the frequency F_1

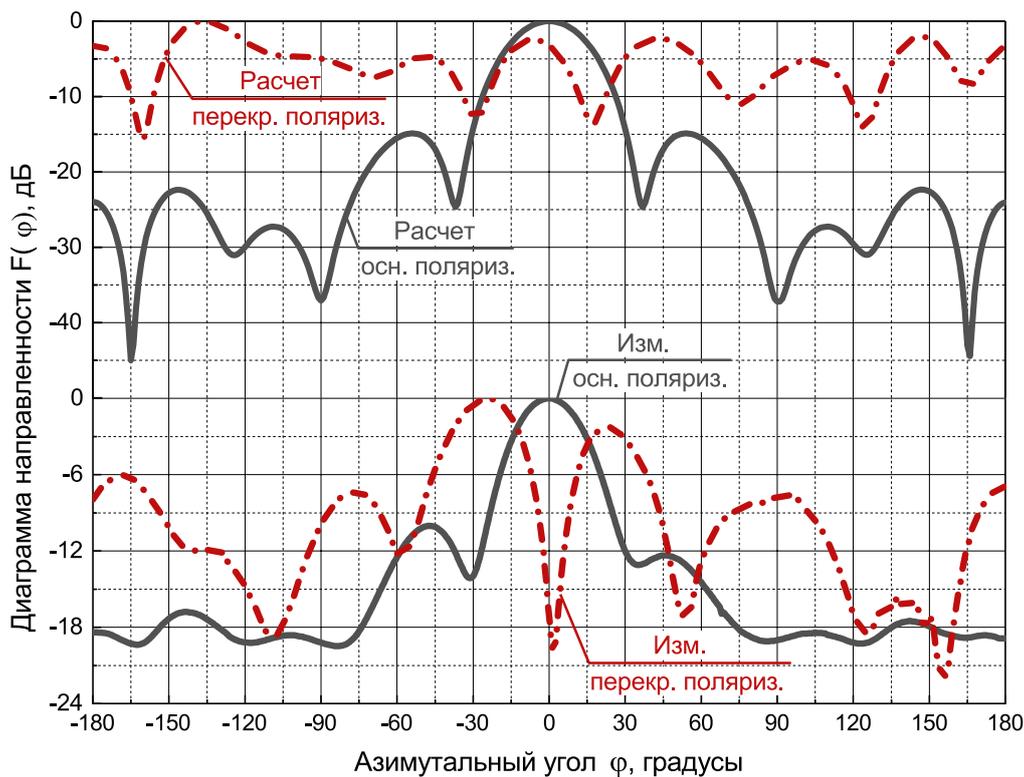


Рис. 10. ДН в горизонтальной плоскости на частоте F_0
Fig. 10. RP in the horizontal plane at the frequency F_0

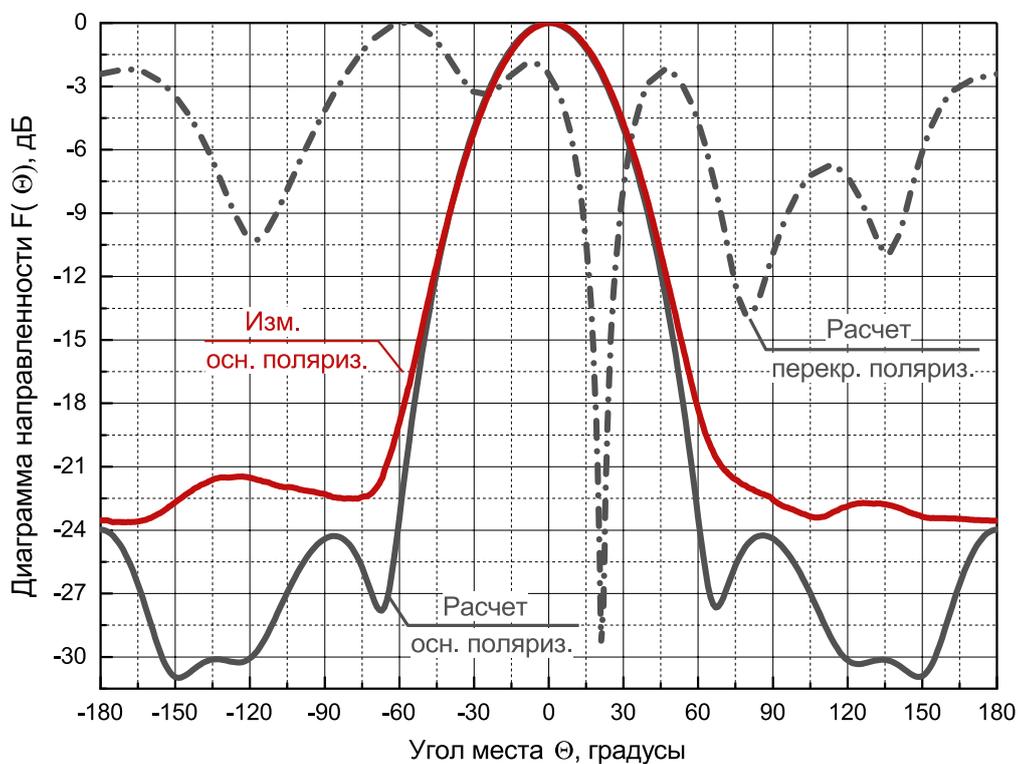


Рис. 11. ДН в вертикальной плоскости на частоте F_0
Fig. 11. RP in the vertical plane at the frequency F_0

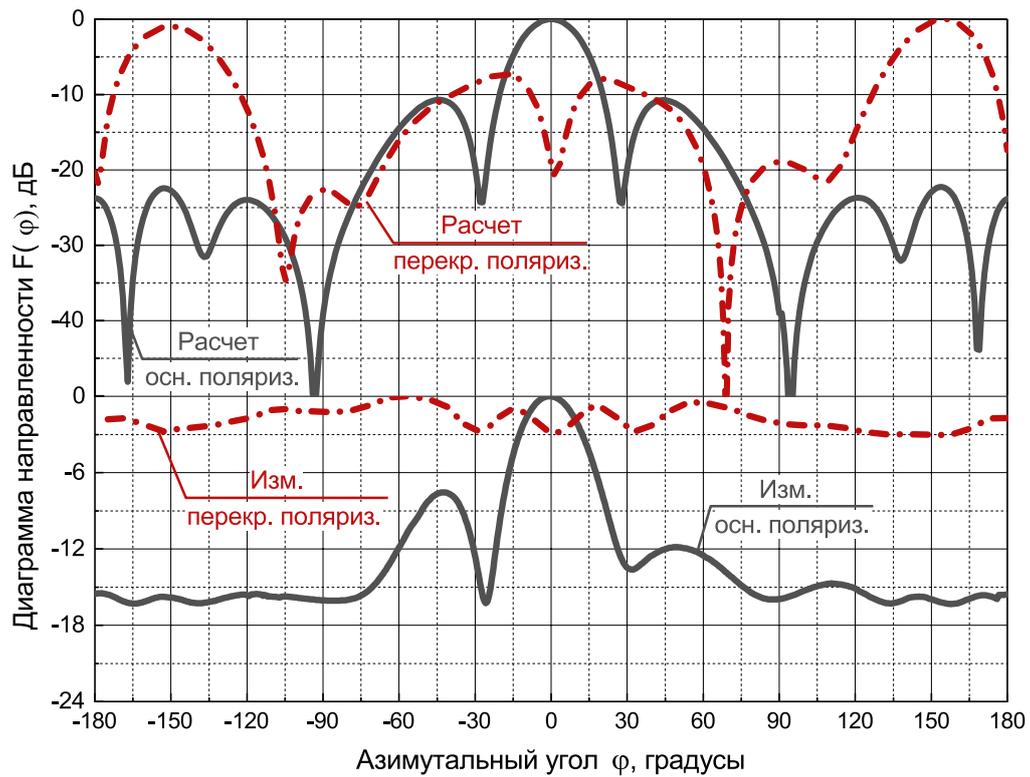


Рис. 12. ДН в горизонтальной плоскости на частоте F_h
 Fig. 12. RP in the horizontal plane at the frequency F_h

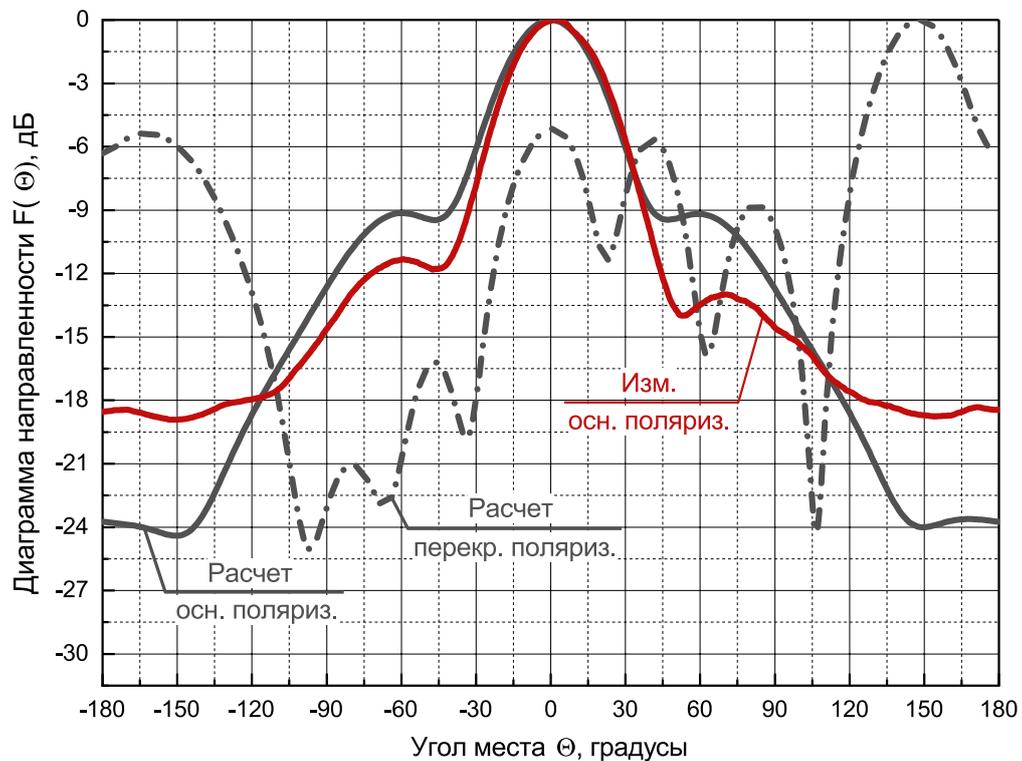


Рис. 13. ДН в вертикальной плоскости на частоте F_h
 Fig. 13. RP in the vertical plane at the frequency F_h

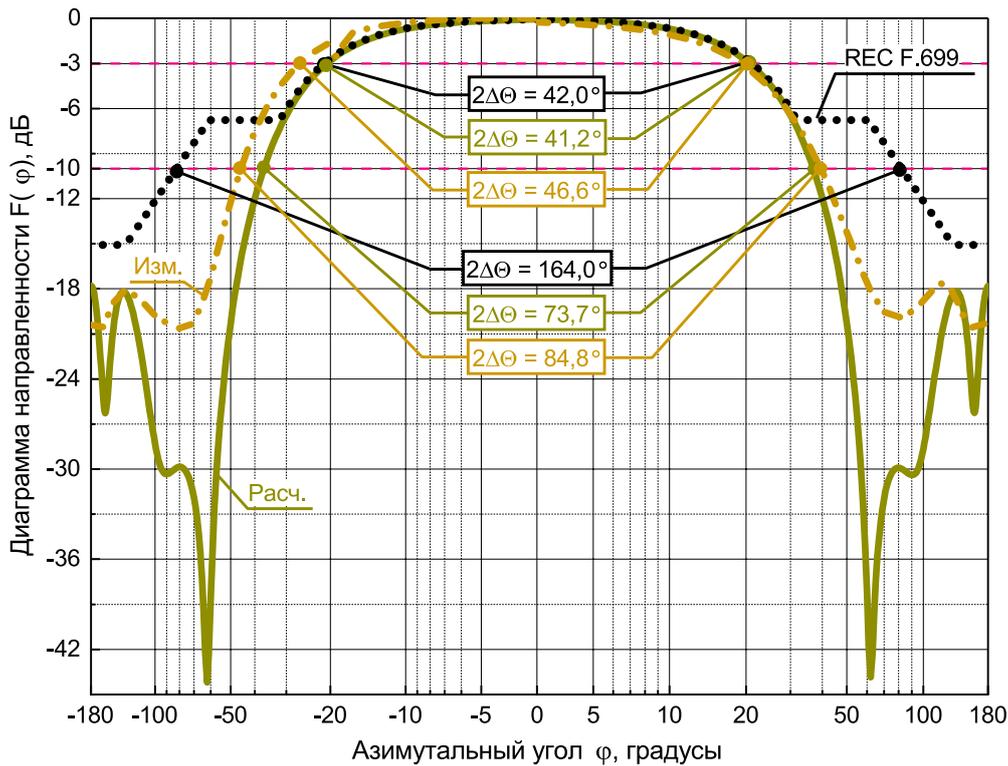


Рис. 14. ДН в горизонтальной плоскости на частоте F_1
 Fig. 14. RP in the horizontal plane at the frequency F_1

ДН в вертикальной и горизонтальной плоскостях в логарифмическом масштабе приведены в декартовой системе координат в виде графиков на рис. 14–19. На данных рисунках также приведены справочные ДН Рекомендаций МСЭ Rec. ITU-R F.699. Зависимости ширины ДН по уровням -3 дБ и -10 дБ, а также уровней первых боковых лепестков относительно максимума ДН от частоты приведены на рис. 20 в виде графиков для вертикальной и горизонтальной плоскостей. На рис. 21 представлены зависимости от частоты расчетных значений КУ, полученных по значениям ширины ДН по уровням -3 дБ и -10 дБ, а также величина коэффициента защитного действия, вычисленного как отношение мощности, излучаемой в направлении главного максимума ДН, к мощности, излучаемой в обратном направлении.

Расчет КУ выполнен по расчетным данным о ширине ДН по уровню -3 дБ и по уровню -10 дБ согласно соотношению [14]:

$$G = 10,0 \log_{10} [0,5(G_3 + G_{10})], \quad (3)$$

где

$$G_3 = 31000,0 / (2\Delta\theta_{-3\text{дБ}} 2\Delta\varphi_{-3\text{дБ}});$$

$$G_{10} = 91000,0 / (2\Delta\theta_{-10\text{дБ}} 2\Delta\varphi_{-10\text{дБ}}).$$

На рис. 5–7 заметна асимметрия измеренных ДН, которую возможно объяснить погрешностью

измерений, а также наличием устройства согласования и симметрирования, расположенного на некотором удалении в вертикальной плоскости от фазового центра антенны и имеющего металлический корпус.

Результаты расчета и измерения кроссполяризационной развязки по положению минимума в горизонтальной плоскости достаточно точно совпадают на начальной частоте F_1 (рис. 8), где оба минимума сдвинуты относительно нуля на -45° . Совпадение расчетного и измеренного минимума кроссполяризационной развязки свидетельствует о практическом соответствии расчетной модели экспериментальному образцу, при этом, так как в расчетной модели не присутствует устройство согласования и симметрирования, данное устройство в измеряемом образце в горизонтальной плоскости влияния на кроссполяризационную развязку не оказывает. В вертикальной плоскости на начальной частоте расчетный минимум кроссполяризационной развязки (рис. 9) сдвинут на -30° .

На центральной частоте F_0 измеренный уровень минимума кроссполяризационной развязки в горизонтальной плоскости (рис. 10) практически находится в фазовом центре антенны и имеет величину $-20,1$ дБ. Расчетный минимум сдвинут относительно фазового центра на 17° при

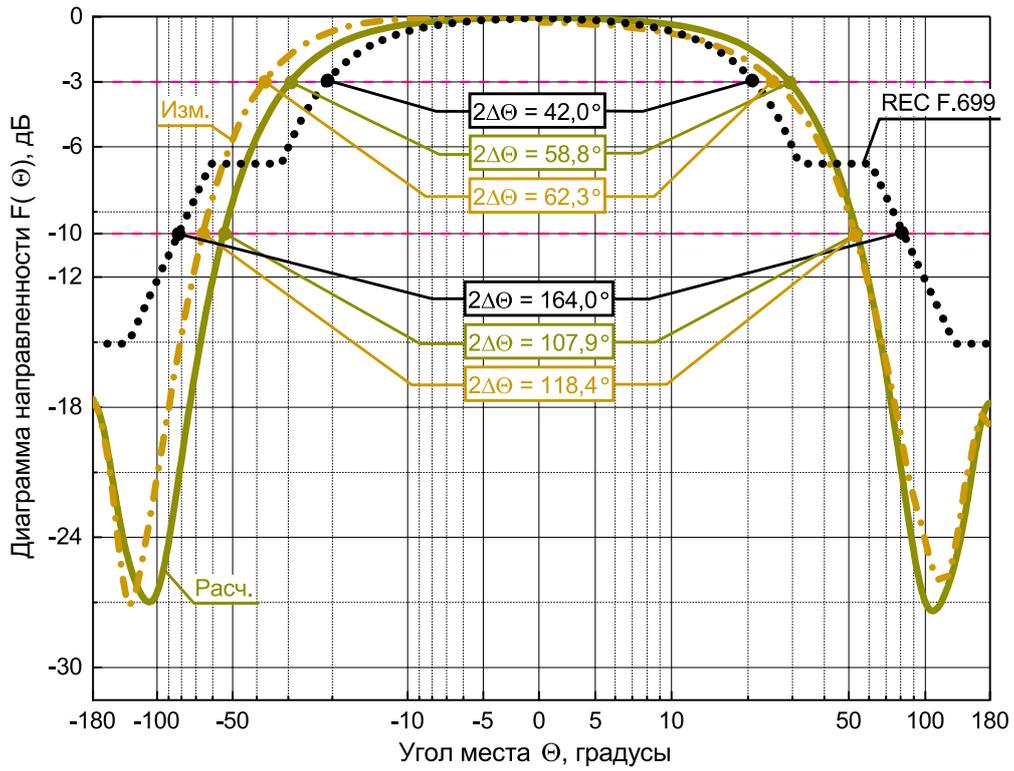


Рис. 15. ДН в вертикальной плоскости на частоте F_1
Fig. 15. RP in the vertical plane at the frequency F_1

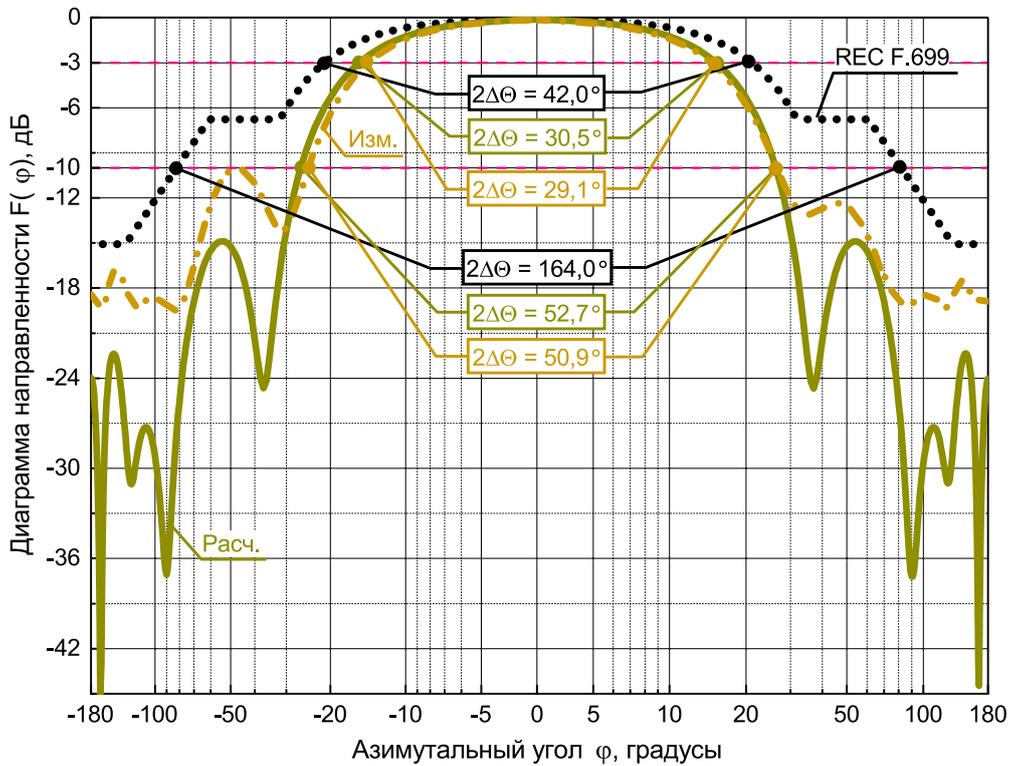


Рис. 16. ДН в горизонтальной плоскости на частоте F_0
Fig. 16. RP in the horizontal plane at the frequency F_0

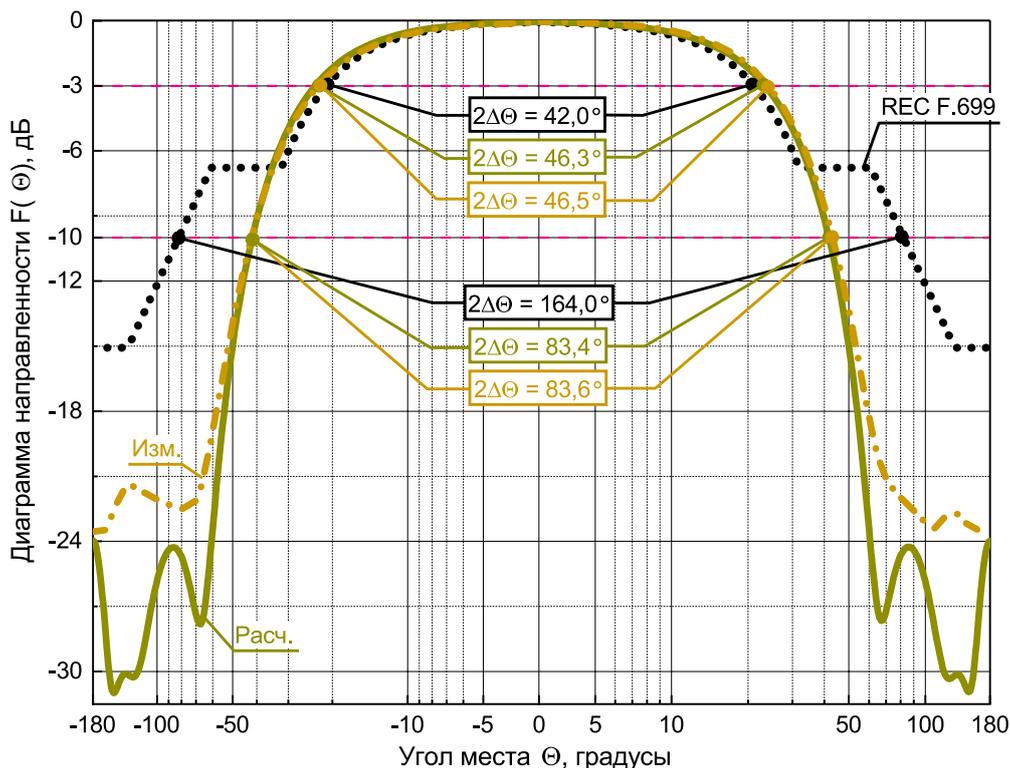


Рис. 17. ДН в вертикальной плоскости на частоте F_0
 Fig. 17. RP in the vertical plane at the frequency F_0

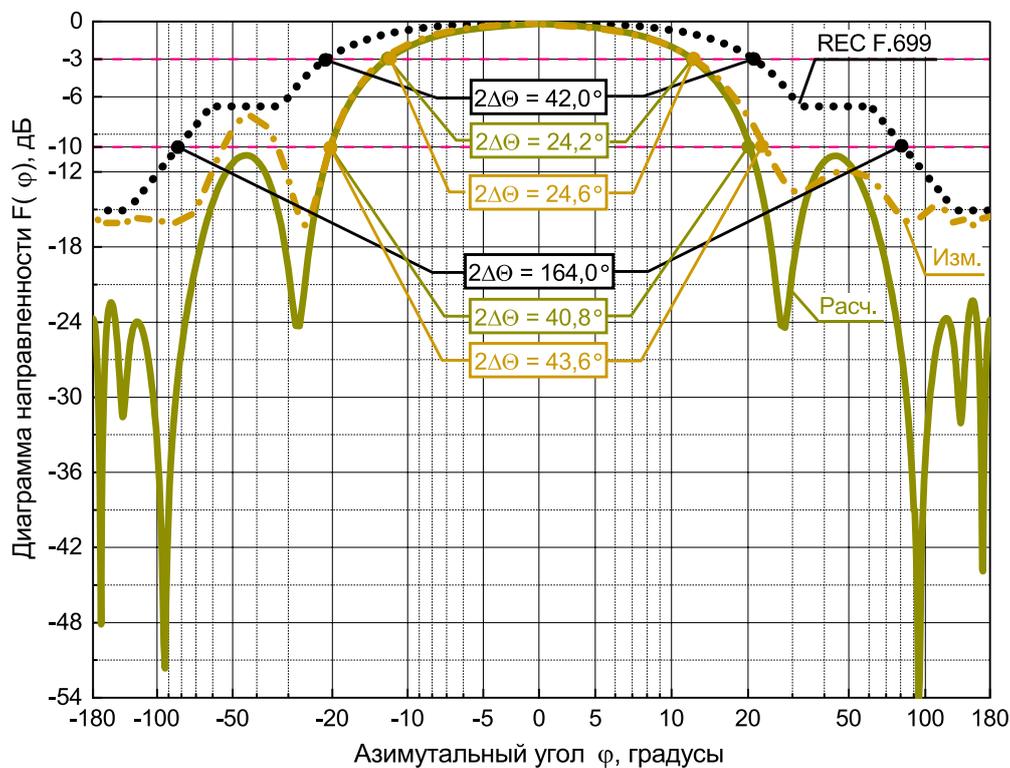


Рис. 18. ДН в горизонтальной плоскости на частоте F_h
 Fig. 18. RP in the horizontal plane at the frequency F_h

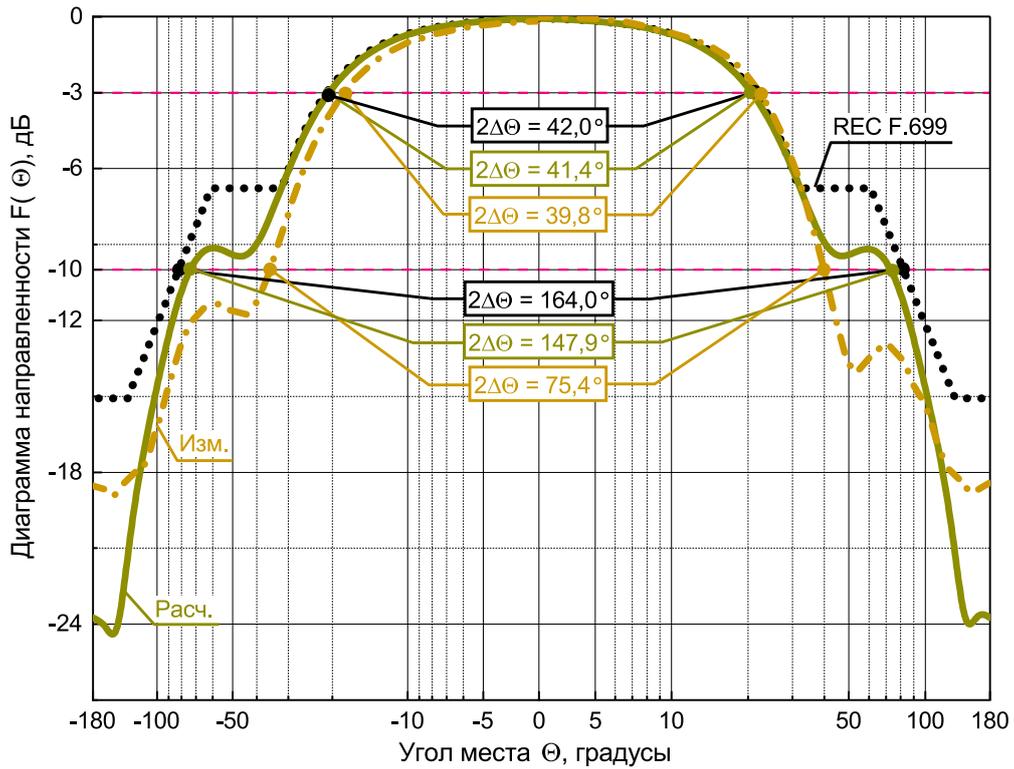


Рис. 19. ДН в вертикальной плоскости на частоте F_h
 Fig. 19. RP in the vertical plane at the frequency F_h

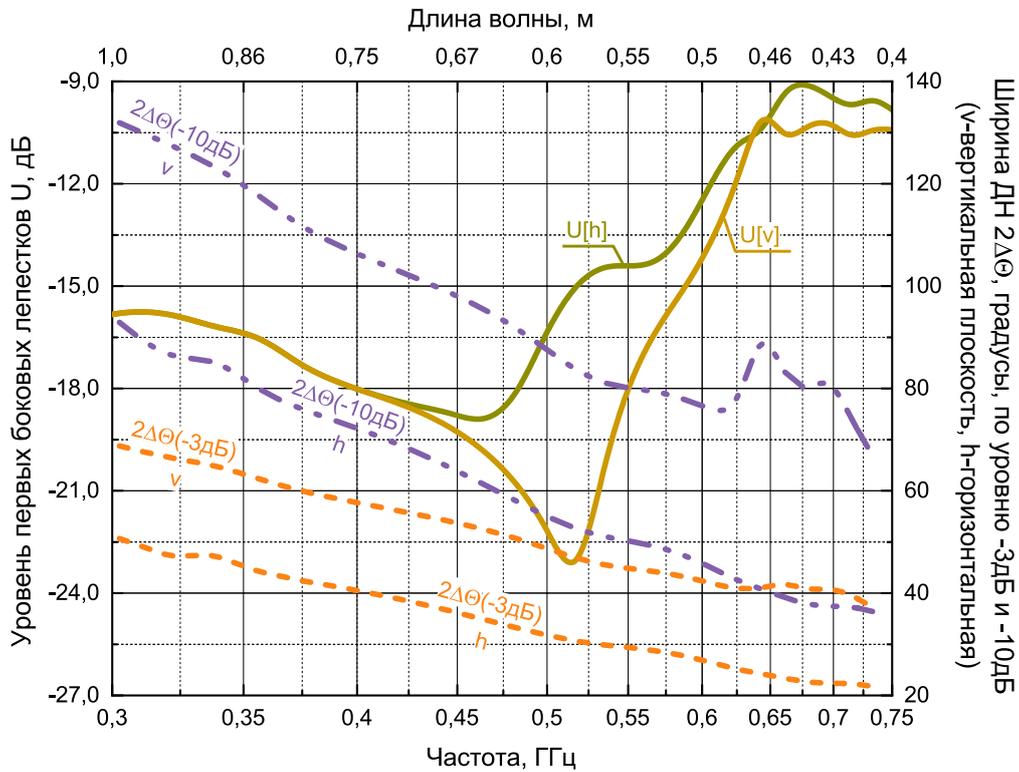


Рис. 20. Ширина ДН, уровень первых боковых лепестков
 Fig. 20. The width of the RP, the level of the first side lobes

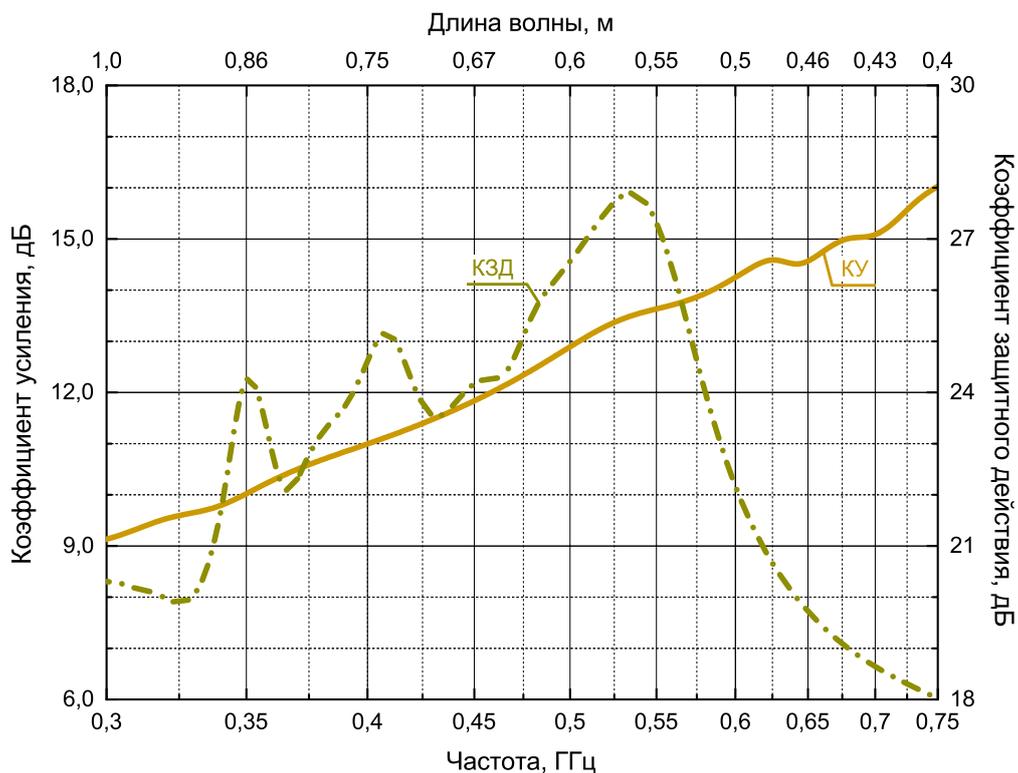


Рис. 21. КУ и КЗД антенны
Fig. 21. Amplification coefficient and protective action coefficient of antenna

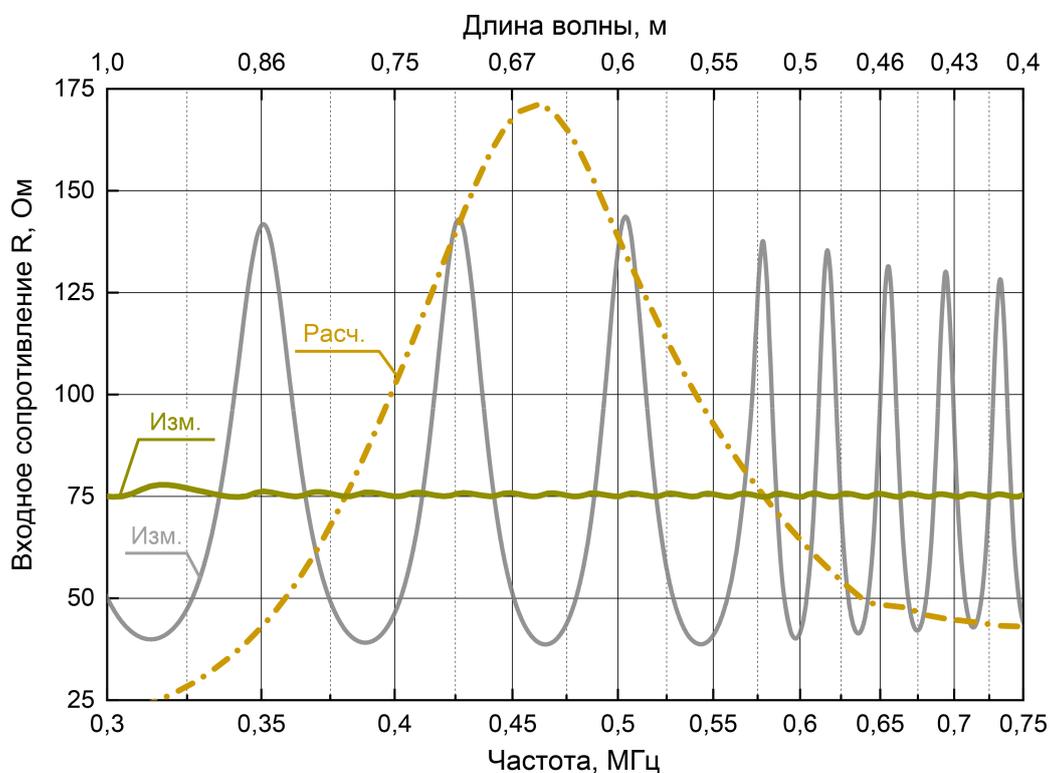


Рис. 22. Входное сопротивление антенны
Fig. 22. Antenna input impedance

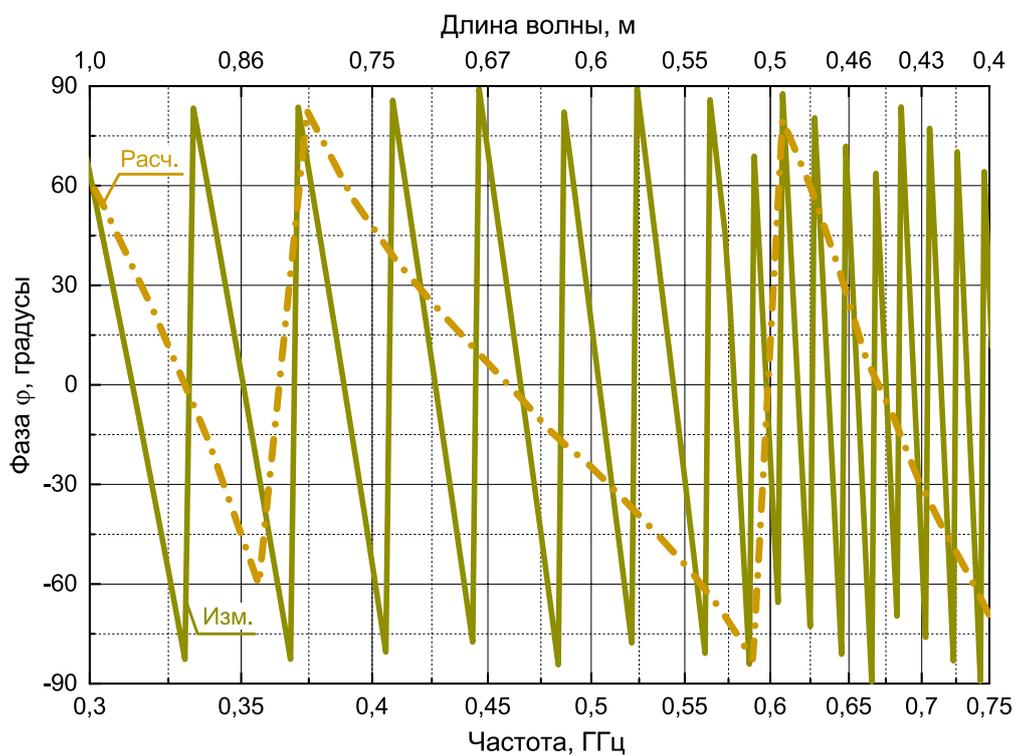


Рис. 23. Фазовая характеристика комплексного сопротивления
 Fig. 23. Phase characteristic of complex resistance

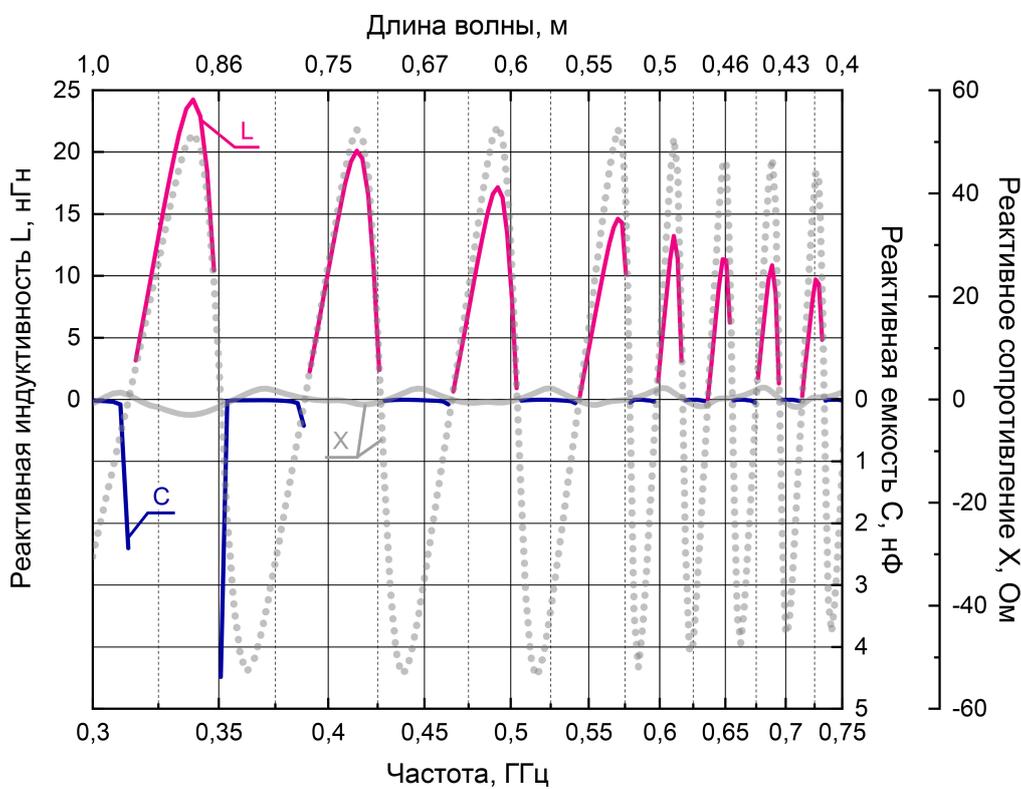


Рис. 24. Измеренные значения реактивного сопротивления
 Fig. 24. Measured reactance values

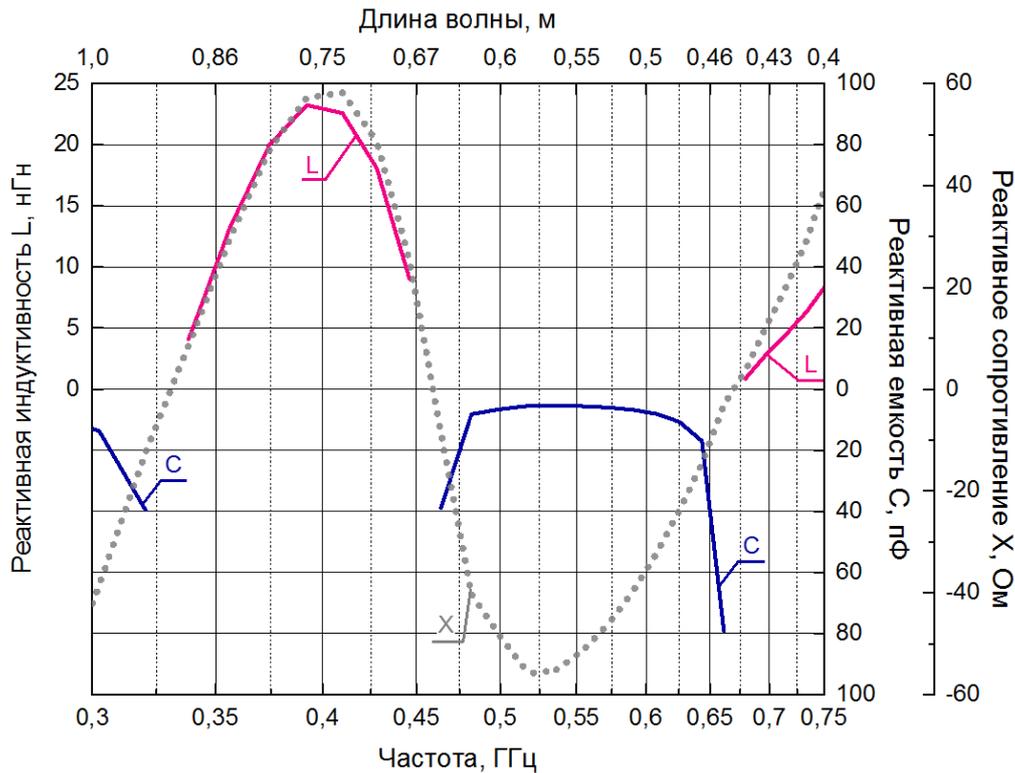


Рис. 25. Расчетные значения реактивного сопротивления
 Fig. 25. Calculated reactance values

величине $-13,6$ дБ. В вертикальной плоскости (рис. 11) на центральной частоте F_0 расчетный минимум кроссполяризованной развязки сдвинут относительно фазового центра на $20,7^\circ$ с уровнем $-29,3$ дБ. На конечной частоте рассматриваемого диапазона F_h расчетный и измеренный минимумы кроссполяризованной развязки в горизонтальной плоскости (рис. 12) совпадают с фазовым центром антенны и различаются по уровням, $-20,2$ дБ и $-3,0$ дБ соответственно. В вертикальной плоскости (рис. 13) кроссполяризованный минимум сдвинут на $21,5^\circ$ с уровнем $-11,3$ дБ.

Согласно полученным расчетным и экспериментальным данным, требования ГОСТ Р 50867-96 по уровню максимумов кроссполяризации (или уровню кроссполяризованного излучения в заданном пространственном секторе углов вблизи направления главного излучения), которые должны составлять от -15 до -30 дБ, не выполняются, а также расчетные и измеренные кроссполяризованные минимумы не совпадают с фазовым центром антенны, что требует дополнительного анализа конструкции (модели) антенны и ее последующей доработки.

По ширине расчетные и измеренные ДН на начальной частоте F_l в вертикальной (рис. 15) и горизонтальной (рис. 14) плоскостях по уровню -3 дБ

и -10 дБ превышают значения справочных диаграмм Рекомендаций МСЭ Rec. ITU-R F.699. На центральной и конечной частотах F_0 и F_h в вертикальной (рис. 17, 19) и горизонтальной (рис. 16, 18) плоскостях расчетные и измеренные ДН удовлетворяют требованиям указанной рекомендации, в том числе и по уровню заднего излучения на всех трех рассматриваемых частотах.

Расчетные значения уровней первых боковых лепестков (УПБЛ) в вертикальной и горизонтальной плоскостях (рис. 20) совпадают в полосе частот от 300 до 425 МГц. Минимальные значения УПБЛ $-23,1$ дБ наблюдаются в вертикальной плоскости на частоте 513 МГц и $-18,9$ дБ на частоте 462 МГц в горизонтальной плоскости. Максимум УПБЛ в горизонтальной плоскости -9 дБ имеется на частоте 675 МГц, в вертикальной плоскости $-10,1$ дБ на частоте 645 МГц. УПБЛ в горизонтальной плоскости выше, чем в вертикальной.

Расчетное значение ширины ДН с ростом частоты уменьшается как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях, что приводит к росту расчетного КУ (рис. 21) и КЗД. На частотах до 340 и свыше 530 МГц наблюдается снижение КЗД из-за роста заднего излучения.

На рис. 22 представлены графики расчетного и измеренного входного сопротивления антен-

ны. Как видно из графиков, измеренные значения входного сопротивления имеют осциллирующий характер, изменяющийся по амплитуде в пределах от 39 до 144 Ом. После сглаживания значения входного сопротивления стремятся к величине 75 Ом.

Осциллирующий характер входного сопротивления поясняется представленными на рис. 23 графиками нормированных относительно $\pm 90^\circ$ значений фазовой характеристики (ФХ) комплексного сопротивления. Экстремумы входного сопротивления располагаются на частотах, где ФХ меняет знак с положительного на отрицательный с периодом в 180° . Измеренные и расчетные значения реактивного сопротивления представлены на рис. 24, 25 в виде графиков.

Как видно из графиков, реактивное сопротивление также имеет осциллирующий характер, где смена знака сопротивления происходит на частотах, соответствующих частотам смены знака ФХ. Амплитуда колебаний расчетного и измеренного реактивного сопротивления лежит в пределах ± 60 Ом. Предельные измеренные значения реактивной индуктивности плавно снижаются по мере увеличения частоты с 25 до 10 нГн, а предельные значения реактивной емкости – с 4,5 нФ практически до нуля. Амплитуда колебаний сглаженной функции измеренного реактивного сопротивления стремится к нулю на всем участке рассматриваемого диапазона, что указывает на хорошее согласование антенны практически во всей рассматриваемой полосе частот.

Заключение

Результаты проведенной численно-экспериментальной оценки рассматриваемой конструкции зигзагообразной антенны УВЧ-диапазона средств радиорелейной связи показывают, что антенна имеет неплохие характеристики по согласованию в полосе частот от 300 до 750 МГц. Однако значения КСВН превышают предельно допустимые КСВН = 1,45, установленные Приказом Министерства информационных технологий и связи РФ от 23 ноября 2006 г. № 153 и ГОСТ Р 50867-96. По уровню огибающей ДН, бокового и заднего излучения данная антенна соответствует требованиям указанных документов, а также Рекомендациям МСЭ ITU-R F.699, за исключением начала участка диапазона, где имеется некоторое (до 5 дБ) превышение уровня огибающей. Требования ГОСТ Р 50867-96 по уровню максимумов кроссполяризации (или уровню кроссполяризованного излучения в заданном пространственном секторе углов вблизи направления главного излучения), которые должны составлять от -15 до -30 дБ, не выполняются, а также расчетные и измеренные кроссполяризационные минимумы не совпадают с фазовым центром антенны, что требует дополнительного анализа конструкции (модели) антенны с целью ее последующей доработки для соответствия требованиям.

Для дальнейшего усовершенствования характеристик антенны целесообразным представляется подход, основанный на использовании в их конструкции искусственных композитных структур – метаматериалов [15–17].

Список литературы

1. Антенно-фидерные устройства военных средств и комплексов радиосвязи / под ред. В.И. Власенко. СПб.: ВАС, 2016. С. 192–194.
2. Харченко К.П. Зигзагообразная антенна // Радио. 1961. № 3. С. 47.
3. Харченко К.П. Антенна для дальнего приема телевидения // Радио. 1961. № 4. С. 28–29.
4. Харченко К.П. Двойные зигзагообразные антенны // Радио. 1961. № 8. С. 43–46.
5. Харченко К.П. УКВ антенны. М.: ДОСААФ, 1969. 111 с.
6. Патент RU 2288526. Полиромбическая антенна (варианты) / А.М. Сомов, Р.В. Кебетов, А.Ю. Виноградов; 27.11.2006.
7. Патент RU 2318276. Сверхширокополосная комбинированная зигзагообразная антенна / В.И. Милкин, С.А. Демиденко, В.М. Галишев; 27.02.2008.
8. Патент на полезную модель RU 68784. Диапазонная направленная антенна / А.А. Лобов; 27.11.2007.
9. Патент RU 2324268. Широкополосная зигзагообразная антенна / В.И. Милкин, С.А. Демиденко; 10.05.2008.
10. Патент RU 2355084. Рамочная антенна (варианты) / А.М. Сомов, А.Б. Кожухов, Р.В. Кабетов; 10.05.2009.
11. Патент RU 2395878. Двойная зигзагообразная антенна / А.М. Сомов, А.Б. Кожухов, К.А. Кожухов; 27.07.2010.
12. Патент на полезную модель RU 78987. Зигзагообразный излучатель / А.А. Лобов; 10.12.2008.
13. Патент RU 2580406. Широкополосная направленная зигзагообразная квазишунтовая антенна / В.И. Милкин, В.Н. Лебедев, К.Ю. Боброва, Н.В. Калитенков; 10.04.2016.
14. Фролов О.П., Вальд В.П. Зеркальные антенны для земных станций спутниковой связи. М.: Горячая линия – Телеком, 2008. 448 с.

15. Перспективы использования метаматериалов в антеннах нового поколения / А.Л. Бузов [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2017. Т. 20, № 3. С. 15–20. URL: <https://journals.ssau.ru/pwp/article/view/7078>
16. Бузов А.Л., Ключев Д.С., Нещерет А.М. Возможности совершенствования антенной техники путем использования киральных метаматериалов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2018. Т. 21, № 3. С. 66–72. URL: <https://journals.ssau.ru/pwp/article/view/7020>
17. Нещерет А.М. Анализ микрополосковых антенн с подложками из киральных метаматериалов методом сингулярных интегральных уравнений // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2018. Т. 21, № 4. С. 6–16. URL: <https://journals.ssau.ru/pwp/article/view/6943>

Информация об авторе

Медведев Юрий Валентинович, 1974 г. р., кандидат технических наук, начальник лаборатории ФГБУ «16 ЦНИИИ» Минобороны России, г. Мытищи, Московская обл., Россия. Автор и соавтор 73 научных работ, в том числе 9 патентов РФ на изобретения, 1 патента на полезную модель и 1 свидетельства Роспатента о регистрации программы для ЭВМ.

Область научных интересов: антенно-фидерные устройства, фазированные антенные решетки, диэлектрические купольные линзовые антенны, программное обеспечение расчета характеристик антенно-фидерных устройств.

E-mail: yu.v.medvedev@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2982-755X>

Physics of Wave Processes and Radio Systems

2023, vol. 26, no. 3, pp. 59–78

DOI [10.18469/1810-3189.2023.26.3.59-78](https://doi.org/10.18469/1810-3189.2023.26.3.59-78)
UDC 621.396.67
Original Research

Received 22 March 2023
Accepted 24 April 2023
Published 27 September 2023

Numerical and experimental score of the zigzag UHF antenna characteristics of radio relay communication tools for compliance with the requirements of current legislation and international standards

Yuriy V. Medvedev 

FSBI «16-th CSR-TI» Ministry of Defence of the Russian Federation
17, Komarova Street,
Mytishchi, Moscow Region, 141006, Russia

Abstract – Background. To ensure the integrity, stability of operation and security of the unified telecommunication network of the Russian Federation, as well as to solve the issues of electromagnetic compatibility of radio-relay communication facilities, it is required to use antennas that satisfy both mandatory requirements fixed at the legislative level and requirements of a recommendatory nature of international and regional levels. **Aim.** To establish compliance of the most frequently used zigzag antennas in radio-relay communication facilities with the requirements of the current legislation and international standards on the basis of numerical and experimental evaluation of their characteristics. **Methods.** On the basis of numerical methods the characteristics of the considered antennas were calculated, and also measurements of these characteristics were carried out in an anechoic shielded chamber. **Results.** The results of numerical and experimental estimation of gain, voltage standing wave ratio, antenna patterns, crosspolarization decoupling and complex impedance of the double zigzag antenna with UHF reflector of the radio-relay communication range are presented. It is shown that this antenna provides operation in a wide frequency band, and in the considered section of the range does not fully meet the requirements for antennas of radio-relay communications. **Conclusion.** On the basis of the analysis of the requirements of the current legislation and international requirements for the antennas of radio-relay communication facilities and the results of numerical and experimental evaluation of the characteristics of the antennas under consideration, it was established that they comply with the requirements of ITU Recommendations ITU-R F.699 in terms of the envelope level of antenna patterns, side and back radiation, except for the beginning of the range section, where there is some excess of the envelope level. The requirements of GOST R 50867-96 for the level of crosspolarization maxima (or the level of crosspolarization radiation in a given spatial sector of angles near the main radiation direction) are not met.

Keywords – zigzag antenna; voltage standing wave ratio coefficient; antenna gain; antenna pattern; width of the antenna pattern; outside radiation; radio-relay means.

✉ yu.v.medvedev@yandex.ru (Yuriy V. Medvedev)

 © Yuriy V. Medvedev, 2023

References

1. V. I. Vlasenko, Ed. *Antenna-Feeder Devices of Military Facilities and Radio Communication Complexes*. Saint Petersburg: VAS, 2016. (In Russ.)
2. K. P. Kharchenko, “Zigzag Antenna,” *Radio*, no. 3, pp. 47, 1961. (In Russ.)

3. K. P. Kharchenko, "Antenna for long-range television reception," *Radio*, no. 4, pp. 28–29, 1961. (In Russ.)
4. K. P. Kharchenko, "Dual zigzag antennas," *Radio*, no. 8, pp. 43–46, 1961. (In Russ.)
5. K. P. Kharchenko, *VHF Antenna*. Moscow: DOSAAF, 1969. (In Russ.)
6. A. M. Somov, R. V. Kebetov, and A. Yu. Vinogradov, "Polyrhombic antenna (options)," RU Patent 2288526, Nov. 27, 2006. (In Russ.)
7. V. I. Milkin, S. A. Demidenko, and V. M. Galishev, "Ultra wideband combined zigzag antenna," RU Patent 2318276, Feb. 27, 2008. (In Russ.)
8. A. A. Lobov, "Range directional antenna," RU Patent Utility Model 68784, Nov. 27, 2007. (In Russ.)
9. V. I. Milkin and S. A. Demidenko, "Broadband zigzag antenna," RU Patent 2324268, May 10, 2008. (In Russ.)
10. A. M. Somov, A. B. Kozhukhov, and R. V. Kabetov, "Loop antenna (options)," RU Patent 2355084, May 10, 2009. (In Russ.)
11. A. M. Somov, A. B. Kozhukhov, and K. A. Kozhukhov, "Dual zigzag antenna," RU Patent 2395878, Jul. 27, 2010. (In Russ.)
12. A. A. Lobov, "Zigzag emitter," RU Patent Utility Model 78987, Dec. 10, 2008. (In Russ.)
13. V. I. Milkin, V. N. Lebedev, K. Yu. Bobrova, and N. V. Kalitenkov, "Broadband directional zigzag quasi-shunt antenna," RU Patent 2580406, Apr. 10, 2016. (In Russ.)
14. O. P. Frolov and V. P. Val'd, *Reflector Antennas for Satellite Earth Stations*. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2008. (In Russ.)
15. A. L. Buzov et al., "Prospects of using metamaterials in the new generation antennas," *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 20, no. 3, pp. 15–20, 2017, url: <https://journals.ssau.ru/pwp/article/view/7078>. (In Russ.)
16. A. L. Buzov, D. S. Klyuev, and A. M. Neshcheret, "Possibilities of improvement of the antenna technology through the use of chiral metamaterials," *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 21, no. 3, pp. 66–72, 2018, url: <https://journals.ssau.ru/pwp/article/view/7020>. (In Russ.)
17. A. M. Neshcheret, "Analysis of microstrip antennas with chiral metamaterials substrates by method of singular integral equations," *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 21, no. 4, pp. 6–16, 2018, url: <https://journals.ssau.ru/pwp/article/view/6943>. (In Russ.)

Information about the Author

Yuriy V. Medvedev was born in 1974, Candidate of Technical Sciences, head of laboratory of FSBI «16-th CSR-TI» Ministry of Defence of the Russian Federation, Mytishchi, Moscow Region, Russia. Author and co-author of 73 scientific works, including 9 patents of the Russian Federation for inventions, 1 patent for a utility model and 1 certificate of Rospatent for registration of a computer program.

Research interests: antennas and feeder devices, phased antenna arrays, dielectric dome lens antennas, software for calculating characteristics of antenna-feeder devices.

E-mail: yu.v.medvedev@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2982-755X>