

А.С. НЕРСИСЯН, Р.А. ДАВТЯН, А.К. АГАРОНЯН, В.Г. АВETИСЯН
ПОСТРОЕНИЕ ВСЕНАПРАВЛЕННОЙ АНТЕННЫ НА КРУГЛОМ
ВОЛНОВОДЕ С ПРОСТЫМ ВОЗБУДИТЕЛЕМ РАБОЧЕЙ МОДЫ E_{01}

Предлагается использование круглого волновода с аксиально симметричной модой E_{01} . Такой вертикально установленный волновод содержит на разных высотных ярусах поперечные излучающие щели. Созданной таким образом антенне возможно придать свойство всенаправленности в азимутальной плоскости, что важно для систем подвижной связи. На основе масштабного моделирования представлены расчет и конструирование дешевого в изготовлении и надежного в работе возбуждателя моды E_{01} .

Ключевые слова: прямоугольный и круглый волноводы, масштабное моделирование, возбуждатель моды E_{01} .

Введение. Обычно системы наземной подвижной связи работают на волнах вертикальной поляризации. Пример тому - мобильная наземная связь, подвижные службы для различных гражданских услуг (такси, скорая помощь и т.д.). Отчасти требование вертикальной поляризации объясняется службой сетей наземного телевидения на волнах горизонтальной поляризации, которые должны работать в условиях электромагнитной совместимости с другими наземными службами. Исходя из этого, антенны наземной подвижной связи проектируются для работы на вертикальной поляризации.

Следующим требованием является ее всенаправленность в азимутальной (горизонтальной) плоскости, поскольку абонент подвижной связи может находиться в любой угловой координате по азимуту относительно базовой станции, где и устанавливается ее всенаправленная антенна. По дальности обеспечения связи наземные системы подвижной связи обычно проектируют на максимальные расстояния до 20 ... 30 км. Для обеспечения связи на такие расстояния, как показывает практика, более чем достаточна мощность до 50 Вт.

С точки зрения всенаправленности в азимутальной плоскости и обеспечения вертикальной поляризации излучаемой волны, удобны известные коаксиальные щелевые антенны [1-3]. Поскольку антенна работает на ТЕМ моде

коаксиальной линии, то наличие внутреннего проводника неизбежно. Для прочности антенны и обеспечения соосности внутреннего и внешнего проводников необходим узел, находящийся в конце антенны. Оба обстоятельства приводят к усложнению конструкции антенны.

В [4-6] описана многоярусная антенна вертикальной поляризации с модой H_{11} и спаренными полуволновыми поперечными излучающими щелями на круглом волноводе. Такая антенна проще в реализации из-за отсутствия внутреннего проводника, и вопрос обеспечения соосности внутреннего и внешнего проводников отпадает. Однако мода H_{11} круглого волновода не обладает аксиальной симметрией. Поперечные, относительно длины волновода, излучающие щели на различных высотных ярусах необходимо располагать смещенными по азимуту для получения достаточной всенаправленности такой антенны.

В плане всенаправленности антенны в азимутальной плоскости интерес представляет использование моды E_{01} круглого волновода, имеющей аксиальную симметрию структуры поля, подобно моде $ТЕМ$ коаксиальной линии передачи. При работе волновода на моде E_{01} на внутренней стороне стенки волновода также возникают поверхностные токи в направлении его продольной оси. Установленный вертикально круглый волновод с такой рабочей модой и с поперечными щелями в его высотных ярусах будет являться антенной вертикально поляризованной волны. Вопрос конструирования такой антенны, исследования диаграмм ее направленности, свойств полученных диаграмм в азимутальной плоскости (в зависимости от конфигураций расположения щелей в плоскостях различных ярусов) для ее практического применения представляется актуальным. Наличие же моды E_{01} в круглом волноводе обеспечивается соответствующим ее возбудителем скомпонованной антенны.

Цель статьи - построение всенаправленной антенны на круглом волноводе с модой E_{01} и с дешевым в изготовлении и надежным в работе в естественных условиях возбудителем этой моды.

Выбор и расчет возбудителя моды E_{01} в круглом волноводе. В литературе описаны различные возбудители моды E_{01} в круглом волноводе [7, 8]. К их первой группе относятся возбудители, выполненные в виде стыков круглого волновода и коаксиальной линии с возбуждающим штырем. Ко второй группе относятся возбудители, выполненные в виде стыков круглого и прямоугольного волноводов. Для подавления основной моды H_{11} круглого волно-

вода применяются короткозамкнутые шлейфы и резонансные кольца. В [9] разработаны эффективные возбуждители первой и второй групп, имеющие значительные полосы рабочих частот (у отдельных видов от 30 до 50%) при коэффициенте стоячей волны по напряжению (КСВН) не более 1,2. Однако они сложны в изготовлении. К тому же для щелевой антенны, являющейся по сути неширокополосной, не требуется такой широкополосный возбуждатель.

В данной работе в качестве прототипа возбуждителя моды E_{01} в круглом волноводе был выбран щелевой возбуждитель А.Н. Кузьмина, разработанный им для 3-сантиметрового диапазона на центральной длине волны $\lambda_0 = 32$ мм [10]. Возбудитель относится ко второй группе, довольно широкополосен (20% при КСВН 1,2) и прост в изготовлении. Он представлен на рис. 1. Возбудитель запитывается стандартным прямоугольным волноводом сечением 23×10 мм² с основной рабочей модой H_{10} .

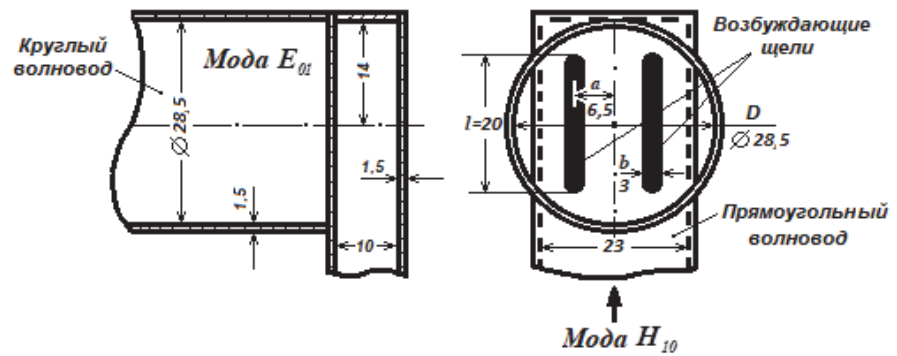


Рис. 1. Возбудитель моды E_{01} в круглом волноводе

Известна теория масштабного моделирования, являющаяся следствием линейности уравнений Максвелла [11]. Она широко применяется для измерения характеристик радиолокационных целей и при разработке различных сверхвысоких частотных (СВЧ) узлов. Согласно этой теории, результаты измерений, полученных для образца некоей электродинамической системы, будут точно совпадать с результатами измерений, полученных для подобной по масштабам модели этой системы, если имеем следующие условия:

$$\varepsilon \mu \left(\frac{l}{\lambda} \right)^2 = \varepsilon_m \mu_m \left(\frac{l_m}{\lambda_m} \right)^2, \quad (1)$$

$$\sigma \mu \lambda \left(\frac{l}{\lambda} \right)^2 = \sigma_m \mu_m \lambda_m \left(\frac{l_m}{\lambda_m} \right)^2, \quad (2)$$

$$\sigma \varepsilon \lambda \left(\frac{l}{\lambda} \right)^2 = \sigma_m \varepsilon_m \lambda_m \left(\frac{l_m}{\lambda_m} \right)^2. \quad (3)$$

В левой части этих выражений величины σ, ε, μ - соответственно проводимость, диэлектрическая и магнитная проницаемости среды, в которой выполняются измерения с образцом, работающим на длине волны λ , а l - некий размер образца. В правой части этих выражений $\sigma_m, \varepsilon_m, \mu_m$ - аналогичные параметры среды, в которой выполняются измерения с моделью, работающей на длине волны λ_m , а l_m - соответствующий размер модели. Если в обоих случаях измерения проводятся в воздушной среде с параметрами $\sigma = 0, \varepsilon_0, \mu_0$, то $\varepsilon = \varepsilon_m = \varepsilon_0, \mu = \mu_m = \mu_0$. Если образец и модель сделаны из высокопроводящих материалов (покрытия из Cu, Al, Ag, Au) с $\sigma^M \rightarrow \infty$, то электромагнитное поле не проникает внутрь их. Тогда из выражений (1) - (3) следует известное условие масштабного моделирования:

$$l = l_m \frac{\lambda}{\lambda_m}. \quad (4)$$

Исходя из аппаратных возможностей и свойств распространения радиоволн в атмосфере, для дальнейших исследований предложенной волноводной антенны был выбран частотный диапазон в интервале $f = 5 \dots 6$ ГГц, где имеется практическая независимость волны от воздействия гидрометеоров [12]. В качестве прямоугольного волновода модели возбудителя используется стандартный волновод этого диапазона сечением 40×20 мм² с толщиной стенок 1,5 мм. Как следует из размеров образца (выбранного возбудителя Кузьмина) и его модели, отношение k внутренних определяющих размеров широких стенок волноводов модели и образца составляет величину $k = 40/23 = 1,74$. Согласно (4), центральная длина волны модели и соответствующая центральная частота будут равны

$$\begin{cases} \lambda_{0m} = k\lambda_0 = 1,74 \times 32 \text{ мм} \approx 55,7 \text{ мм}, \\ f_{0m} = \frac{c}{\lambda_{0m}} \approx 5,386 \text{ ГГц}. \end{cases} \quad (5)$$

Пересчитанные размеры модели возбудителя, согласно размерам образца на рис. 1, равны

$$\begin{cases} a_m = ka = 1,74 \times 6,5 \text{ мм} \approx 11,3 \text{ мм}, \\ b_m = kb = 1,74 \times 3 \text{ мм} \approx 5,2 \text{ мм}, \\ l_m = kl = 1,74 \times 20 \text{ мм} \approx 34,8 \text{ мм}, \\ D_m = kD = 1,74 \times 28,5 \text{ мм} \approx 49,6 \text{ мм}, \end{cases} \quad (6)$$

где D_m - внутренний диаметр круглого волновода модели.

Конструкция модели возбуждателя. Исходя из технических возможностей и для удобства дальнейших исследований возбуждателя и антенны (наличие оконечных поглощающей нагрузки и короткозамыкателя круглого волновода), внутренний диаметр круглого волновода модели выбран равным $D_m = 55 \text{ мм}$. При этом, конечно, в модели изменится соотношение центральной длины волны к критической длине волны $\lambda_{кр}^{E_{11}^o} = 2,61D/2$ моды E_{01} и к критическим длинам волн $\lambda_{кр}^{H_{11}^o} = \frac{3,41D}{2}$, $\lambda_{кр}^{H_{21}^o} = 2,06D/2$ ([13]) паразитных волн (в данном случае) в круглом волноводе. В образце ($D = 28,5 \text{ мм}$) эти соотношения равны

$$\begin{cases} \lambda_{кр}^{E_{11}^o} / \lambda_0 = 2,61 \times 28,5/2 \times 32 \approx 1,162, \\ \lambda_{кр}^{H_{11}^o} / \lambda_0 = 3,41 \times 28,5/2 \times 32 \approx 1,518, \\ \lambda_{кр}^{H_{21}^o} / \lambda_0 = 2,06 \times 28,5/2 \times 32 \approx 0,917. \end{cases} \quad (7)$$

В модели ($D_m = 55 \text{ мм}$) эти же соотношения равны

$$\begin{cases} \lambda_{кр}^{E_{11}^o} / \lambda_{0m} = 2,61 \times 55/2 \times 55,7 \approx 1,288, \\ \lambda_{кр}^{H_{11}^o} / \lambda_{0m} = 3,41 \times 55/2 \times 55,7 \approx 1,684, \\ \lambda_{кр}^{H_{21}^o} / \lambda_{0m} = 2,06 \times 55/2 \times 55,7 \approx 1,017. \end{cases} \quad (8)$$

Как следует из сравнения (7) и (8), в модели соотношения изменяются почти на 11% из-за такого же процентного изменения внутреннего диаметра круглого волновода по отношению к рассчитанному. Однако условия распространения рабочей моды E_{01} улучшаются из-за снижения ее затухания. Известен общий критерий выбора рабочей частоты моды с точки зрения ее затухания [13]. Для данной моды этот критерий для модели запишется в виде $1,25 < f_{0m}/f_{кр}^{E_{11}^o} = \lambda_{кр}^{E_{11}^o} / \lambda_{0m} = 1,288 < f_{0m}/f_{кр}^{H_{21}^o} \approx 1,684$. С учетом сравнения верхних формул выражений (7) и (8) видим, что критерий для модели по своей левой части более благоприятен.

Аксонометрия общего вида спаянной конструкции модели возбуждателя и его габаритные размеры представлены на рис. 2. Аксонометрия прямоугольного волновода возбуждателя представлена на рис. 3а, а посадка круглого волновода на прямоугольный - на рис. 3б.

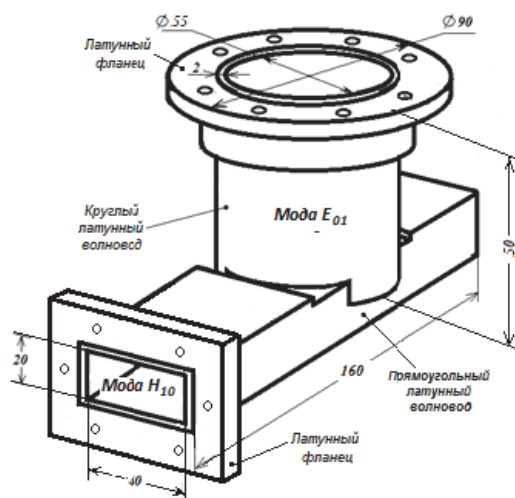


Рис. 2. Общий вид возбуждителя

Симметричная посадка круглого волновода относительно возбуждающих щелей важна для подавления моды H_{11} в нем. Поэтому верхняя широкая стенка прямоугольного волновода отфрезерована на глубину в 0,5 мм на отрезке в 59 мм (см. рис. 3а). Этот отрезок равен внешнему диаметру круглого волновода и служит для симметричной установки в продольном направлении круглого волновода относительно возбуждающих щелей прямоугольного волновода. Для симметрии же установки круглого волновода в поперечном направлении относительно возбуждающих щелей прямоугольного волновода служит паз круглого волновода. Ширина паза равна внешней ширине прямоугольного волновода по его широкой стенке (см. рис. 3б, 4а и 4в), и паз вытачивается симметрично относительно краев круглого волновода.

Отмеченные выше изменения в модели, вызванные разностью выбранного и расчетного значений внутреннего диаметра круглого волновода, могут привести к некоторым отличиям параметров модели от образца. Отличие также будет обусловлено и непропорциональностью изменения узкой стенки прямоугольного волновода модели по отношению к той же стенке образца ($20/10 = 2 \neq k = 1,74$). Поэтому в модели возбуждителя предусмотрена его дополнительная настройка, обусловленная наличием короткозамыкающего поршня в конце прямоугольного волновода и осуществляемая изменением положения поршня относительно круглого волновода (см. рис. 3б).

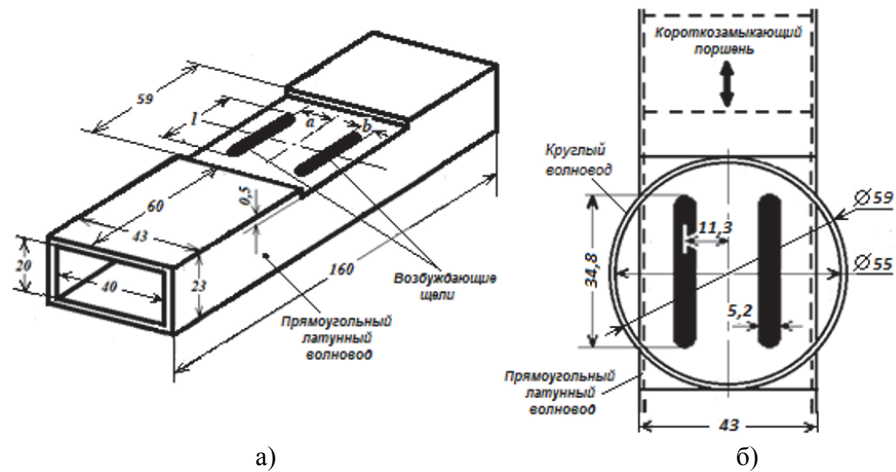


Рис. 3. Прямоугольный волновод модели возбуждителя (а); посадка круглого волновода на прямоугольный (б)

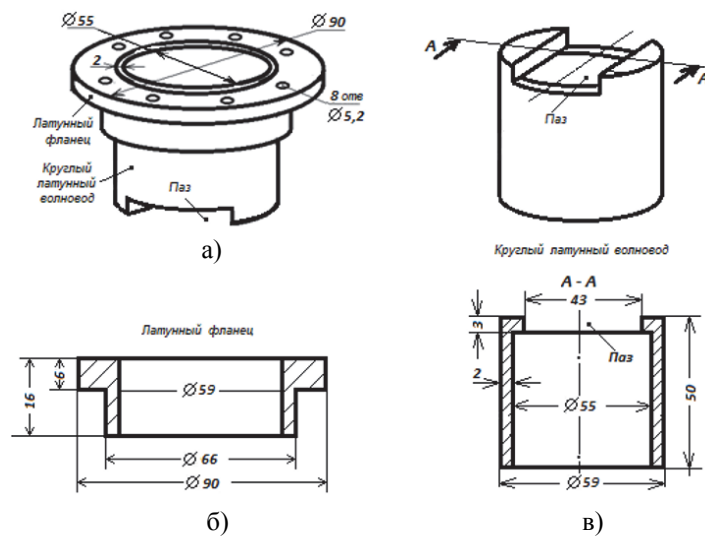


Рис. 4. Круглый волновод с фланцем: круглый волновод с фланцем в сборе (а), фланец (б), аксонометрия и разрез круглого волновода (в)

Компоновка и установка антенны. На рис. 5а изображен стыкуемый с возбуждителем антенны отрезок легкого и устойчивого к воздействиям атмосферы алюминиевого круглого волновода с рабочей модой E_{01} , имеющего поперечные щели на ярусах антенны. Щели, прерывая продольные токи проводимости моды E_{01} на внутренних стенках волновода, создают излучающие токи смещения на щелях.

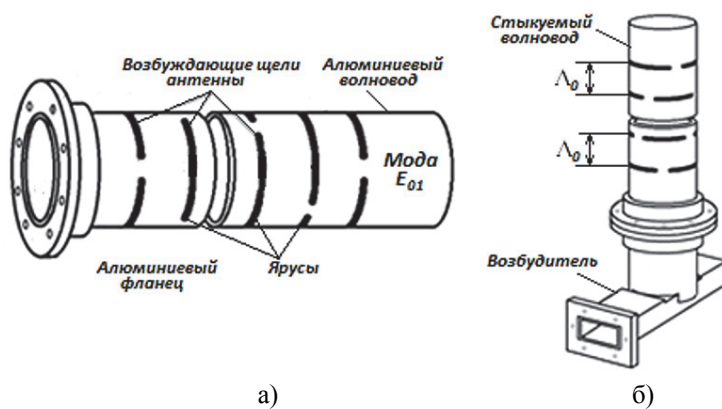


Рис. 5. Стыкуемый с возбуждителем отрезок алюминиевого круглого волновода (а); антенна (б)

Скомпонованная таким образом антенна, будучи установленной вертикально (см. рис. 5б), является источником вертикально поляризованной волны, излучаемой щелями на ярусах. Относительная конфигурация расположения щелей на ярусах определяет качество всенаправленного свойства такой антенны в плоскости, параллельной щелям (азимутальной плоскости). При этом для синфазности излучения щелей ярусы антенны должны отстоять друг от друга на расстоянии Λ_0 центральной длины волны в волноводе моды E_{01} . Она определяется следующим известным выражением и в данной конструкции равна

$$\Lambda_0 = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{0m}}{\lambda_{kp}} \right)^2}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{2\lambda_{0m}}{2,61D_m} \right)^2}} \approx 88,3 \text{ мм.} \quad (9)$$

Обычно для щелевых антенн подобного типа количество щелевых ярусов достигает 10...12, поскольку эффективность излучения от щели одного яруса к щели последующего яруса падает [2, 14]. Из-за этого коэффициент усиления такой антенны при избыточных ярусах практически не изменяется.

Заключение. В статье предлагается реализация возможности построения и исследования компактной и простой щелевой антенны нового типа на круглом волноводе. Она содержит надежный и недорогой возбуждатель аксиально симметричной рабочей моды E_{01} . Благодаря ее использованию, путем подбора относительной конфигурации расположения поперечных щелей на ярусах, можно построить всенаправленную в азимутальной плоскости антенну. Это полезное свойство создает возможность успешного применения такой

антенны в сравнительно маломощных базовых станциях сетей мобильной связи, служб обеспечения охраны и безопасности, скорой помощи, пожарной, такси и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент Российской Федерации №2071156, МПК H01Q 13/20.-1996.
2. **Kiang J.F.** Analysis of linear coaxial antennas // IEEE Transactions on Antennas and Propagation.- May 1998.- Vol. 46.-P. 636-642.
3. **Ավետիսյան Վ.Հ., Մարկոսյան Մ.Վ., Գաբրիելյան Ս.Ռ.** Համառանցք ճեղքային անտենա: Հայաստանի Հանրապետության արտոնագիր №2523A, ՄԱԴ H01Q 13/20. 2011թ:
4. **Մարկոսյան Մ.Վ., Մարտիրոսյան Ա.Ա., Ահարոնյան Ա.Կ., Ավետիսյան Վ.Հ.** Համուղղորդված ճեղքային անտենա: Հայաստանի Հանրապետության արտոնագիր, ՄԱԴ H01Q 13/20. 2018թ:
5. **Markosyan M.V., Martirosyan A.A., Aharonyan A.K., Avetisyan V.H.** Investigation of the circular waveguide radiating slotted structures using polarization degeneration of the main mode wave // Journal of Contemporary Physics. -2018.-V. 53, No. 3. - P. 104-201.
6. Multitier Omnidirectional Antenna on The Circular Waveguide with The Paired Slots on The Tiers/ **A.K. Aharonyan, V.H. Avetisyan, R.A. Davtyan, et al** // Imnter. Conf. on “Radiation and Scattering of Electromagnetic waves”, RSEMW-2019, June 24-28, Divnomorskoe, Russia, IEEE Xplore Digital Library. – 2019.- P. 156 - 159.
7. **Харвей А.Ф.** Техника сверхвысоких частот. Том 1. – М.: Сов. радио, 1965. -783 с.
8. **Сазонов Д.М.** Антенны и устройства СВЧ. - М.: Высшая школа, 1988. – 432 с.
9. **Калошин В.А., Фам Ван Чунг.** Возбудители скалярных мод круглого волновода // Радиотехника и электроника.- 2021.- №. 5. - С. 257-267.
10. Расчет и конструирование вращающихся сочленений / Под ред. Б.Я. Мякишева. - М.: Изд. МАИ, 1962. - 48 с.
11. **Майзельс Е.Н., Торгованов В.А.** Измерение характеристик рассеяния радиолокационных целей. - М.: Сов. радио, 1972. – 232 с.
12. **Аветисян В.Г., Никогосян Е.Г.** Распространение радиоволн. – М.: Инфра-Инженерия, 2023. - 206 с.
13. **Семенов Н.А.** Техническая электродинамика. - М.: Связь, 1973. - 480 с.
14. **Драбкин А.Л., Зузенко В.Л., Кислов А.Г.** Антенно-фидерные устройства. – М.: Сов.радио, 1974. – 536 с.

Ереванский НИИ средств связи, Российско–Армянский университет. Материал поступил в редакцию 24.03.2023.

Ա.Ս. ՆԵՐՏԻՍՅԱՆ, Ռ.Ա. ԴԱՎԹՅԱՆ, Ա.Կ. ԱՀԱՐՈՆՅԱՆ, Վ.Հ. ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ

ԿԼՈՐ ԱԼԻՔՍԱՐՈՎ ՀԱՄՈՒՂՈՐԴՎԱԾ ԱՆՏԵՆԱՅԻ ԿԱՌՈՒՑՈՒՄԸ

ԱՇԽԱՏԱՆՔԱՅԻՆ E_{01} ՄՈՂԻ ՊԱՐԶ ԳՐԳՈՒԶՈՎ

Առաջարկվում է առանցքային համաչափ E_{01} մոդով կլոր ալիքատարի օգտագործումը: Ուղղաձիգ տեղակայված նման ալիքատարը պարունակում է ճառագայթող լայնական ճեղքեր տարբեր բարձրություններով հարկերի վրա: Այդպիսի անտենային անհրաժեշտ է հաղորդել համադրողվածության հատկություն ազիմուտային հարթության մեջ, ինչը կարևոր է շարժական կապի համակարգերի դեպքում: Մասշտաբային մոդելավորման հիման վրա ներկայացված են էժան պատրաստվող և հուսալի աշխատանքում E_{01} մոդի գրգռչի հաշվարկը և նախագծումը:

Առանցքային բառեր. ուղղանկյուն և կլոր ալիքատարներ, մասշտաբային մոդելավորում, E_{01} մոդի գրգռիչ:

A.S. NERSISYAN, R.A. DAVTYAN, A.K. AHARONYAN, V.H. AVETISYAN

DESIGNING AN OMNIDIRECTIONAL ANTENNA ON A CIRCULAR

WAVEGUIDE WITH A SIMPLE EXCITER OF THE E_{01} WORKING MODE

The use of a circular waveguide with an axially symmetric E_{01} mode is proposed. Such a vertically installed waveguide contains transverse radiating slots on different height tiers. The antenna created in this way may be given the property of omnidirectionality in the azimuth plane, which is important for the mobile communication systems. On the basis of the scale modeling, the calculation and design of a cheap-to-manufacture and reliable in the work E_{01} mode exciter are given.

Keywords: rectangular and circular waveguides, scale modeling, E_{01} mode exciter.