

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОБЛУЧАТЕЛЯ В Ka/Q -ДИАПАЗОНЕ
НА ОСНОВЕ «ВОССТАНАВЛИВАЮЩЕЙ» СХЕМЫ**

Ю. В. Крылов*, В. Б. Тайгин

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»
Российская Федерация, 662972, г. Железнодорожск Красноярского края, ул. Ленина, 52

*E-mail: krylov_yuriy@inbox.ru

Представлен принцип работы частотно-поляризационного селектора, основанный на использовании «восстанавливающей» схемы в виде двух ортомодовых селекторов, объединенных между собой для разделения частотных диапазонов приема и передачи. Поляризационное частотно-селективное устройство, разработанное по такой схеме, было реализовано в облучателе, который обеспечивает прием и передачу сигналов с круговой поляризацией в Ka - и Q -диапазонах. Роль частотно-селективного устройства в облучателе выполняет ортомодовый селектор, который предназначен для селекции приемо-передающих сигналов и их поляризационных составляющих. Одной из наиболее распространенных структур широкополосного ортомодового селектора является преобразователь в виде крестового разветвления. Данный крестовой разветвитель представляет собой волновод круглого сечения, к которому перпендикулярно его оси подключаются четыре взаимно перпендикулярных волновода прямоугольного сечения. Подключение данных волноводов происходит с помощью трансформаторов сложной формы для обеспечения лучшего согласования с волноводом круглого сечения. Такой тип селектора имеет структуру, обладающую некоторыми свойствами симметрии, которые делают систему широкополосной. Применение крестового разветвителя в качестве ортомодового селектора позволило расширить рабочую полосу частот. За счет введения различных неоднородностей в конструкцию данного селектора удалось разделить низкочастотные и высокочастотные составляющие спектра частот и добиться подавления паразитных составляющих высших мод. Восстановление сигнала обеспечивается вторым ортомодовым селектором, объединенным с первым с помощью четырех n -образных волноводных секций. Введение в конструкцию частотного селектора на высокочастотном выходе поляризатора, реализованного на круглом волноводе с пазом, и на низкочастотном выходе септум-поляризатора позволило на выходах данных поляризаторов принимать/передавать сигналы с круговой поляризацией. Использование такого принципа построения частотного селектора позволило разделить частоты приема и передачи без необходимости использования дополнительного отдельного облучателя под конкретный диапазон частот. Измеренные радиотехнические характеристики разработанного облучателя соответствуют современным требованиям, предъявляемым к облучающим системам, которые применяются в антенной технике спутниковой связи.

Ключевые слова: восстанавливающая схема, частотно-поляризационный селектор, облучатель, ортомодовый селектор, частотные диапазоны Ka , Q .

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 2, P. 417–422**DESIGN FEED ANTENNA Ka/Q -BAND BASED ON “REPAIRABLE” SCHEME**

Y. V. Krylov*, V. B. Taygin

JSC “Information satellite systems” named after academician M. F. Reshetnev”
52, Lenin Str., Jejeznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

*E-mail: krylov_yuriy@inbox.ru

In the article an operation principal of polarization frequency-selective device is presented which is based on “repairable scheme” composed of two joined orthomode selectors for dividing transmit-recvie frequencies. The polarization frequency-selective device, being engineered according to this scheme was implemented in the feed antenna allows to ensure the transmitting and receiving signals with circular polarization over the Ka/Q -bands. The role of frequency-selective device in feed horn performs an orthomode selector for selecting which of transceiver signals and polarization components. One of the most common structures orthomode broadband selector is a cross-converter branching. This cross-splitter is a waveguide of circular cross section, which is perpendicular to the axis connecting the four mutually perpendicular rectangular waveguide. Connections of this waveguides occurs through transformers complex shape to provide better conformance with the waveguide of circular cross section. This type of selector has the structure pos-

esses some symmetry properties, which make system of broadband. Using of cross-splitter as orthomode selector allowed to expand the operating bandwidth. Through the introduction of various irregularities in the construction of this selector able to separate low and high frequency components of the frequency spectrum and to achieve suppression of spurious higher modes. Recovering the second signal is provided with a combined orthomode first selector by four U-shaped waveguide sections. Introduction to the design of high-frequency selector on the output polarizer, implemented on a circular waveguide with a groove, and the low-frequency output of the septum polarizer, allowed for the release of data polarizers transmit / receive signals with circular polarization. Using this principle of construction of frequency selector allows to divide transmit-receive frequencies to save from necessary using if extra separate feed antenna. Measured electrical characteristics developed feed antenna according to the contemporary requirements which are demanded for feed antenna of satellite communication systems.

Keywords: repairable scheme, polarization frequency-selective device, feed antenna, orthomode selector, frequency bands Ka, Q.

Введение. Увеличение требования по частотному ресурсу современных спутников связи определяет необходимость в создании облучающих систем зеркальных антенн и глобальных рупорных антенн, работающих в более высоких и широких полосах частот как на прием, так и на передачу. Для увеличения пропускной способности каналов связи на современных спутниках также предъявляется требование по использованию сигналов с ортогональной поляризацией как на прием, так и на передачу. Помимо того, что современные облучающие системы должны работать в широкой полосе частот с сигналами различной поляризации, необходимо также, чтобы облучатель имел малые массогабаритные показатели.

Ортомодовый селектор – устройство, обеспечивающее частотную селекцию сигналов в облучателе [1]. В современных облучающих системах ортомодовый селектор выполняет не только функцию частотной селекции сигналов приема и передачи, но и функцию разделения их поляризационных составляющих. Ортомодовый селектор представляет собой пассивный волноводный разветвитель [2; 3], функцией которого является выделение двух ортогональных сигналов, полученных антенной. В зависимости от используемой конструкции селектора и применения в нем поляризационных устройств можно удвоить пропускную способность системы за счет использования двух разных сигналов с различной поляризацией, имеющих один и тот же спектр частот. Для того чтобы разрабатываемый селектор работал в широкой полосе частот, он должен иметь структуру, обладающую некоторыми свойствами симметрии. Самой распространенной такой структурой является ортомодовый селектор в виде крестового разветвителя [4; 5]. Наиболее сложными задачами при разработке селектора в виде крестового узла является проектирование конструкции его внутренних неоднородностей и диафрагм для разделения частот приема и передачи [6].

В рамках создания перспективных телекоммуникационных спутников АО «ИСС» было разработано поляризационное частотно-селективное устройство для облучателя зеркальной антенны для приема/передачи сигналов с круговой поляризацией в Q/Ka-диапазоне. В настоящей работе для решения задачи разделения сигналов с круговой правой/левой поляризацией для частот приема и передачи, разнесенных на октаву, предлагается применение конструкции на основе разработанной «восстанавливаю-

щей» схемы в виде двойного использования крестовых разветвителей.

Конструкция разработанного облучателя. Для того чтобы поляризационное частотно-селективное устройство разрабатываемого облучателя было широкополосно, было принято нестандартное конструкторское решение для разделения частот приема и передачи, а именно, использование «восстанавливающей» схемы, показанной на рис. 1. Для выполнения требований к облучателю по значениям коэффициента усиления, формы диаграммы направленности, коэффициента эллиптичности (КЭ) для заданной рабочей полосы частот, был использован гофрированный рупор 1. Ортомодовый селектор 2, расположенный сразу после рупора, представляет собой крестовой разветвитель в виде волновода круглого сечения, к которому перпендикулярно его оси подключены четыре взаимно перпендикулярных прямоугольных волновода. С прямого выхода 5 данного селектора осуществляется выделение высокочастотного сигнала приемного частотного диапазона. Введение в разрабатываемое частотно-селективное устройство дополнительного идентичного ортомодового селектора 4 позволяет восстановить на его выходе 6 низкочастотный сигнал передающего частотного диапазона за счет объединения между собой селекторов с помощью четырех волноводов 3 прямоугольного сечения, которые подключаются к крестовому разветвлению данных селекторов.

За счет использования четырех взаимно перпендикулярных п-образных волноводов равной длины и второго симметричного ортомодового селектора, выполняющего функцию восстановления сигнала, выполняется условие синфазности и ортогональности двух мод, распространяемых в круглом сечении волновода. Для дальнейшей возможности передачи сигнала с круговой поляризацией ко второму селектору необходимо подключить поляризующее устройство [7–11].

На рис. 2 показана электродинамическая модель разработанного поляризационного частотно-селективного устройства. Ортомодовый селектор 1 представляет собой крестовой разветвитель, в плечах которого установлены фильтры нижних частот 2 для подавления частотных составляющих сигнала приема. Диаметр волновода круглого сечения был рассчитан исходя из расчета распространения основной волны H_{11} в диапазоне частот передачи. В ортогональных плечах

волновода прямоугольного сечения должна распространяться волна H_{10} . Выход селектора представляет собой переход на сечение меньшего диаметра для распространения волны H_{11} в диапазоне частот приема и множественные изменения сечения круглого волновода для подавления паразитных составляющих высших мод, возникающих в круглом сечении волновода большего диаметра. К выходу переменного сечения первого селектора подключается поляризатор 4, реализованный на круглом волноводе с развернутым на 45° пазом, и преобразователь с двумя ортогональными выходами. Оптимизируя геометрические размеры паза, можно добиться ортогональности мод с равной амплитудой и со сдвигом фаз 90° . Таким образом, с помощью данного поляризатора обеспечивается разделение ортогональных компонент сигнала с круговой поляризацией. Для удобства настройки поляризатора конструктивно закладывается возможность изменения глубины паза за счет установленного в паз регулируемого по высоте поршня. На выходах 5 поляризатора принимаются сигналы с круговой правой и левой поляризациями.

Для восстановления сигнала в частотном диапазоне передачи фильтры 2 соединяются со вторым орто-

модовым селектором 6 посредством четырех п-образных волноводных секций 3 равной длины. Для лучшего согласования данных волноводов с волноводом круглого сечения применялись переходы различного сечения в месте их сочленения с волноводом круглого сечения. Один выход селектора короткозамкнут, ко второму выходу через трансформатор с круглого на квадратное сечение присоединен септум-поляризатор 7. Для получения разности фаз 90° между ортогональными компонентами электромагнитной волны у такого поляризатора используется ступенчатая металлическая перегородка [12–14]. Преимущество данного поляризатора в том, что правая и левая круговая поляризации возбуждаются двумя входными каналами в виде прямоугольного волновода без необходимости создания дополнительных селективных устройств, как, например, в поляризаторе, который используется в высокочастотном диапазоне приема [15]. Выбор такого поляризатора в частотном диапазоне приема обусловлен сложностью изготовления септум-поляризатора в Q -диапазоне. С выходов 8 передаются сигналы с круговой правой и левой поляризациями.

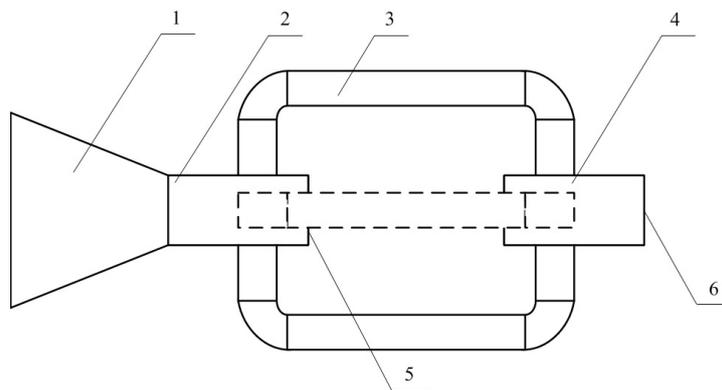


Рис. 1. Схема разработанного облучателя: 1 – рупор; 2, 4 – крестовой селектор; 3 – волноводы; 5 – выход приемного сигнала; 6 – выход передающего сигнала

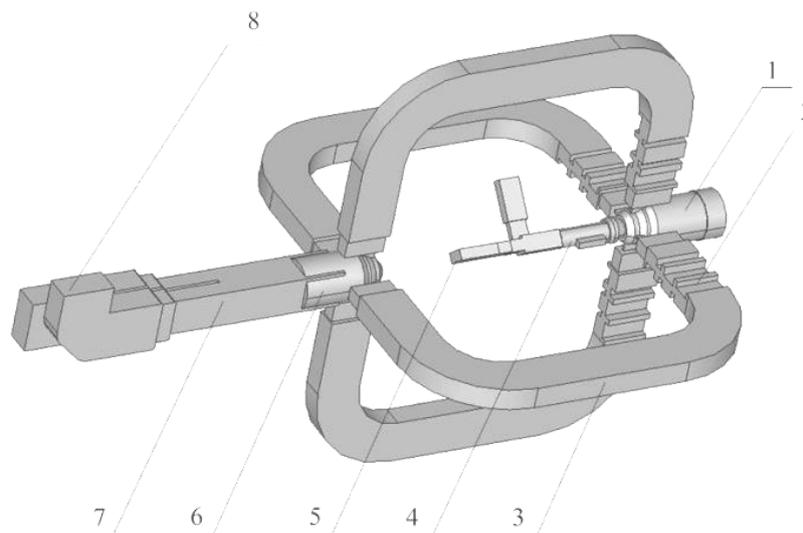


Рис. 2. Электродинамическая модель разработанного частотно-селективного устройства: 1, 6 – крестовой селектор; 2 – фильтр нижних частот; 3 – волновод; 4 – поляризатор; 5 – выход приемного сигнала; 7 – септум-поляризатор; 8 – выход передающего сигнала

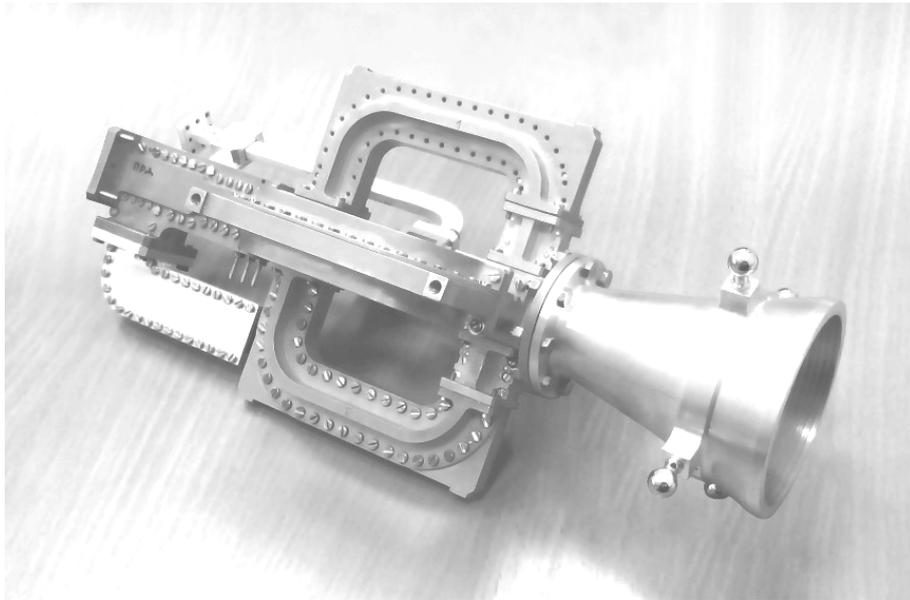


Рис. 3. Фотография изготовленного облучателя

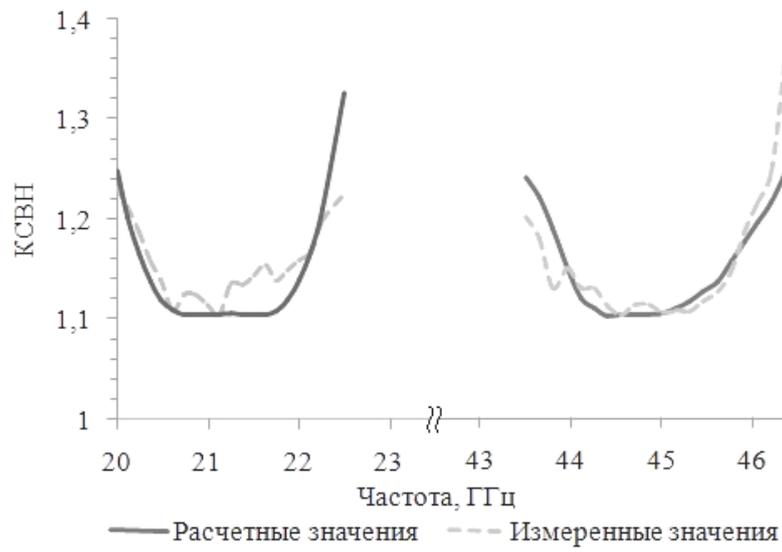


Рис. 4. КСВН селективного устройства в рабочих диапазонах частот

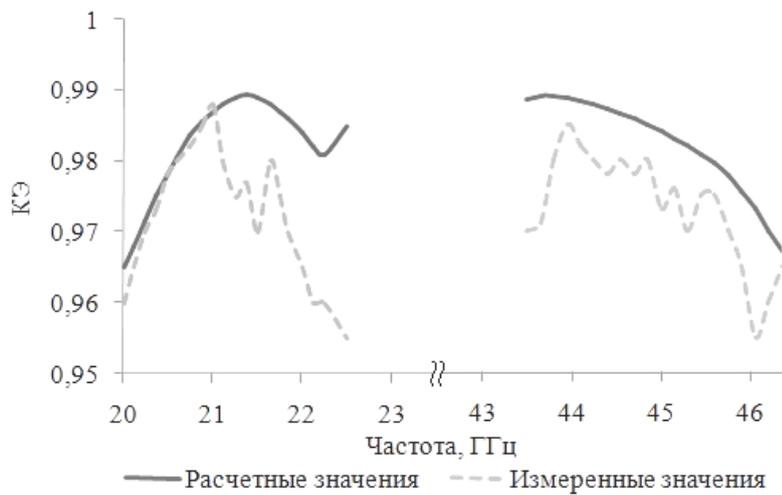


Рис. 5. График частотной зависимости КЭ селективного устройства в рабочих диапазонах частот

Результаты. По результатам оптимизации электродинамической модели разработанного поляризационного частотно-селективного устройства, изображенного на рис. 2, был изготовлен облучатель, фотография которого представлена на рис. 3.

Расчетные и измеренные радиотехнические характеристики облучателя приведены на рис. 4–5.

Из рис. 4 видно, что расчетные и измеренные значения КСВН частотно-селективного устройства достаточно хорошо совпадают как по значению, так и по характеру частотной зависимости. Таким образом, расчетные и измеренные значения КСВН в диапазонах частот 20–22,25 ГГц и 43,5–46 ГГц составили не более 1,25.

Из рис. 5 видно, что расчетные и измеренные значения КЭ частотно-селективного устройства в диапазоне рабочих частот передачи 20–22,25 ГГц и приема 43,5–46 ГГц составили не менее 0,96, что обеспечивает значение кроссполяризационной развязки не менее 33,8 дБ.

Заключение. Разработанный облучатель позволяет обеспечивать прием и передачу сигналов с круговой поляризацией в Ka - и Q -диапазонах в соответствии с современными требованиями, предъявляемыми к облучающим системам спутниковой связи по значениям КЭ и КСВН. По результатам исследования спроектированного частотно-поляризационного селектора показана состоятельность применения разработанной «восстанавливающей» схемы в виде двойного использования крестовых ортомодовых селекторов в качестве частотно-селективного устройства. Реализация облучателя по данной схеме позволяет передавать/принимать сигналы с круговой поляризацией с помощью четырех p -образных волноводных секций и дополнительного ортомодового селектора, выполняющего функцию восстановления сигнала, обеспечивая условие синфазности и ортогональности двух мод, распространяемых в селекторе. Для дальнейшей возможности обеспечения сдвига фаз между ортогональными модами на 90° используется септум-поляризатор.

Также за счет применения «восстанавливающей» схемы при оптимальных значениях электрических характеристик в рабочих диапазонах частот решается задача уменьшения массогабаритных показателей облучающей системы, так как отсутствует необходимость использования дополнительного облучателя для разделения частот приема и передачи.

Библиографические ссылки

1. Gopal Narayanan, Neal R. Erickson. A Novel Full Waveguide Band Orthomode Transducer // Thirteenth International Symposium on Space Terahertz Technology. Harvard University, 2002. P. 505–514.
2. CAD and Optimization of Compact Ortho-Mode Transducers / Ludovico [et al.] // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1999. Vol. 47, No. 12. P. 2479–2486.
3. Ignacio Izquierdo Martinez, Jorge A. Ruiz Cruz. Design of wideband orthomode transducers based on the turnstile junction for satellite communications. Universidad Autnoma de Madrid, 2008. P. 33–36.

4. Pozar D. M. Power Dividers and Directional Couplers // Microwave Engineering. Chap. 7. New York : John Wiley & Sons. Inc, 1998. P. 6-4.1–6-4.5.

5. Дёмин Д. А., Чубинский Н. П. Облучатель с двумя ортогональными круговыми поляризациями // Журнал радиоэлектроники. 2014. № 6. С. 11–23.

6. Тузбеков А. Р., Гольберг Б. Х. Широкополосный волноводный поляризационный селектор для диапазона S с малым поперечным размером // Радиолокация и радиосвязь : материалы IV Всерос. конф. / ИРЭ РАН. М., 2010. С. 76–82.

7. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ. М. : Высш. шк., 1988. С. 434–435.

8. Milligan T. A. Modern Antenna Design. New Jersey : John Wiley & Sons, 2005. P. 343–345.

9. Антенны эллиптической поляризации. Теория и практика : сб. ст. / пер. с англ. под ред. А. И. Шпунтова. М. : Иностранная литература, 1961. С. 367–370.

10. Спутниковая связь и вещание : справочник / под ред. Л. Я. Кантора. М. : Радио и связь, 1997. С. 528–531.

11. Фельдштейн А. Л., Явич Л. Р., Смирнов В. П. Справочник по элементам волноводной техники. М. : Связь, 1967. С. 652–655.

12. Pelosi G., Nesti R., Gentili G. G. Orthomode transducers. New York : Encyclopedia of RF and microwave engineering, 2005. P. 103–107.

13. Davis D., Digiondomenico O., Kempic J. A new type of circularly polarized antenna element // Antennas and Propagation Society International Symposium. 1967. Vol. 5. Pp. 26–33.

14. Полупанов В. Н., Яновский М. С., Князьков Б. Н. О физических принципах работы поляризационного фазовращателя // Радиотехника. 1979. № 1. С. 112–115.

15. Надель Ж. М. Волноводные линии связи. М. : Радио и связь, 1975. С. 234–236.

References

1. Gopal Narayanan, Neal R. Erickson. A Novel Full Waveguide Band Orthomode Transducer. Thirteenth International Symposium on Space Terahertz Technology, Harvard University, March 2002, P. 505–514.
2. Ludovico, et al. CAD and Optimization of Compact Ortho-Mode Transducers. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Dec. 1999, Vol. 47, No. 12, P. 2479–2486.
3. Ignacio Izquierdo Martinez, Jorge A. Ruiz Cruz. Design of wideband orthomode transducers based on the turnstile junction for satellite communications. Universidad Autnoma de Madrid, Noviembre de 2008, P. 33–36.
4. Pozar D. M. Power Dividers and Directional Couplers. New York: Microwave Engineering - Chap. 7. John Wiley & Sons. Inc, 1998, P. 6-4.1–6-4.5.
5. Demin D. A., Chubinskii N. P. [Irradiator with two orthogonal circular polarizations]. *Zhurnal radioelektroniki*. 2014, No. 6, P. 11–23 (In Russ.).
6. Tuzbekov A. R., Golberg B. H. [Broadband waveguide polarization selector for a range of «S» with a small transverse dimension]. *Radiolokatsiya i radiosvyaz': materialy IV Vserossiyskoy konferentsii, IRE RAN* [Radar

and radio: Materials IV National Conference, IRE RAN]. Moscow, 2010, P. 76–82 (In Russ.).

7. Sazonov D. M. *Antenny i ustroystva SVCh* [Antennas and microwave devices]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988, P. 434–435.

8. Milligan T. A. *Modern Antenna Design*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005, P. 343–345.

9. Shpuntov A. I. *Antenny ellipticheskoy polarizatsii. Teoriya i praktika. Sb. Statey* [Antenna elliptical polarization. Theory and practice. Proc.]. Moscow, Inostrannaya literatura Publ., 1961, P. 367–370.

10. Cantor L. Y. *Sputnikovaya svyaz' i veshchanie. Spravochnik. Pod red. L. Ya. Kantora* [Satellite communications and broadcasting. Directory. Ed. Cantor L.Y.]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1997, P. 528–531.

11. Feldstein A. L., Yavich L. R., Smirnov V. P. *Spravochnik po elementam volnovodnoy tekhniki* [Handbook of elements waveguide technology]. Moscow, Svyaz' Publ., 1967, P. 652–655.

12. Pelosi G., Nesti R., Gentili G. G. *Orthomode transducers*. Wiley, New York: Encyclopedia of RF and microwave engineering, 2005, P. 103–107.

13. Davis D., Digiondomenico O., Kempic J. A new type of circularly polarized antenna element. *Antennas and Propagation Society International Symposium*, 1967, Vol. 5, P. 26–33.

14. Polupanov V. N., Yanovsky M. S., Knyazkov B. N. [On the physical principles of operation of the polarization phase shifter]. *Radiotekhnika*. 1979, No. 1, P. 112–115 (In Russ.).

15. Nadel J. M. *Volnovodnye linii svyazi* [Waveguide link]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1975, P. 234–236 (In Russ.).