

Облучатель с ближнепольным контррефлектором для приемо-передающей зеркальной антенны Ку-диапазона

Н.О. Сивов, К.В. Лемберг

Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН

Аннотация: в работе представлены результаты разработки облучателя с ближнепольным контррефлектором для приемо-передающей зеркальной антенны Ку-диапазона. Описан принцип работы данного вида облучателей. Приведено сравнение характеристик численной электродинамической модели облучателя и измеренных характеристик изготовленного макета. Также приведены измеренные характеристики зеркальной антенны, в которой применен разработанный облучатель.

Ключевые слова: облучатель, зеркальная антенна, спутниковая связь, Ку-диапазон

1. Введение

В зеркальных антеннах спутниковой связи широкое применение нашли схемы Кассегрена и Грегори, которые начали использоваться для оптических телескопов ещё в XVII веке. Принцип их работы заключается в направлении электромагнитной волны со сферическим фазовым фронтом из облучателя на контррефлектор (КР), выполненный в виде гиперboloида или эллипсоида. Отражаясь от контррефлектора, волна перенаправляется на основной рефлектор, выполненный в виде параболоида, после отражения от которого ее фазовый фронт преобразуется в плоский. Такие схемы позволяют отказаться от выноса приемо-передающего оборудования в область перед рефлектором, что существенно упрощает схемы питания.

Однако у таких схем имеется ряд недостатков. Для того, чтобы эффективно перенаправлять энергию от облучателя на основной рефлектор, КР должен обладать размерами от $\sim 7\lambda$ (обычно более 10λ). Следствием таких размеров контррефлектора является затенение им апертуры антенны, что особенно критично для электрически небольших рефлекторов ($<30-40\lambda$). В результате, наблюдается снижение коэффициента направленного действия (КНД) и повышение уровня боковых лепестков (УБЛ) антенны. Кроме того, дополнительное затенение возникает из-за крепежных конструкций КР.

Описанные проблемы могут быть решены с использованием облучателей с ближнепольным контррефлектором. Одна из первых работ, описывающих подобный облучатель, была опубликована в 1947 году [1]. Облучатель состоял из волновода круглого сечения и контррефлектора, который удерживался на волноводе с помощью специального крепления. Излучение происходило из двух противоположных вырезов. Такая конструкция облучателя позволила закрепить его на рефлекторе без использования специальных креплений, а также обеспечила упрощенную схему питания. Также в работе описывается понятие кольцевого фокуса, которым обладают все облучатели с ближнепольным КР.

Более близкая к современным конструкция была представлена в 1987 году [2]. Контррефлектор предложенного облучателя закреплялся на открытом конце волновода при помощи диэлектрического цилиндра. Облучатель имел приемлемый коэффициент отражений (КО) и уровень кросс-поляризационной развязки (КПР) в весьма узком диапазоне частот 11,9–12 ГГц. В этой работе тип облучателей, контррефлектор которых имеет электрические размеры в несколько длин волн, удерживается на волноводе диэлектрическим держателем и располагается очень

близко к волноводу, был назван «hat feed». На русском языке наиболее корректным названием, на взгляд авторов, является «облучатель с ближнеполюсным контррефлектором» (ОБК).

Для упрощения сборки ОБК в [3] была предложена конструкция без использования диэлектрика. Это позволяет исключить из процесса сборки склеивание деталей, что обычно может вызвать проблемы с соблюдением допусков и отклонений, однако такая конструкция лишает облучатель герметичности. Облучатель, описанный в данной работе, обладает КО не хуже -15 дБ в диапазоне 10–13 ГГц.

Со времени появления первых конструкций получили развитие методики расчета ОБК, в частности методика расчета положения и диаметра фазового кольца ОБК [4], знание параметров которого необходимо при проектировании зеркальной антенны. На сегодняшний момент конструкции ОБК продолжают совершенствоваться [5-9]. Разрабатываются различные способы креплений, формы диэлектрика, улучшаются характеристики по КО и КПП.

В настоящей работе представлена конструкция облучателя с ближнеполюсным контррефлектором для использования его в зеркальной антенне Ку-диапазона. В качестве основы для данного облучателя применена конструкция, предложенная в патенте [10].

2. Конструкция и принцип работы облучателя

Основными частями облучателя являются излучатель 2, отражатель 1 и соединительный узел (рис. 1). Соединительный узел состоит из нескольких деталей: вставки 3 и диэлектрических элементов 4 и 5. Все диэлектрические части изготовлены из материала Rexolite 1422. Роль основного держателя контррефлектора выполняет диэлектрическая проставка 5. Она жестко удерживает отражатель на излучателе за счет клеевого соединения. В совокупности с резьбовым соединением внутренних частей и упором 6 для диэлектрического элемента 4, такая конструкция обеспечивает надежное крепление, а также герметизацию.

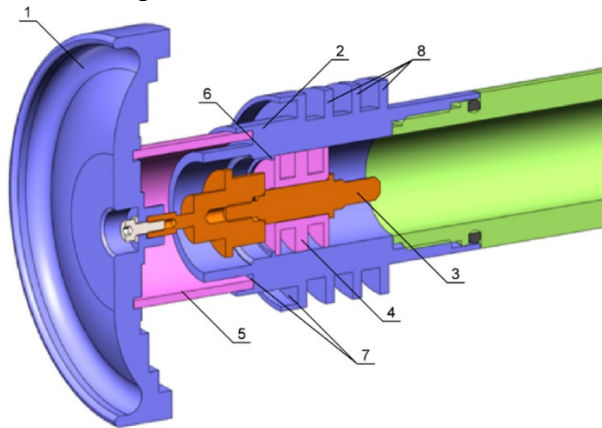


Рисунок 1. Конструкция облучателя

Поясним принцип работы облучателя на примере линейной поляризации. В круглом волноводe распространяется основная волна TE_{11} . При выходе этой волны из волновода она отражается от контррефлектора и начинает распространяться радиально во все стороны, поэтому в E и H плоскостях получаются существенно разные типы волн: ТМ-волна, вектор поляризации которой параллелен направлению распространения и ТЕ-волна, вектор поляризации которой перпендикулярен направлению распространения. Эти составляющие видны, если рассмотреть картину распределения электрического поля облучателя в E- (рис. 2а) и H-плоскостях (рис. 2б). Внешняя поверхность волновода и контррефлектора для ТМ-волн представляют собой

волноведущую поверхность. Из-за наличия такой поверхности, ТМ-волны, выходя из волновода, начинают распространяться не только в открытом пространстве, но и по внешним поверхностям волновода и контррефлектора, т.е. возбуждаются поверхностные волны. При этом ТЕ волны в другой плоскости не преобразуются в поверхностные. В результате этого, диаграммы направленности (ДН) облучателя в плоскостях Е и Н могут существенно отличаться. При этом невозможно достигнуть высоких значений коэффициента использования поверхности (КИП) зеркальной антенны.

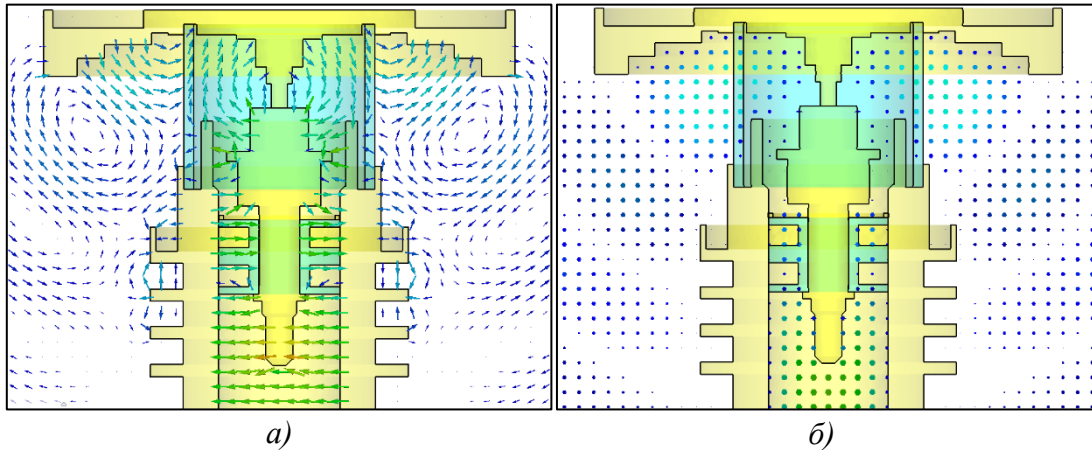


Рисунок 2. Мгновенные значения электрического поля в Е (а) и Н (б) плоскостях

Конструкция облучателя разрабатывалась таким образом, чтобы минимизировать распространение поверхностных волн, при этом достигнув хорошего согласования и симметричности ДН в двух плоскостях. Для минимизации поверхностных волн на внешней поверхности излучателя были предусмотрены гофрированные структуры 7 и 8 (см. рис. 1), создающие для поверхностных ТМ волн эквивалентную поверхность, подавляющую их распространение. Диаметр фокусного кольца облучателя составил 50 мм.

3. Характеристики облучателя и антенной системы на его основе

При проектировании облучателя использовались численные электродинамические расчеты (метод конечных разностей во временной области). Для достижения необходимых характеристик были использованы методы оптимизации. Основными критериями при оптимизации были коэффициент отражения S_{11} не хуже -20 дБ и осесимметричная форма ДН. Все существенные для характеристик геометрические размеры облучателя были параметризованы, всего геометрия описывалась 20-ю параметрами.

В результате оптимизации была получена конструкция облучателя с необходимыми характеристиками. Так как облучатель должен работать с круговыми поляризациями, к его модели был добавлен септум-поляризатор [11], имеющий на выходах стандартные фланцы WR-75 для подключения к нему приемо-передающего оборудования. Все представленные далее характеристики рассчитывались и измерялись по этим выходам, для облучающей системы, состоящей из ОБК и септум-поляризатора.

S-параметры облучающей системы, измеренные с помощью векторного анализатора цепей (ВАЦ), представлены на рисунках 3а и 3б. На рисунках также приведены S-параметры, полученные путем численного моделирования. Серым цветом выделены полосы приема и передачи Ку диапазона (10.7-12.75 ГГц и 13.75-14.5 ГГц, соответственно). Как видно из рисунков, общий коэффициент отражения

(рис. 3а) облучающей системы в Ку-диапазоне не превышает минус 19 дБ, а развязка между входными портами септум поляризатора (рис. 3б) при этом не превышает минус 18 дБ. Видно также хорошее совпадение экспериментальных и расчетных данных.

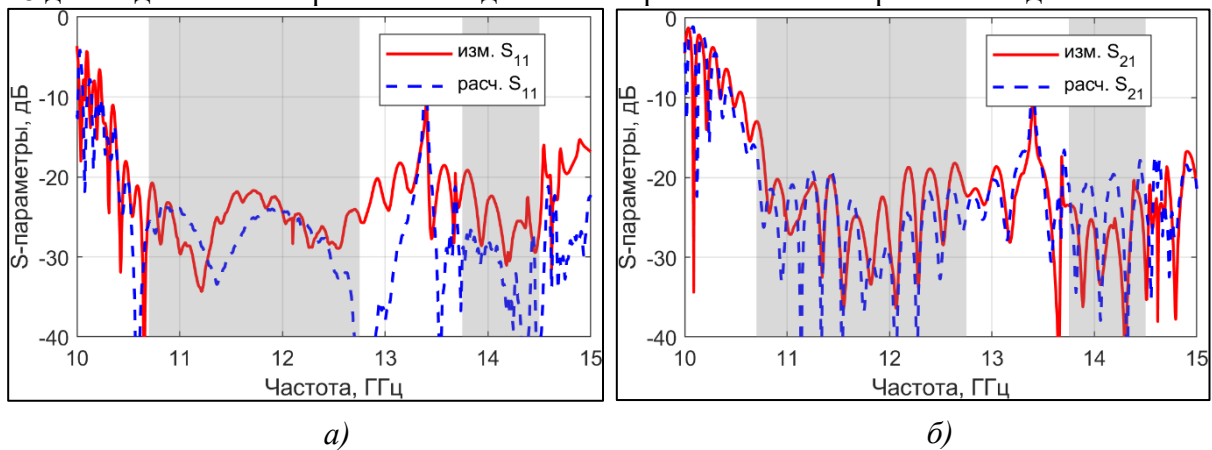


Рисунок 3. S-параметры облучающей системы

Для оценки эффективности использования облучателя с ближнепольным контррефлектором в антенной системе, он был установлен на зеркальную антенну диаметром 1.2 метра с кольцевым фокусом диаметром 50 мм и отношением $F/D=0.25$ (рис. 4). Характеристики антенной системы также были получены численным моделированием и сравнивались с результатами измерений. Рассчитанный коэффициент использования поверхности (КИП) для численной модели антенной системы составил более 0.7.



Рисунок 4. Макет антенной системы на измерительном стенде

Измерения антенной системы проводились с использованием плоского сканера ближнего поля. Были измерены ДН, а также КУ (рис. 5а) и КИП (рис. 5б) антенной системы по её оси. КУ измерялся методом сравнения с эталоном. На рисунке 5а для сравнения представлены также расчетный и измеренный КИП. Из рисунков видно, что КИП в Ку-диапазоне имеет значение более 18 дБ. КУ в диапазоне приема (10.7-12.75 ГГц) имеет значение более 41 дБи, в диапазонное передачи (13.75-14.5 ГГц) – более 42 дБи.

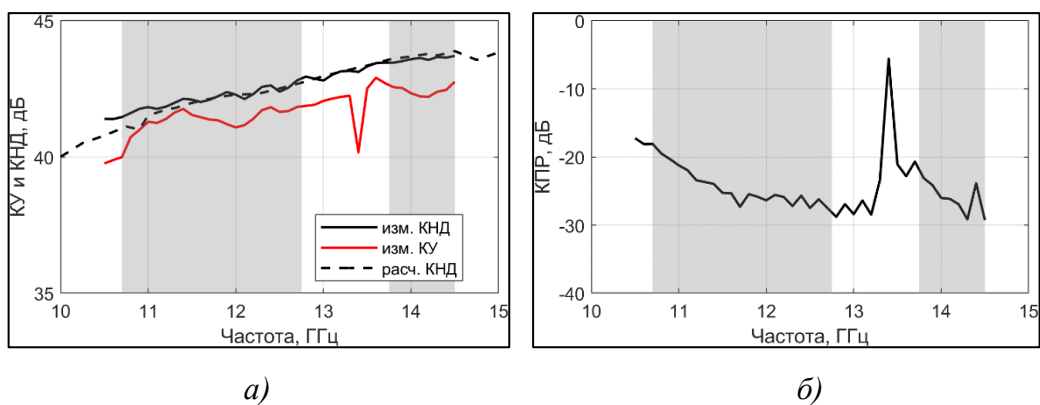


Рисунок 5. КУ и КНД (а) и КПР (б) антенной системы

4. Заключение

В результате разработки были получены характеристики как облучателя, так и антенной системы на его основе, которые позволяют применять их для спутниковой связи в Ku диапазоне. Ключевым элементом антенной системы является облучатель с ближнепольным контррефлектором, который при относительной простоте конструкции имеет хорошее согласование с фидерным трактом, и позволяет получать осесимметричное обратное излучение во всем Ku диапазоне. Разработанный облучатель обеспечивает малое затенение основного рефлектора, и может применяться для рефлекторов различного диаметра.

Список литературы

1. Cutler C. C. Parabolic-antenna design for microwaves //Proceedings of the IRE. – 1947. – Т. 35. – №. 11. – С. 1284-1294.
2. Kildal P. S. The hat feed: A dual-mode rear-radiating waveguide antenna having low cross polarization //IEEE transactions on antennas and propagation. – 1987. – Т. 35. – №. 9. – С. 1010-1016.
3. Wei W. et al. New hat feed for reflector antennas realised without dielectrics for reducing manufacturing cost and improving reflection coefficient //IET microwaves, antennas & propagation. – 2011. – Т. 5. – №. 7. – С. 837-843.
4. Yang J., Kildal P. S. Calculation of ring-shaped phase centers of feeds for ring-focus paraboloids //IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2000. – Т. 48. – №. 4. – С. 524-528.
5. Geterud E. G. et al. Design and optimization of a compact wideband hat-fed reflector antenna for satellite communications //IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2012. – Т. 61. – №. 1. – С. 125-133.
6. Zhao L. et al. A Ring-focus antenna with splash plate in Ka-band //International Journal of Antennas and Propagation. – 2018. – Т. 2018.
7. Zhao Y. et al. Design of a Ka broadband satellite communication antenna for low-earth-orbit constellation //2018 12th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE). – IEEE, 2018. – С. 1-4.
8. Zhao Y. J. et al. Design of a hat feed for ring focus reflector antenna //2019 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). – IEEE, 2019. – С. 1-3.
9. Geterud E. G., Yang J., Östling T. Wide band hat-fed reflector antenna for satellite communications //Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). – IEEE, 2011. – С. 754-757.
10. Облучатель зеркальной антенны с полым держателем ближнепольного контррефлектора : пат. 2816678 Рос. Федерация. № 2024101454 ; заявл. 23.01.24 ; опубл. 03.04.24, Бюл. № 10. 12 с.
11. Сивов Н. О., Лемберг К. В., Грицан О. Б. Двухдиапазонный септум-поляризатор для приемо-передающей антенны Ku-диапазона // VII Всероссийская научно-техническая конференция «Системы связи и радионавигации»: тезисы докл. (Красноярск 26-27 окт. 2023 г.). – Красноярск, 2023. – С. 59–63.