

УДК 621.396.62 DOI 10.30894/issn2409-0239.2020.7.2.21.32

Особенности применения полноповоротных антенных систем в наземных комплексах радиомониторинга

С. В. Кожевников, к. т. н., *office@stc-spb.ru*

ООО «Специальный Технологический Центр», Санкт-Петербург, Российская Федерация

С. Д. Кирилук, *office@stc-spb.ru*

ООО «Специальный Технологический Центр», Санкт-Петербург, Российская Федерация

С. С. Тимофеев, *office@stc-spb.ru*

ООО «Специальный Технологический Центр», Санкт-Петербург, Российская Федерация

А. Н. Глуздов, *contact@spacecorp.ru*

Космические войска, Министерство обороны, Москва, Российская Федерация

Н. Е. Теплоухова, *contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Рассматриваются технические решения и алгоритмы функционирования антенных систем в части наведения на низкоорбитальные космические аппараты (КА) и их сопровождения.

Выполнено расчетное моделирование для двухзеркальной антенной системы с эллиптическим фокусом (АДЭ) с диаметром зеркала 3,5 м на частоте 8,5 ГГц, в том числе рассчитаны диаграммы направленности пятипортовой системы со смещенными облучателями. Показано, что дискриминационная характеристика получается с неявно выраженным нулем, что приводит к ошибкам наведения. Повысить точность наведения предложено за счет размещения периферийных облучателей непосредственно на контррефлекторе. Моделирование показало, что при такой структуре облучателей практически невозможно избавиться от боковых составляющих (дребезга диаграммы направленности) в секторах, близких к направлению нуля антенной системы.

Более перспективным оказалось использование щелевых облучателей на контррефлекторе антенной системы, что позволяет сформировать в районе малых углов отклонения достаточно гладкую пеленгационную характеристику.

Ключевые слова: наведение, сопровождение, искусственный спутник Земли, моноимпульсная система, пеленгационная характеристика, облучающая система

Application of Full Rotatable Antenna Systems in Ground-based Radio Monitoring Complexes

S. V. Kozhevnikov, *Cand. Sci. (Engineering), office@stc-spb.ru*

Joint Stock Company "Special Technological Center", St. Petersburg, Russian Federation

S. D. Kiriljuck, *office@stc-spb.ru*

Joint Stock Company "Special Technological Center", St. Petersburg, Russian Federation

S. S. Timofeev, *office@stc-spb.ru*

Joint Stock Company "Special Technological Center", St. Petersburg, Russian Federation

A. N. Gluzdov, *contact@spacecorp.ru*

Space Forces, Ministry of Defense, Moscow, Russian Federation

N. E. Teploukhova, *contact@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. Technical solutions and algorithms for the functioning of antenna systems are considered in terms of pointing at low-orbit spacecraft (SC) and their tracking.

Computational modeling was performed for a two-mirror antenna system with an elliptical focus with a mirror diameter of 3.5 m at a frequency of 8.5 GHz, including radiation patterns of a five-port system with offset irradiators. It is shown that the discriminatory characteristic is obtained with an implicit zero, which leads to pointing errors. It was proposed to increase the accuracy of pointing by placing peripheral irradiators directly on the counterreflector. Modeling showed that with such a structure of irradiators it is almost impossible to eliminate the side components (jitter of the radiation pattern) in sectors close to the zero direction of the antenna system.

The use of slot irradiators on the counterreflector of the antenna system turned out to be more promising, which makes it possible to form a fairly smooth direction-finding characteristic in the region of small deviation angles.

Keywords: pointing, tracking, artificial Earth satellite, monopulse system, direction-finding characteristic, irradiating system

Введение

Для наземных комплексов радиомониторинга космических аппаратов (КА), находящихся на низко- и высокоэллиптических орбитах, требуется проектирование и производство соответствующих антенных систем. При этом возникает необходимость повышения эффективности систем автоматического сопровождения КА. Под эффективностью в данном случае понимается получение требуемого эффекта (точности наведения) при минимизации затрат в ходе реализации системы.

Анализ современных методов наведения

Современные методы наведения можно классифицировать по следующим группам [1]:

- ручное наведение;
- программное наведение;
- автоматическое наведение по принимаемым сигналам;
- смешанное наведение.

Ручное наведение чаще всего используется при радиомониторинге геостационарных КА или в задачах привода в начальную точку ожидания для низколетных КА.

Программное наведение — это дискретное управление антенной по предварительно вычисленным траекторным параметрам. Как любое дискретное управление, этот метод основан на компенсации ошибки, возникающей в предыдущем шаге относительно последующего. Кроме программных ошибок, при этом возникают инструментальные ошибки наведения, обусловленные ограниченной точностью датчиков и несовершенством механизмов сопровождения — ошибки, вызываемые, в частности, инерционностью системы, люфтами в управляемых приводах и т. п. Создание безлюфтовых механизмов, особенно для антенн среднего и большого диаметра, существенно усложняет систему и повышает ее стоимость [2].

Снизить погрешность наведения, возникающую при программном методе, позволяет автоматическое наведение, которое на современных стан-

циях приема сигналов КА реализуется различными способами.

Так, для КА на квазистационарных орбитах широко распространен метод сканирования пространства. При этом через установленные промежутки времени антенная система производит поиск максимума приема сигнала. Сканирование происходит обычно в пределах разрешенной ширины диаграммы направленности. Независимо от выбранной траектории сканирования, необходимо произвести отсчеты как минимум в четырех направлениях пространства: вверх–вниз, вправо–влево и выбрать ориентацию с максимальным уровнем [3].

Для низколетящих КА такая система сопровождения оказывается нерациональной, поскольку требует для принятия решения многократных пробных движений рефлектора. При значительной инерционности массивной антенной системы работоспособность такой схемы сомнительна.

Упростить эту систему позволяет известный способ с вращающимся контррефлектором. При этом контррефлектор должен быть децентрализован: смещен относительно электрической оси антенны, а значит, принципиально будут иметь место потери в энергетике принимаемого сигнала. Кроме того, в принимаемом сигнале возникают дополнительные модуляционные искажения, отнюдь не улучшающие качество приема. Такой метод можно рекомендовать для решения задач обнаружения сигналов, но не для приема с последующей обработкой.

В связи с вышеизложенным в настоящее время оценивается целесообразность разработки моноимпульсной системы сопровождения в X -диапазоне частот. Сущность таких систем состоит в формировании за счет разнесенных диаграмм направленности пространственной пеленгационной характеристики, как показано на рис. 1, а. На рис. 1, б показан вариант облучающей системы для моноимпульсного наведения на КА [4, 5].

Практически существуют как четырехпортовые, так и пятипортовые моноимпульсные системы. Однако практика их применения в X -диапазоне весьма ограничена в связи с существенными искажениями пеленгационной характеристики, обусловленными взаимным влиянием близко распо-

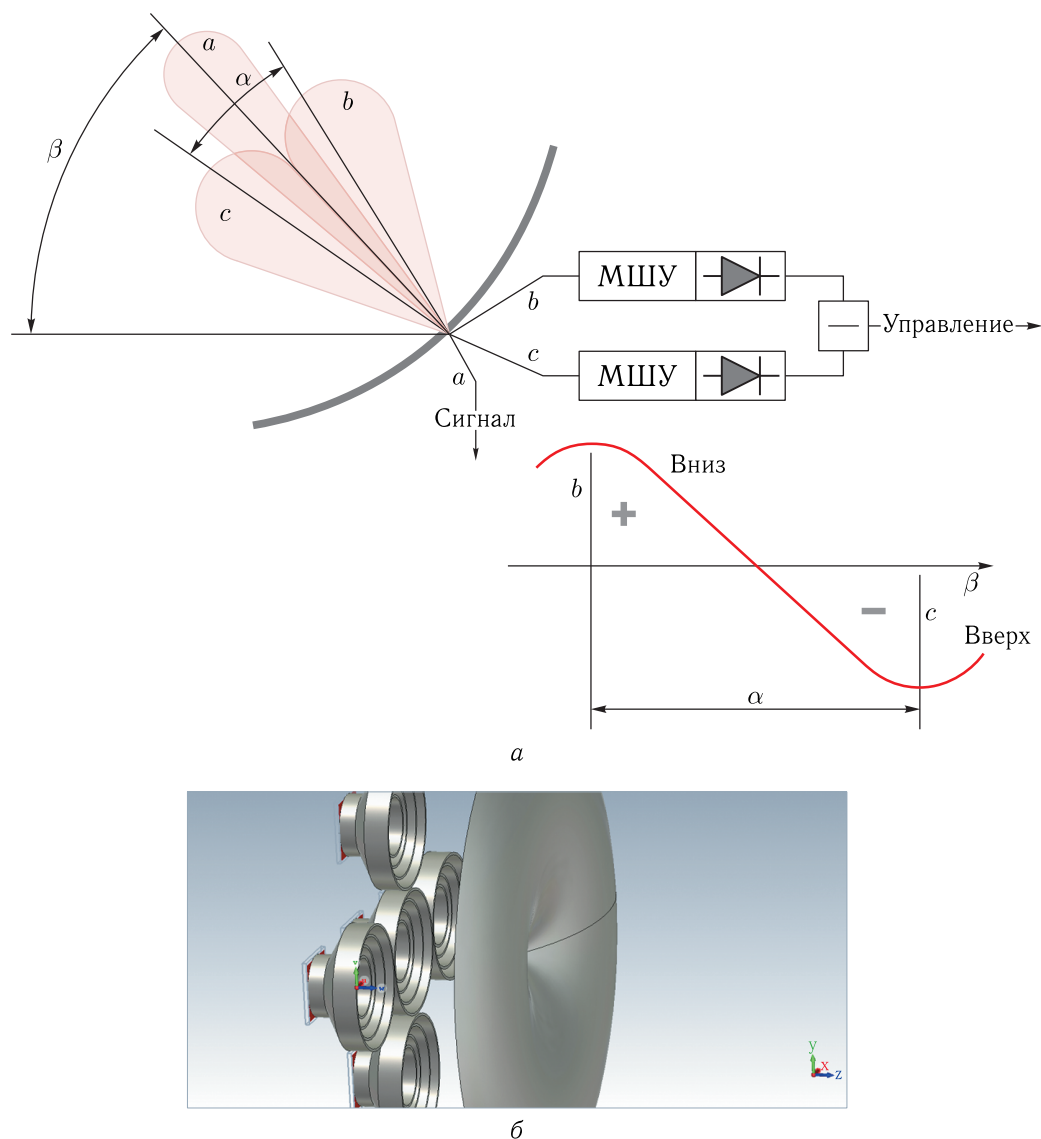


Рис. 1. *а* — Структурная схема построения моноимпульсного наведения; *б* — моноимпульсная система сопровождения КА

ложенных облучателей, несимметричных относительно оптической оси [6].

Для иллюстрации предварительных результатов далее использованы результаты моделирования диаграмм направленности [7]. Расчетное моделирование производилось в программе CST Studio Suite (ЦСТ Студио Сьют) для двухзеркальной антенной системы с эллиптическим фокусом (АДЭ) с диаметром зеркала 3,5 м на частоте 8,5 ГГц.

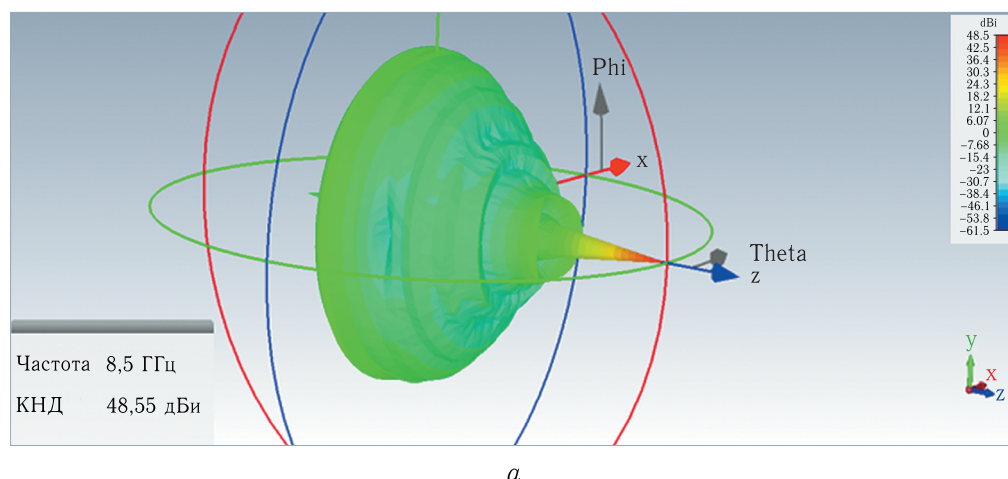
На рис. 2, *а* представлена трехмерная диаграмма направленности однопортовой системы, а на 2, *б* — та же характеристика в полярных коор-

динатах. Диаграммы направленности центрального облучателя пятипортовой системы представлены на рис. 3, *а* и 3, *б*.

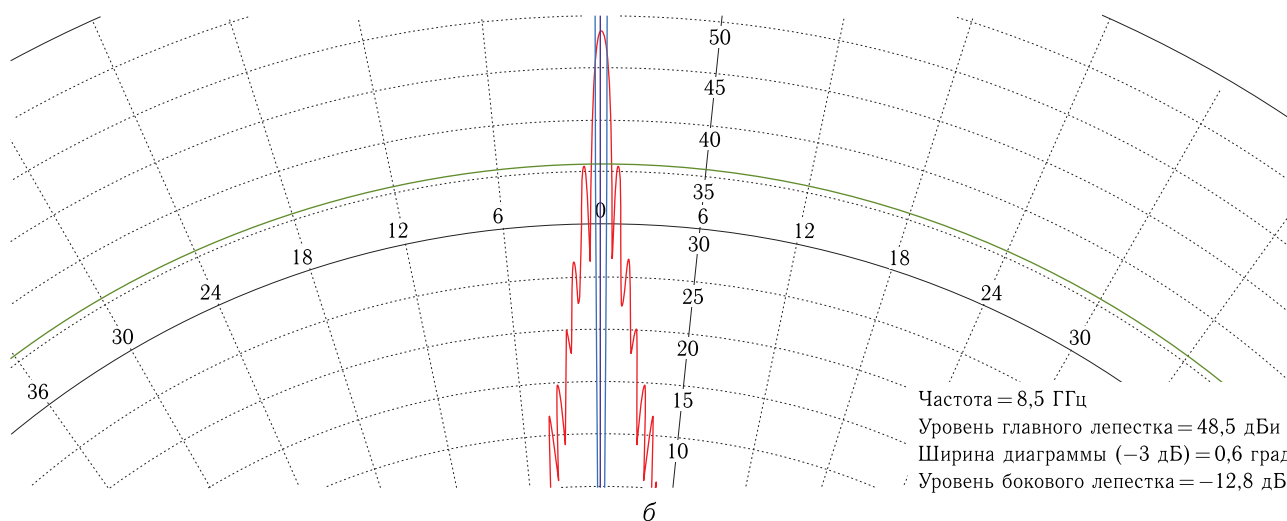
Для центрального облучателя отличия несущественны, по крайней мере, до первого бокового лепестка.

Для смещенных облучателей в пятипортовой системе диаграммы направленности сильно искажаются (рис. 4).

На рис. 4, *б* и рис. 4, *в* в полярной системе показаны диаграммы направленности в главных плоскостях антенны — вертикальной и горизонтальной.



а



б

Рис. 2. Диаграммы направленности однопортовой системы

Облучатель находится ниже центрального. Поэтому в вертикальной плоскости диаграмма направленности несимметричная, а в горизонтальной — симметричная, но с провалом по центру. Те же особенности и у диаграмм направленности остальных (кроме центрального) облучателей.

При таких диаграммах направленности дискриминационная характеристика получается с неявно выраженным нулем, что приводит к ошибкам наведения.

Повышение точности наведения

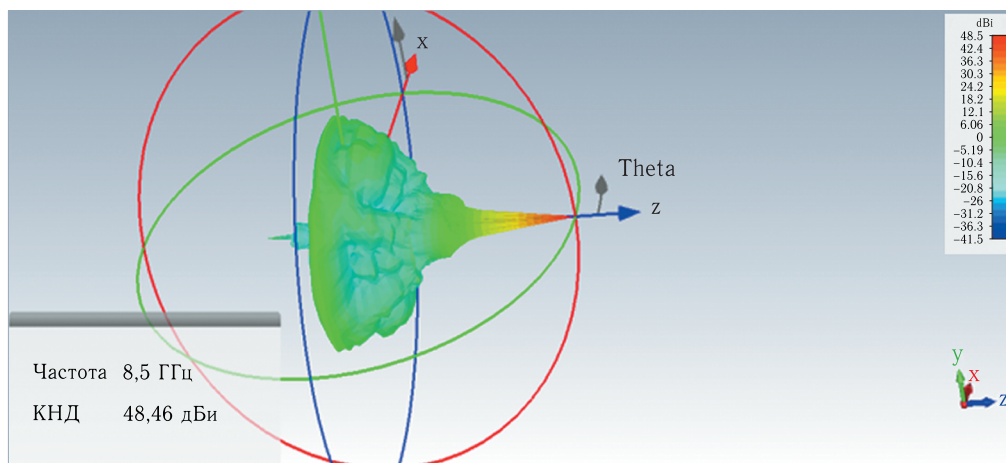
Повысить точность наведения предлагается за счет размещения периферийных облучателей непо-

средственно на контррефлекторе. На рис. 5 представлен вариант такого контррефлектора.

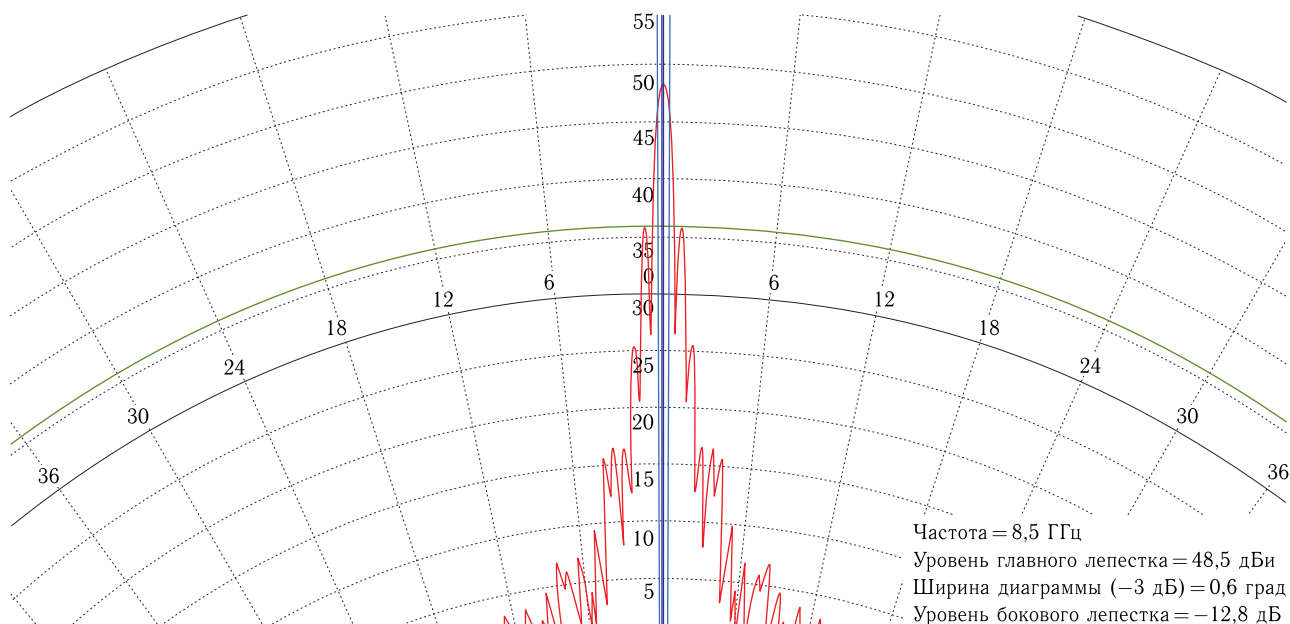
Как видно из рис. 6, основная диаграмма направленности антенны с модифицированным контррефлектором практически не изменилась.

Несколько менее изрезанными в области «рабочих» углов оказались и другие диаграммы антенны. На рис. 7 они приведены при облучателе, расположенном ниже фокальной оси антенны.

На рис. 7, б и 7, в представлены диаграммы направленности в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Моделирование показало, что при такой структуре облучателей практически невозможно избавиться от боковых составляющих (дребезга диаграммы направленности) в секторах, близких



а



б

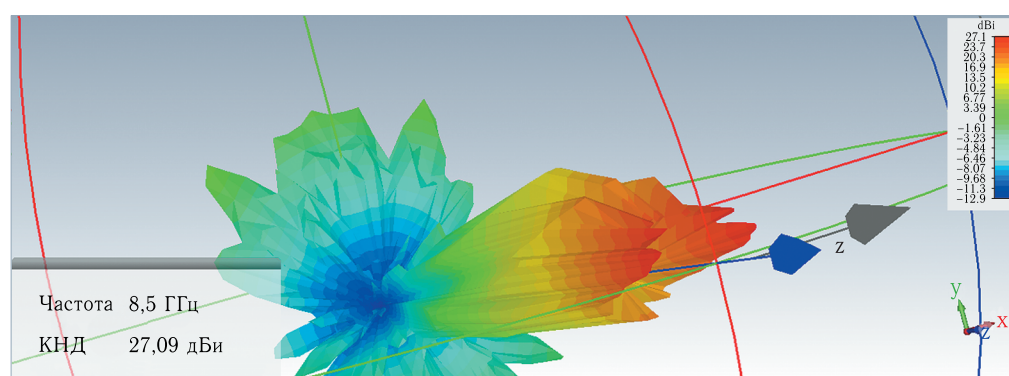
Рис. 3. Диаграммы направленности центрального облучателя 5-портовой системы

к направлению нуля антенной системы. Кроме того, для выделения нужной составляющей поля оказалось необходимым применение ортомодов для каждого из облучателей.

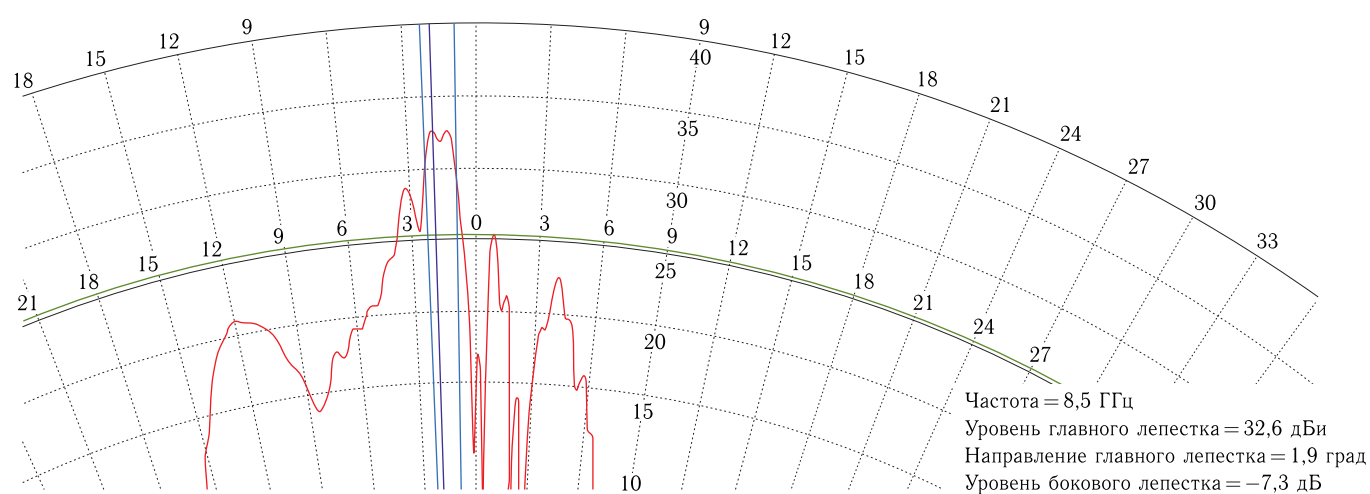
Более перспективным стало использование щелевых облучателей на контррефлекторе антенной системы. На рис. 8, а (вид со стороны рефлектора) и 8, б (вид с противоположной стороны) приведены изображения контррефлектора АДЭ с щелевыми облучателями.

Поиск оптимального размещения и формы апертуры облучателей привели к структуре из четырех радиально направленных щелей, максимально приближенных к центру контррефлектора размером $2\lambda \times 0,3\lambda$ (λ — длина волны).

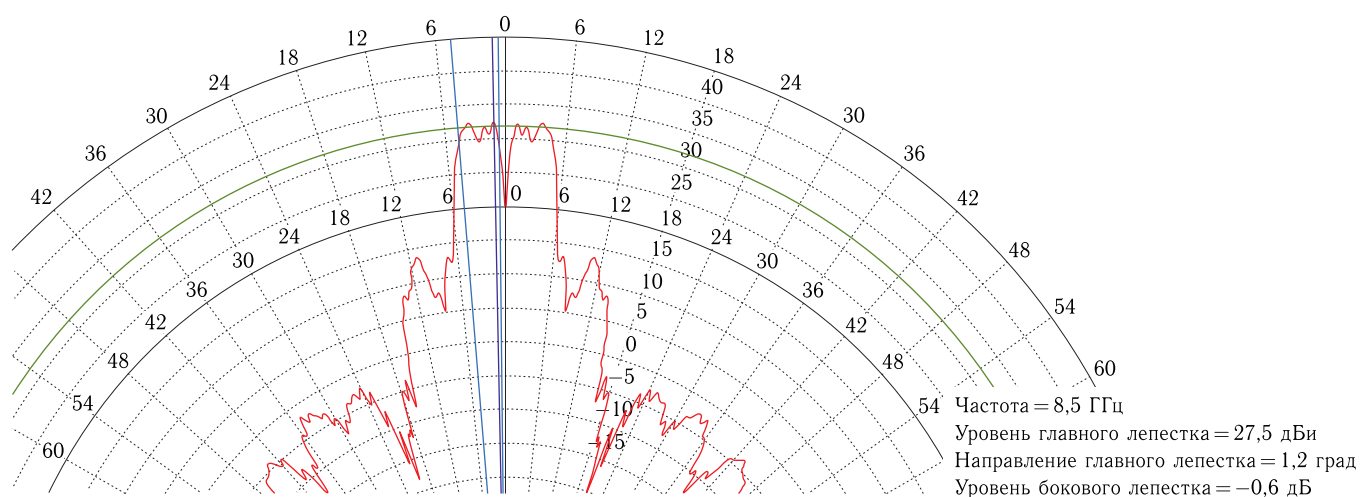
Диаграмма направленности центрального облучателя практически не меняется — потери составляют не более 0,5 дБ, а диаграммы направленности щелевых облучателей имеют гладкую характеристику в районе малых углов.



а



б



в

Рис. 4. Диаграммы направленности смещенных облучателей 5-портовой системы

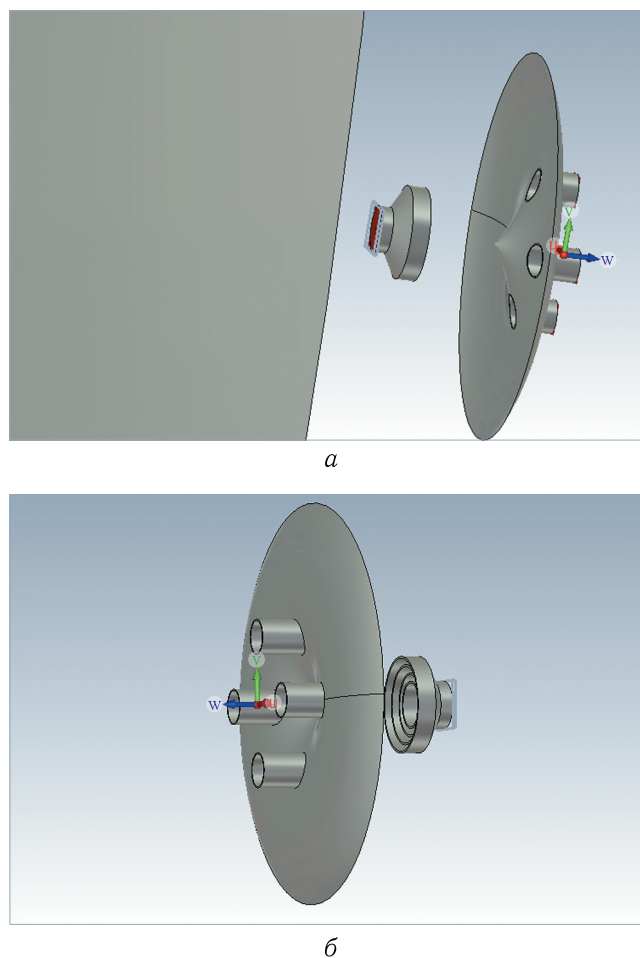


Рис. 5. Контррефлектор с облучающими системами

Для подстройки антенной системы между командами наведения представляют интерес именно малые углы. На рис. 9, *а* и 9, *б* приведены диаграммы направленности двух противоположных щелевых облучателей.

Разность этих диаграмм позволяет сформировать в районе малых углов отклонения достаточно гладкую пеленгационную характеристику, приведенную на рис. 10, которая получена численным вычитанием диаграмм направленности, как показано на рис. 9, *б* и 9, *а*.

Недостатком пассивных моноимпульсных систем является возможность увода антенной системы при наличии более мощного ложного сигнала, попадающего в диаграмму направленности антенной системы. Устранить эту проблему должен позволить комбинированный метод наведения, когда в пределах расчетных данных антенная система

наводится по полученным параметрам, а непрерывное уточнение производится моноимпульсным методом. Упрощенная структурная схема такой системы представлена на рис. 11.

Заключение

В наземных комплексах радиомониторинга КА, находящихся на низко- и высокоэллиптических орбитах, применяются полноповоротные трехосевые антенные системы с диаметром рефлектора от 1 м до 5 м. При этом антенные системы с диаметром рефлектора более 3 м, как правило, являются двухзеркальными. В настоящее время для таких антенн ведутся работы по повышению точности сопровождения КА. Предложены рекомендации, направленные на повышение точности сопровождения КА на низко- и высокоэллиптических орбитах.

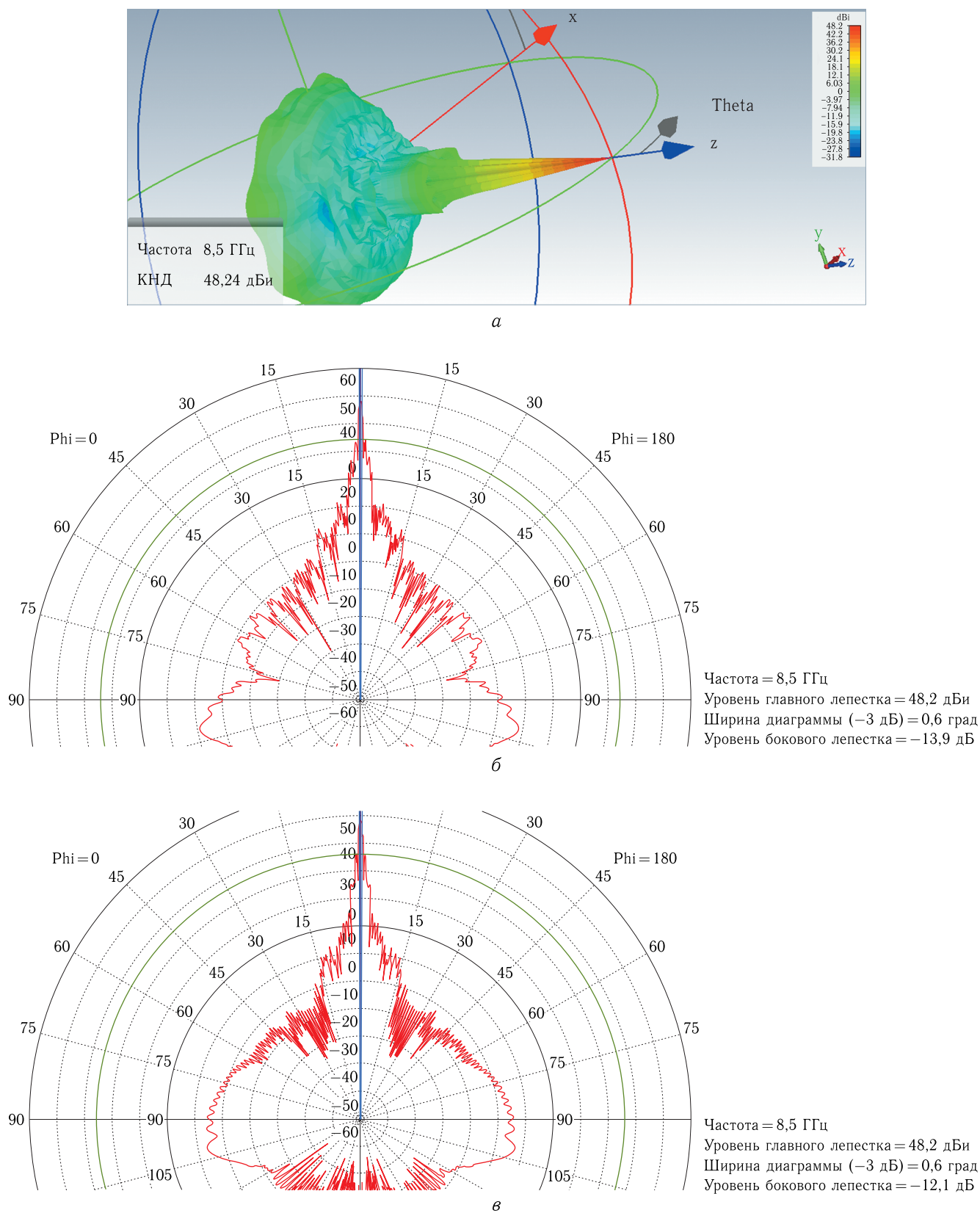
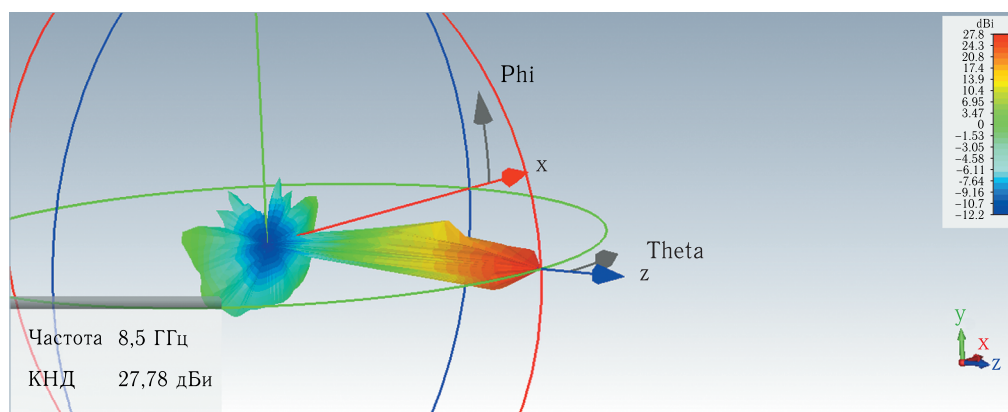
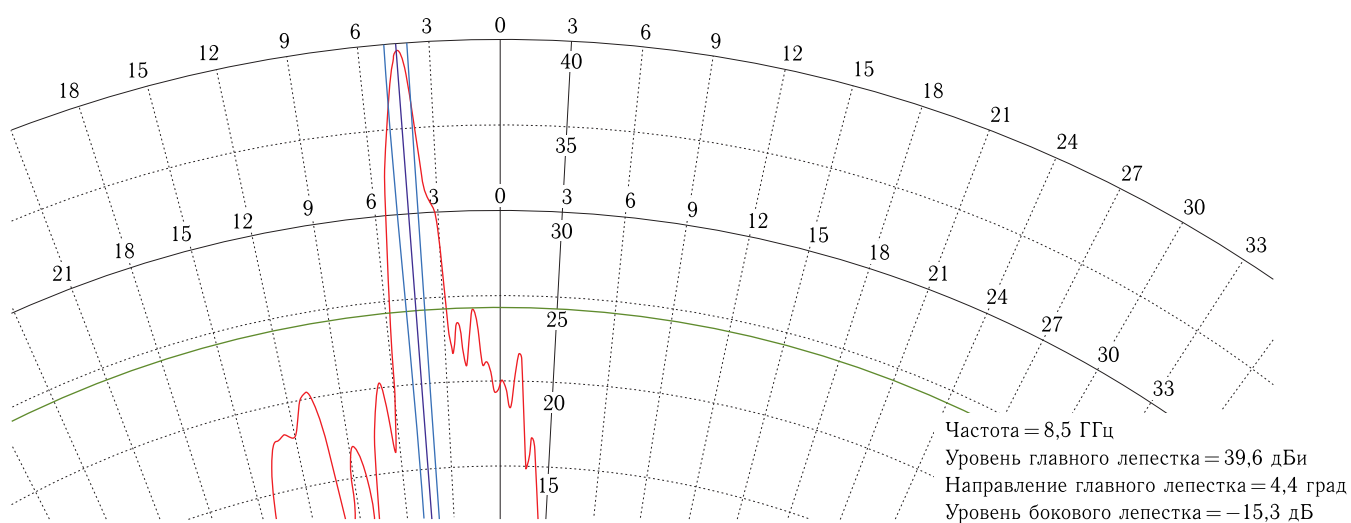


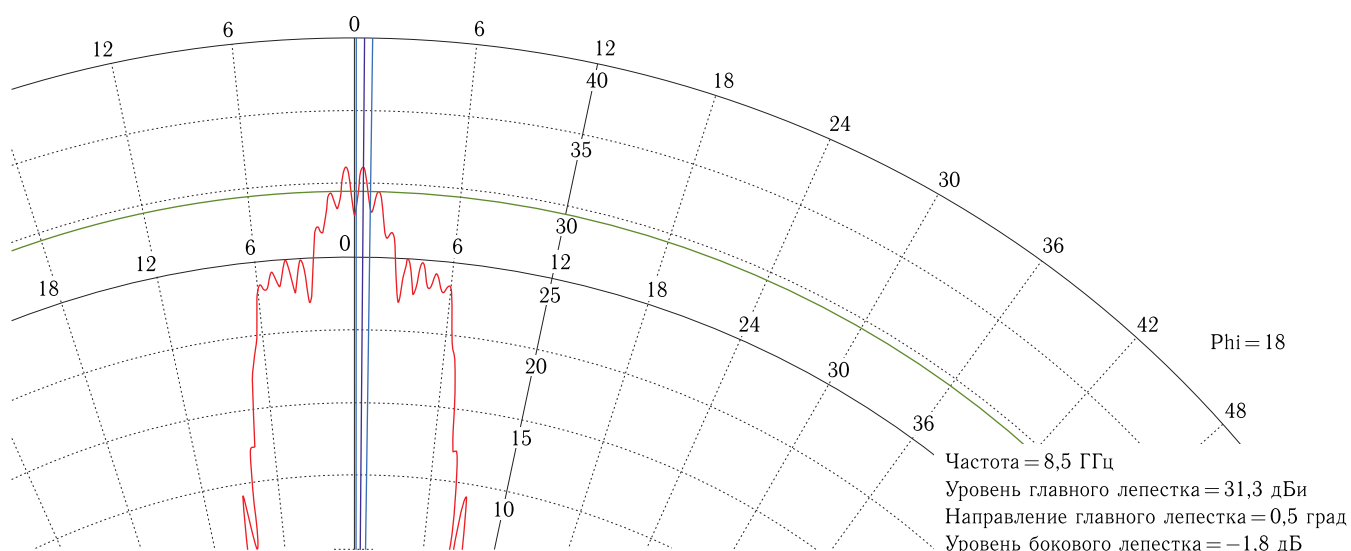
Рис. 6. Диаграммы направленности центрального облучателя с модифицированным контррефлектором



а



б



в

Рис. 7. Диаграммы направленности с облучателем на контррефлекторе

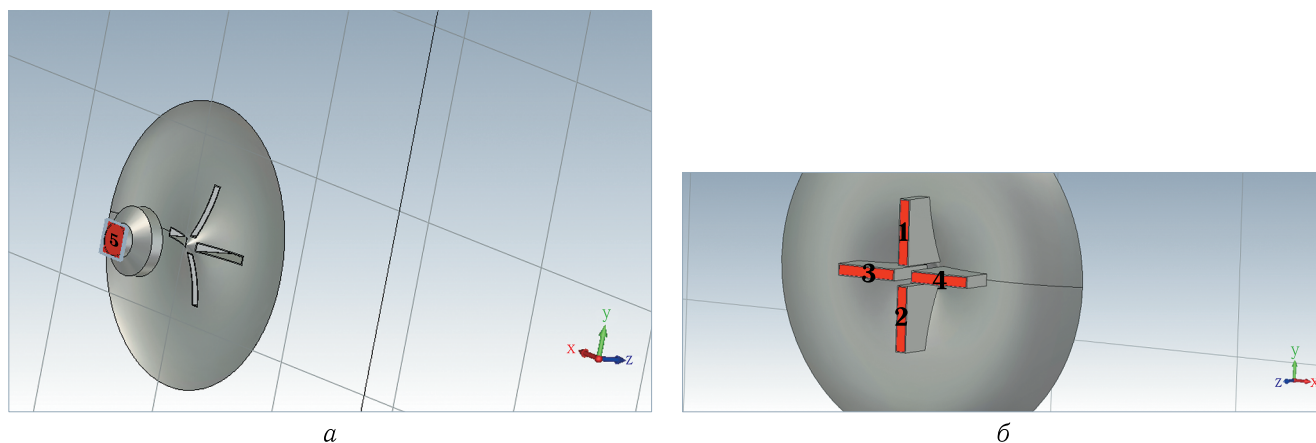


Рис. 8. Контррефлектор АДЭ с щелевыми облучателями

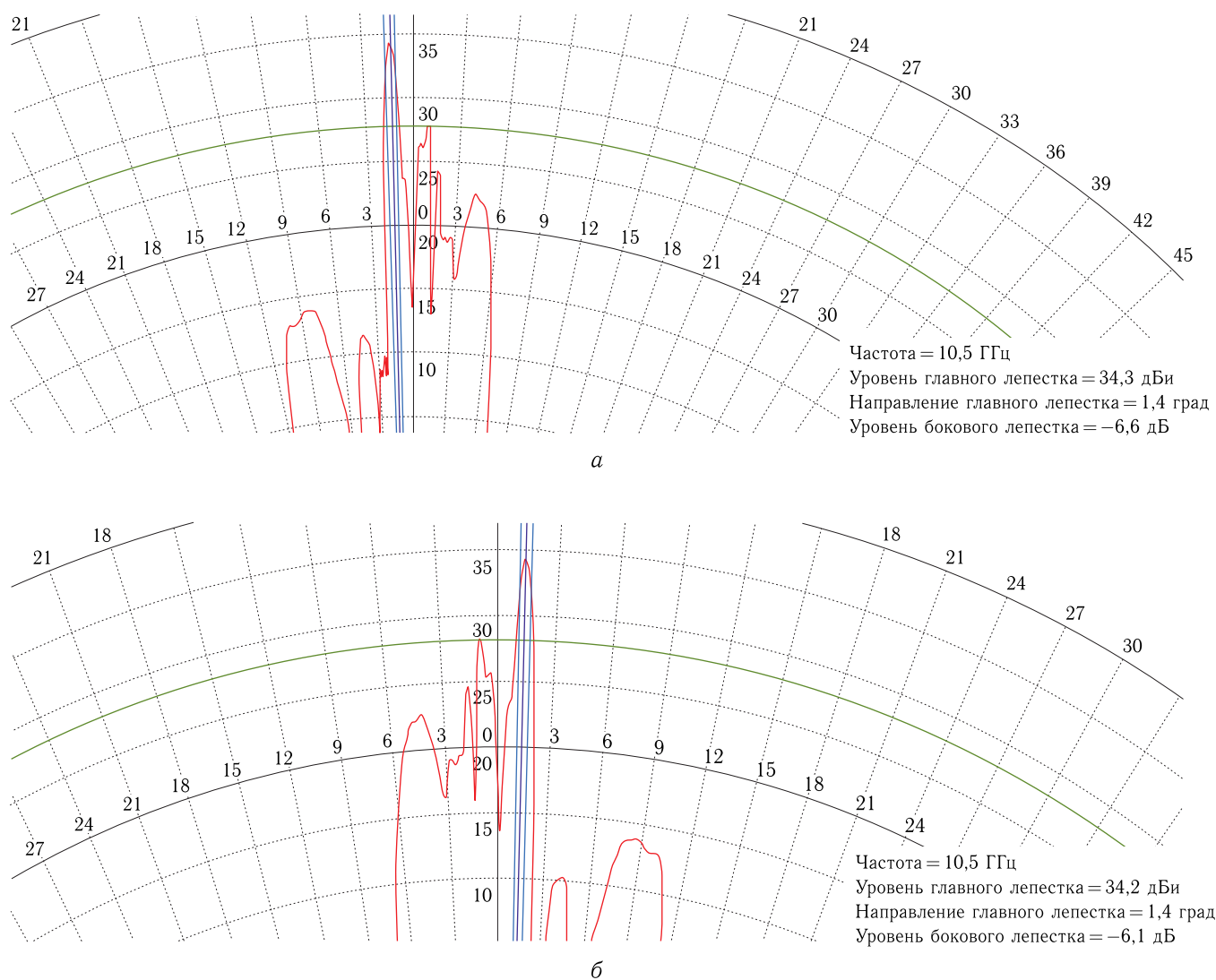


Рис. 9. Диаграммы направленности двух противоположных щелевых облучателей

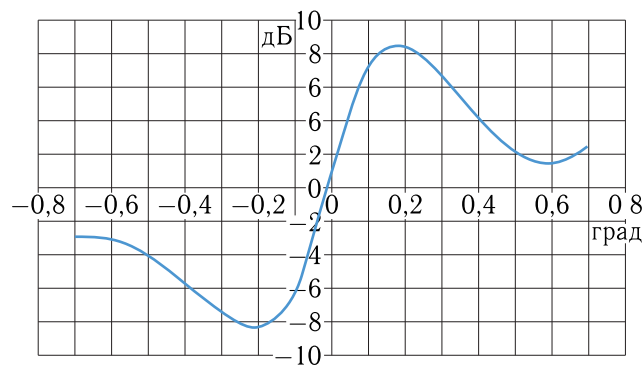


Рис. 10. Пеленгационная характеристика

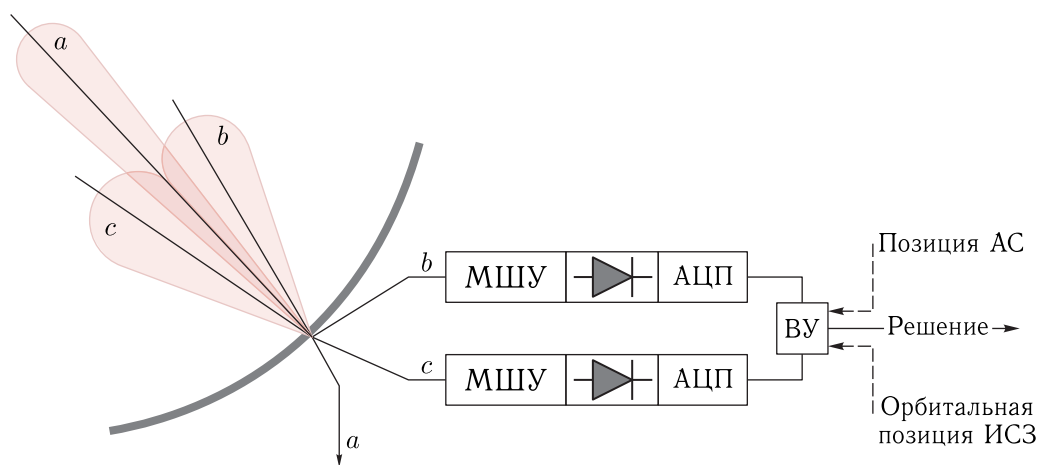


Рис. 11. Комбинированный метод наведения приемной антенной системы

Список литературы

1. Большая энциклопедия нефти и газа (наведение — антенна): сайт. URL: <http://www.ngpedia.ru/id168115p1.html> (Дата обращения 16.05.2020).
2. Бобков В.Ю., Званцугов Н.С. Системы наведения антенн ООО «Технологии радиосвязи» // Первая мила, 2010, т. 17, № 2. С. 42–45.
3. Галкин А.П. Основы радиотехнических систем. Учеб. пособ. Владимир: Владимирский государственный университет, 2004.
4. Родс Д.Р. Введение в моноимпульсную радиолокацию. М.: Сов. радио, 1960. 158 с.
5. Белоцерковский Г.Б. Основы радиолокации и радиолокационные устройства. М.: Сов. радио, 1975. 336 с.
6. Травкин Д. Моноимпульсный метод автосопровождения КА // Технологии и средства связи. Специальный выпуск «Спутниковая связь и вещание», 2017, № 6 (122). С. 51.
7. Фрадкин А.З. Антенно-фидерные устройства. М.: Связь, 1977. 440 с.: ил.