



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.4.5>

УДК: 621.396.677

КОМПАКТНЫЙ МОНОИМПУЛЬСНЫЙ ОБЛУЧАТЕЛЬ КРУГОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ С РАЗНОСТНЫМ КАНАЛОМ НА ОДНОМ ВИДЕ КРУГОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Е.И. Лаврецкий, Е.М. Прусов, В.С. Чернышов

НИИ точных приборов, 127490, Москва, ул. Декабристов, владение 51

Статья поступила в редакцию 27 декабря 2024 г.

Аннотация. Рассмотрен оригинальный малогабаритный моноимпульсный облучатель на круговой поляризации, в разностном канале которого используется ТЕМ волна коаксиального волновода с преобразователем поляризации. Приведены результаты расчета электрических характеристик в диапазоне частот от 18 до 20 ГГц. Показано, что оптимальные электрические характеристики могут быть получены при использовании такого облучателя в параболических зеркалах с отношением фокусного расстояния к диаметру зеркала, равным 0,9.

Ключевые слова: моноимпульсный облучатель, коэффициент эллиптичности.

Автор для переписки: Лаврецкий Евгений Изидорович, e.lavretski@mail.ru

Введение

Для связи с космическими объектами широко применяются зеркальные моноимпульсные антенны, работающие на круговой (эллиптической) поляризации. В литературе описано большое количество моноимпульсных облучателей круговой поляризации для таких антенн [1], которые можно условно разделить на две группы. К первой группе относятся облучатели, представляющие собой антенные решетки из четырех излучателей круговой поляризации, к которым подключена диаграммо-образующая схема, имеющая входы для суммарного и разностного каналов. В таких облучателях обычно формируются три диаграммы направленности (ДН) – суммарная (Σ) и две разностные (Δ) с нулями в ортогональных плоскостях. Недостатками таких облучателей являются их громоздкость, высокие требования к идентичности излучателей, а также трудности с оптимальным облучением зеркала по каналам.

Ко второй группе можно отнести многомодовые облучатели рупорного типа, в которых для создания суммарной и разностной ДН используется общий раскрыт рупора. В этих облучателях формируются только две ДН – суммарная и разностная воронкообразная, для которых используется возбуждение разных волноводных мод в рупоре. Реализация воронкообразной ДН на круговой поляризации является сложной задачей и осуществляется обычно с применением 8-канальных ответвителей, возбуждающих в круглом волноводе две волны H_{21} через отверстия связи [2-3], либо через возбудители с полной связью для волны H_{21} [4]. В результате этого, конструкция облучателя получается сложной и громоздкой.

Известна более простая конструкция моноимпульсного облучателя с общим раскрытием рупора, в которой в суммарном канале реализуется ДН на круговой поляризации с использованием волн H_{11} в круглом волноводе, а в разностном канале реализуется ДН на радиальной (линейной) поляризации с использованием волны E_{01} круглого волновода [5-6]. Однако антенна с таким

облучателем может сопровождать объекты (источники радиосигнала от космических или летательных аппаратов), работающие только на круговой поляризации. Если сигнал от сопровождаемого объекта имеет низкий коэффициент эллиптичности ($KЭ$), то следящую систему может «выбить», или втягивание может происходить по спирали [5-6]. Другим недостатком моноимпульсного облучателя с волной E_{01} является то, что крутизна пеленгационной характеристики по напряжению ($ПХ$) в $\sqrt{2}$ раз ниже, чем в известных системах с разностной ДН на круговой поляризации [5]. Третьим недостатком известной системы является то, что такая система не может в принципе осуществлять автосопровождение при наличии поляризационного уплотнения, когда одновременно приходят волны левой и правой круговых поляризаций, т.к. в разностном канале будут одновременно возбуждаться и интерферировать сигналы от обеих приходящих волн.

Недавно была предложена новая конструкция для создания моноимпульсного облучателя круговой поляризации, в которой суммарный канал выполнен на круглом волноводе с волной H_{11} , а разностный канал выполнен на коаксиальном волноводе с волной TEM , на выходе которого установлен преобразователь поляризации. Данная конструкция моноимпульсного облучателя защищена патентом РФ [7], патентообладатель АО «НИИ ТП». В данной статье более подробно описывается предложенный в изобретении способ реализации воронкообразной ДН на круговой поляризации с помощью волны TEM , позволяющий получить простой по конструкции моноимпульсный облучатель, который можно использовать не только в наземных, но и в бортовых антеннах.

1. Описание облучателя

Упрощенная схема облучателя представлена на рисунке 1. Как следует из рисунка, облучатель состоит из двух concentрических цилиндров (труб) – внутреннего и внешнего, образующих коаксиальную линию, и преобразователя поляризации. Внутренняя цилиндрическая труба заканчивается внутри внешней цилиндрической трубы на расстоянии L от торца внешней цилиндрической трубы. Торцы внешней цилиндрической трубы образуют раскрыв облучателя.

Внутренний цилиндр содержит конический рупор, возбуждаемый круглым волноводом; он формирует Σ ДН на круговой поляризации (поляризатор на рисунке не показан). В коаксиальной линии возбуждается ТЕМ волна, которая набегаёт на преобразователь поляризации, в результате чего формируется разностная ДН на круговой поляризации.

Преобразователь поляризации представляет собой кольцеобразный диэлектрический диск небольшой толщины с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 2 \div 4$, на внешнюю сторону которого нанесены наклонные металлические полоски. Преобразователь поляризации установлен в коаксиальном волноводе, как показано на рисунке 1 (вблизи от раскрыва облучателя, на скачке сечения коаксиального волновода).

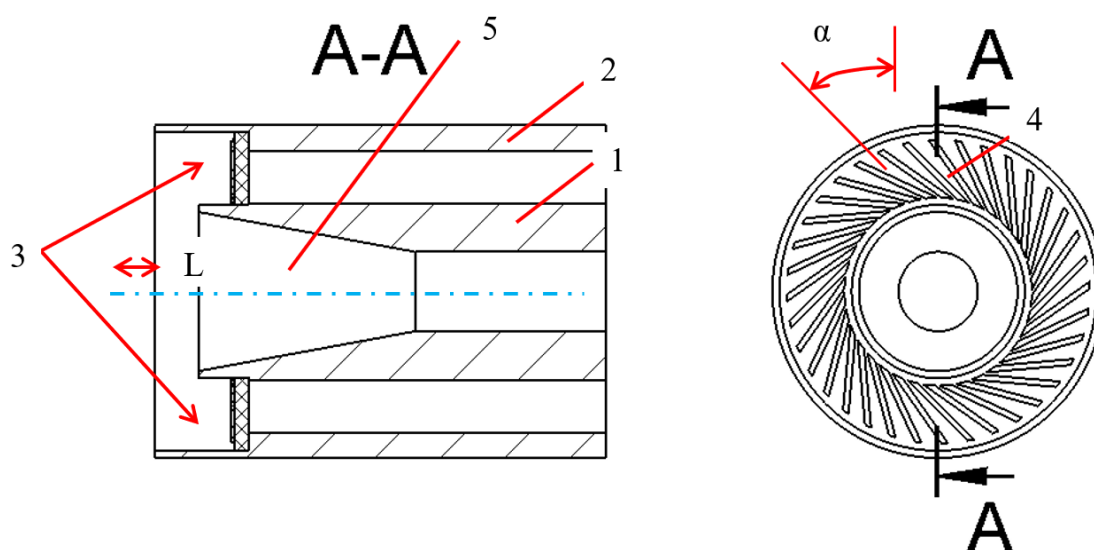


Рис. 1. Упрощенная схема облучателя: 1 – внутренняя цилиндрическая труба; 2 – внешняя цилиндрическая труба; 3 – преобразователь поляризации; 4 – система наклонных металлических полосков (вибраторов); 5 – конический рупор.

В качестве примера на рисунке 2 представлена одна из возможных конструктивных реализаций возбуждателя волны ТЕМ для такого облучателя. Для этого используется волноводный двойной Т-мост, свернутый в Е-плоскости, который возбуждает в противофазе два полукольцевых волновода (можно рассматривать их как изогнутые прямоугольные волноводы с волнами Н10), которые, в свою очередь, возбуждают четыре четвертькольцевых волновода с равными амплитудами и с одинаковой ориентацией векторов E вдоль радиусов. В указанных четырех четвертькольцевых волноводах достигается нужная полярность для чистого возбуждения волны ТЕМ коаксиального волновода. В Е-тройнике двойного Т-моста установлена согласующая нагрузка.

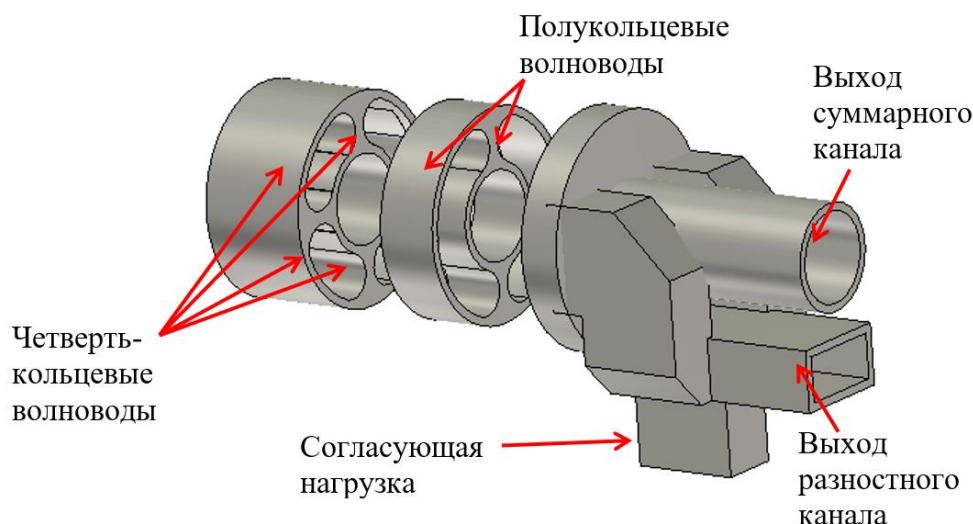


Рис. 2. Конструктивная реализация возбуждателя волны ТЕМ.

Рассмотрим функционирование моноимпульсного облучателя круговой поляризации (рисунок 1). По теореме взаимности рассмотрим работу моноимпульсного облучателя в передающем режиме. Пусть на вход круглого волновода поступают волны Н11 с ортогональными круговыми поляризациями. Волны с круговой поляризацией поступают в конический рупор и излучаются в свободное пространство, формируя суммарные ДН на двух ортогональных круговых поляризациях. Рассмотрим далее коаксиальный волновод, образованный между двумя концентрическими полыми металлическими цилиндрическими трубами. Диаметры цилиндрических труб выбраны таким

образом, что в коаксиальном волноводе может распространяться только низшая осесимметричная мода ТЕМ, высшие моды находятся в отсечке. В коаксиальном волноводе выполнен скачок сечения (скачкообразное увеличение внутреннего диаметра внешней цилиндрической трубы), за которым установлен преобразователь поляризации. Пусть на вход коаксиального волновода поступает волна ТЕМ, которая распространяется до скачка сечения коаксиального волновода и наводит на металлических полосках (вибраторах) преобразователя поляризации электрические токи. Токи на металлических полосках (вибраторах), имеющих наклон к радиусу, содержат радиальную и азимутальную составляющие, поэтому возбуждают в коаксиальном волноводе волны ТЕМ и Н01. После преобразователя поляризации распространяется комбинация волн ТЕМ и Н01, которые приобретают квадратурную разность фаз и, в итоге, излучаются с формированием разностной ДН на круговой поляризации. Вид круговой поляризации определяется направлением наклона металлических полосков (вибраторов) на преобразователе поляризации. Если металлические полоски (вибраторы) наклонены по часовой стрелке для наблюдателя со стороны коаксиального входа моноимпульсного облучателя, то формируется разностная ДН на правой поляризации. Наоборот, если металлические полоски (вибраторы) наклонены против часовой стрелки (для того же наблюдателя), то формируется разностная ДН на левой поляризации. На рисунке 1 показан вариант с правой поляризацией в разностном канале.

2. Результаты математического моделирования и макетирования

Для центральной частоты 19 ГГц были подобраны оптимальные размеры моноимпульсного облучателя (рисунок 1) для работы суммарного и разностного каналов. Преобразователь поляризации был изготовлен с помощью травления фольгированного материала Rogers4350В (диэлектрическая проницаемость $\epsilon_r = 3,48$, толщина 0,338 мм), ширины наклонных металлических полосок были равны 0,8 мм, угол наклона полосок равен $\alpha = 40^\circ$,

их количество было равно 36. Ниже на рисунках 3-6 приведены результаты расчета Δ и Σ ДН, коэффициента эллиптичности (КЭ) и КСВН облучателя в диапазоне частот от 18 до 20 ГГц. Расчет производился с использованием CST Microwave studio (Transient solver, Hexahedral mesh, 15 cells per wavelength).

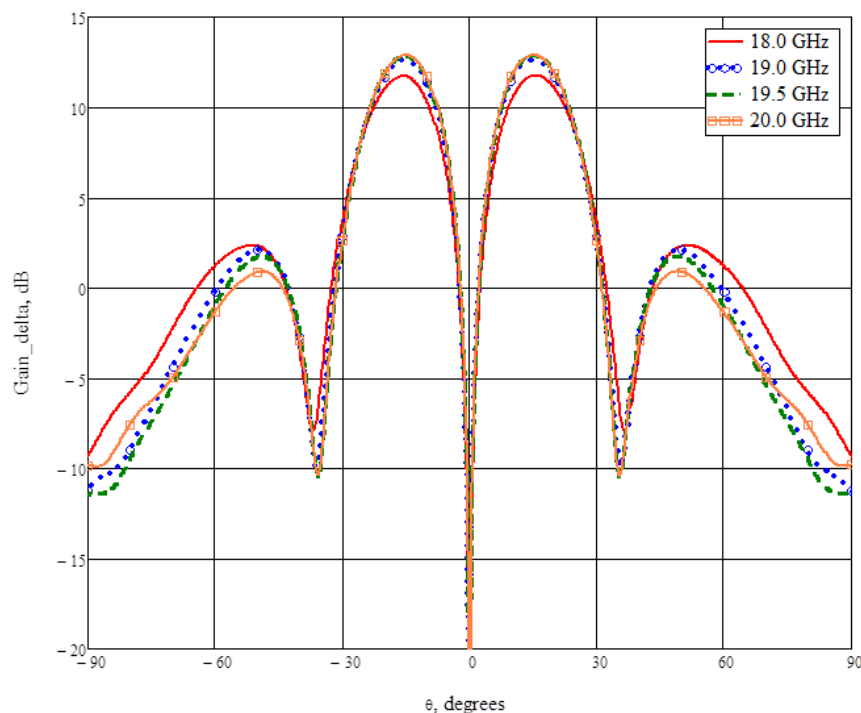


Рис. 3. Расчетный КНД для разностного канала облучателя.

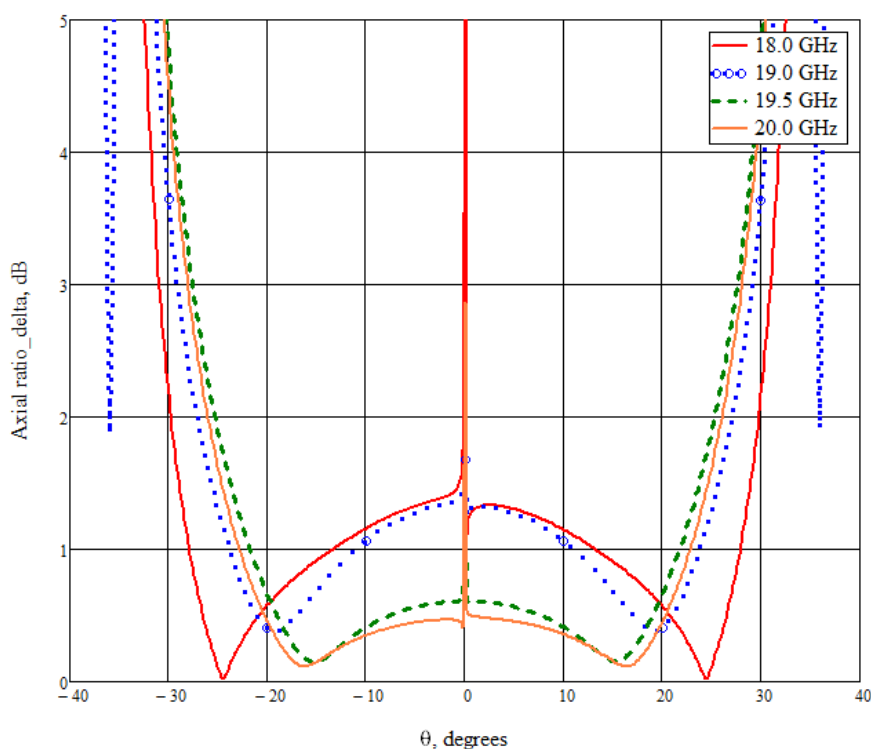


Рис. 4. Расчетный КЭ в дБ для разностного канала облучателя.

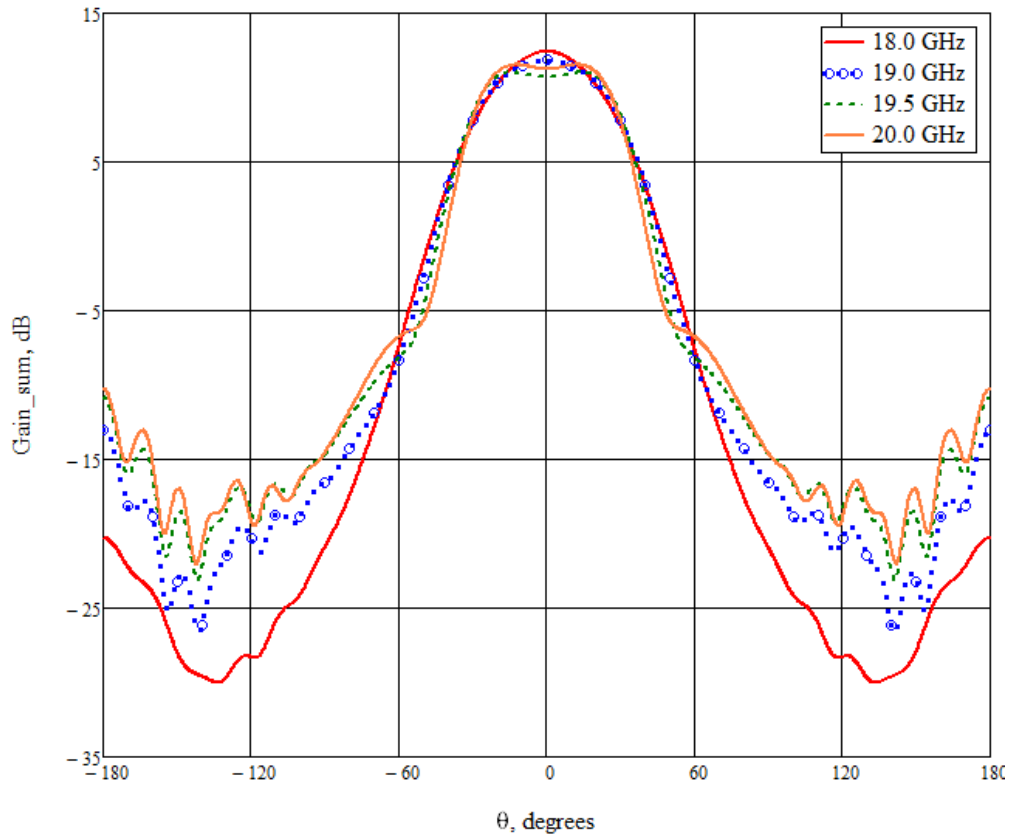


Рис. 5. Расчетный КНД для суммарного канала облучателя.

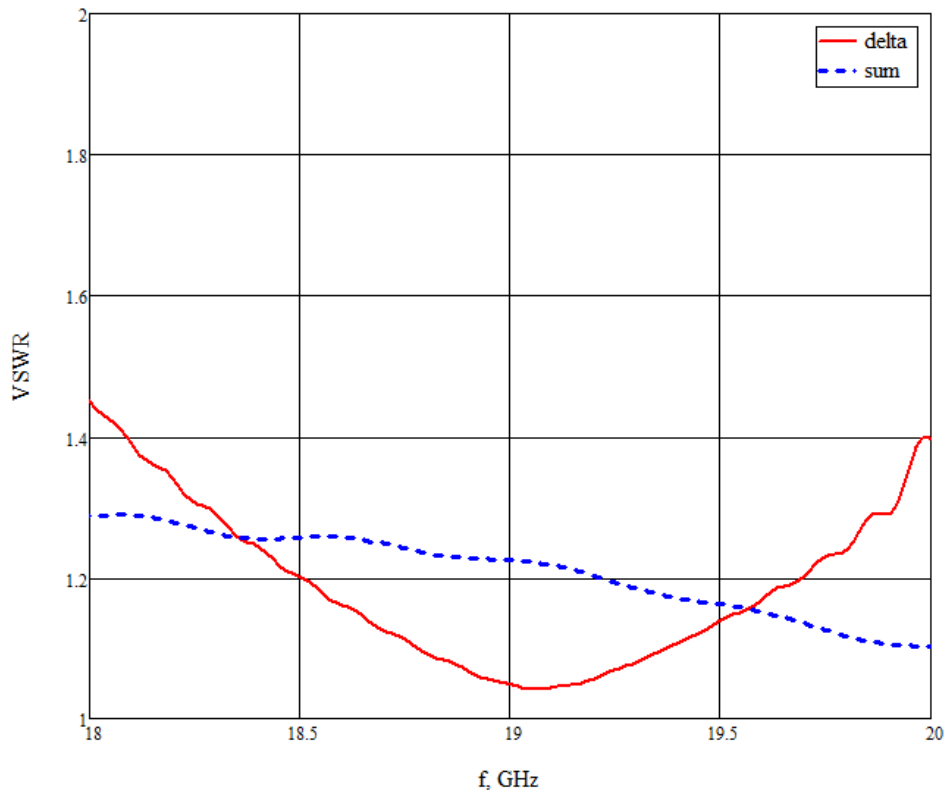


Рис. 6. Расчетный КСВН суммарного и разностного каналов облучателя.

Следует отметить одну особенность полученных ДН, заключающуюся в том, что разностная ДН по угловым размерам уже суммарной. В обычных моноимпульсных облучателях наоборот – разностная ДН шире суммарной. В этом случае используется общепринятое правило, заключающееся в том, что для получения максимальной энергетики по Σ каналу края зеркала облучаются по уровню минус 10 дБ. Если это правило применять в нашем случае, то облучение зеркала по разностному каналу будет происходить не только по основному лепестку, но и по боковым, что недопустимо как с точки зрения получения максимального коэффициента усиления (КУ), так и КЭ. По этой причине были проведены расчеты электрических характеристик облучателя в составе параболического зеркала диаметром $D = 500$ мм с различными значениями фокусного расстояния (вторичные ДН). Расчет производился с использованием CST Microwave studio (Integral solver, Surface mesh, 5 cells per wavelength); источниками излучения в зеркальной системе служили импортированные ДН исследуемого облучателя (farfield source). Результаты расчетов сведены в таблицу 1. Из таблицы следует, что наиболее оптимальные электрические характеристики получаются при соотношении фокусного расстояния к диаметру зеркала (F/D), равном 0,9-1,0.

Дополнительно на рисунках 7-9 приведены результаты расчетов вторичных ДН и КЭ в диапазоне частот 18-20 ГГц для зеркала $D = 500$ мм с $F = 450$ мм ($F/D = 0,9$).

Из полученных результатов следует, что рассмотренный выше облучатель в составе параболического зеркала может обеспечить высокие электрические характеристики в полосе частот порядка 10% при КЭ по разностному каналу не хуже 1,65 дБ, а в полосе частот порядка 5% – не хуже 1,15 дБ. Расчетный КНД по разностному каналу меньше расчетного КНД по суммарному каналу на $\approx 6,5$ дБ.

Таблица 1. Результаты расчетов вторичных ДН.

f, ГГц		18,0	19,0	19,5	20,0
F/D 0,7	КУ Δ канала, дБ	29,2	30,0	30,3	30,5
	КУ Σ канала, дБ	38,3	38,9	38,9	38,8
	КЭ Δ канала, дБ	3,0	3,0	3,0	3,0
F/D 0,8	КУ Δ канала, дБ	30,5	31,2	31,6	31,8
	КУ Σ канала, дБ	38,3	38,9	39,1	39,2
	КЭ Δ канала, дБ	1,3	2,0	2,3	2,3
F/D 0,9	КУ Δ канала, дБ	31,2	32,1	32,4	32,7
	КУ Σ канала, дБ	38,0	38,6	38,9	39,2
	КЭ Δ канала, дБ	0,51	1,2	1,65	1,52
F/D 1,0	КУ Δ канала, дБ	31,4	32,4	32,8	33,0
	КЭ Δ канала, дБ	37,7	38,2	38,5	38,9
	КЭ Δ канала, дБ	0,45	0,85	1,2	1,2

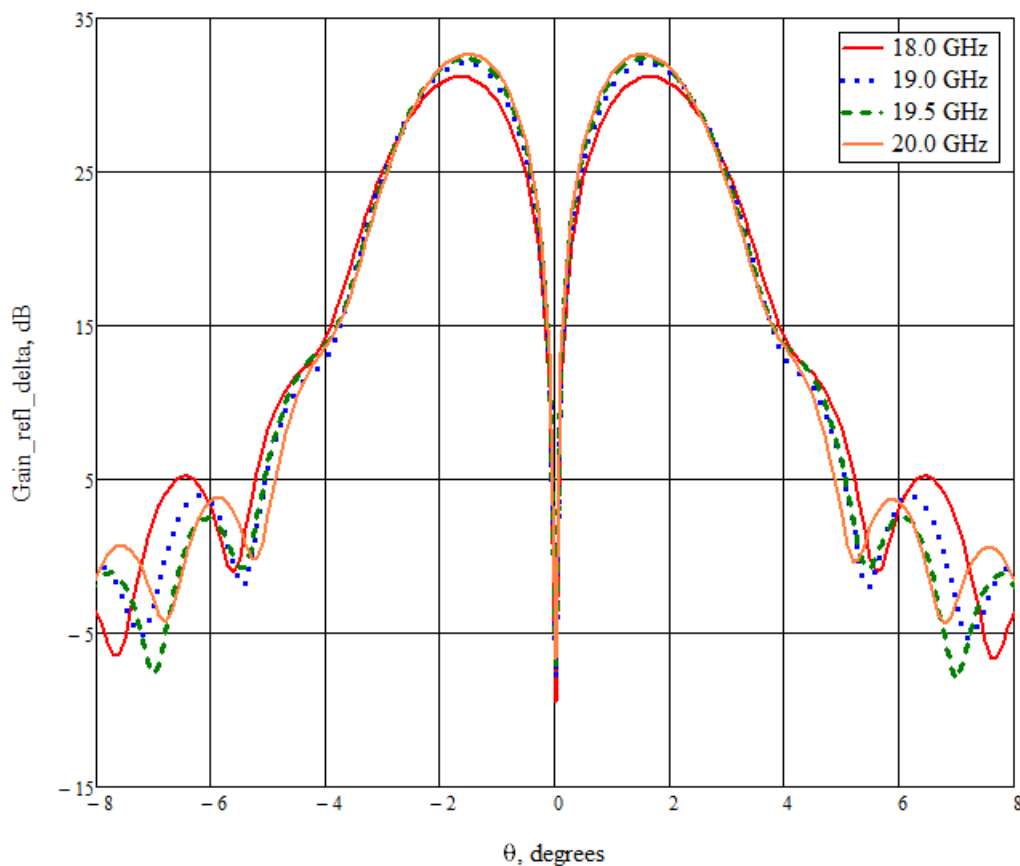


Рис. 7. Расчетный КНД разностного канала однозеркальной антенны.

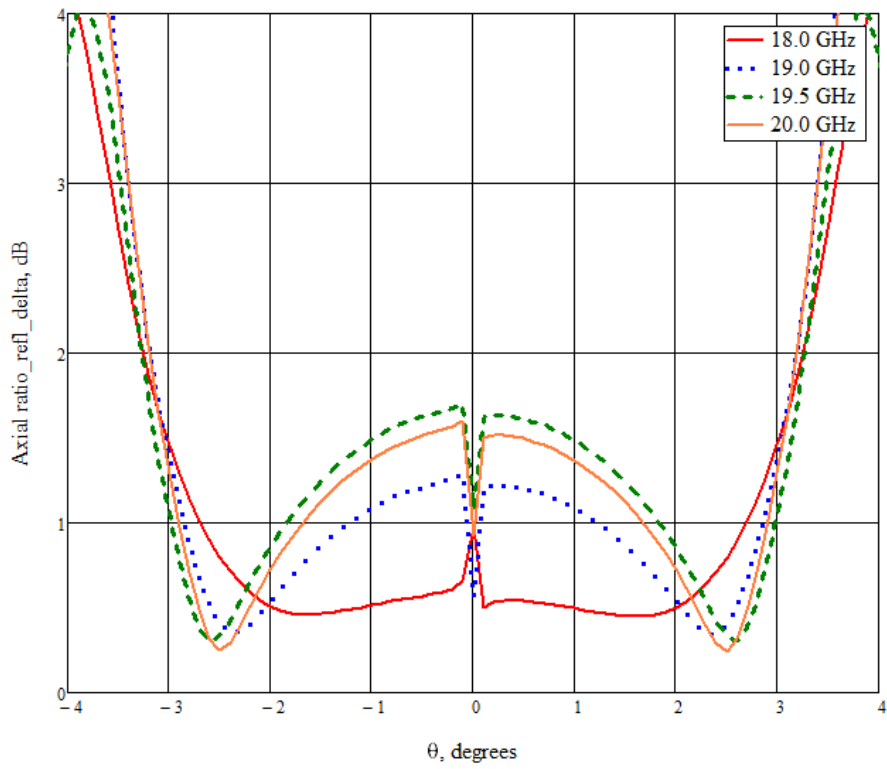


Рис. 8. Расчетный КЭ в дБ разностного канала однозеркальной антенны.

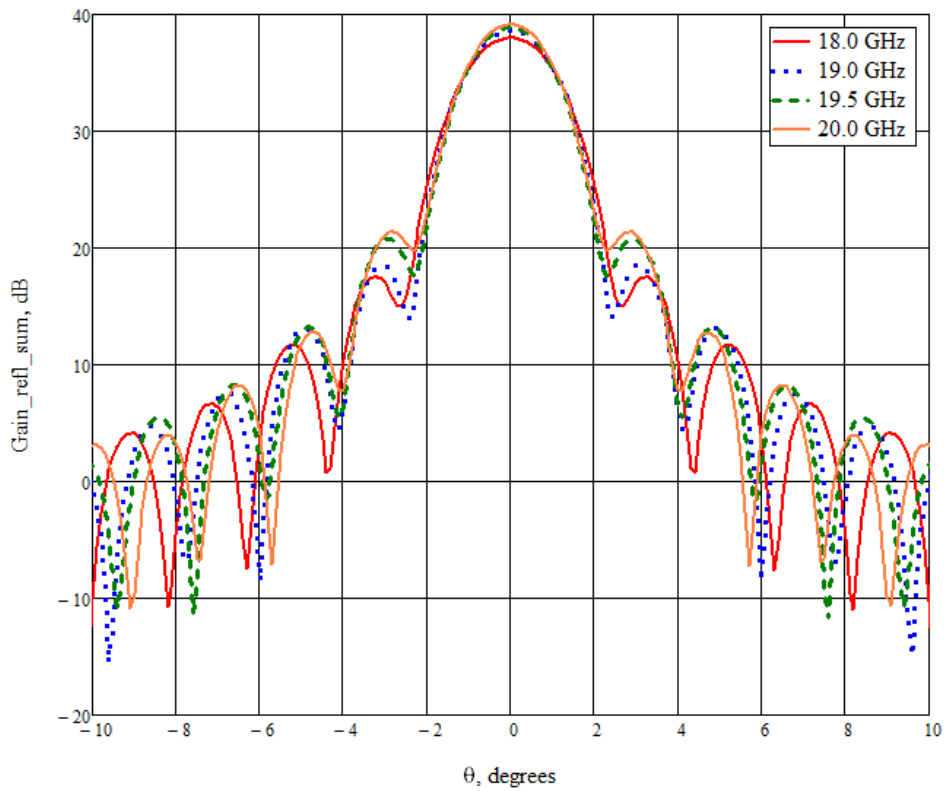


Рис. 9. Расчетный КНД суммарного канала однозеркальной антенны.

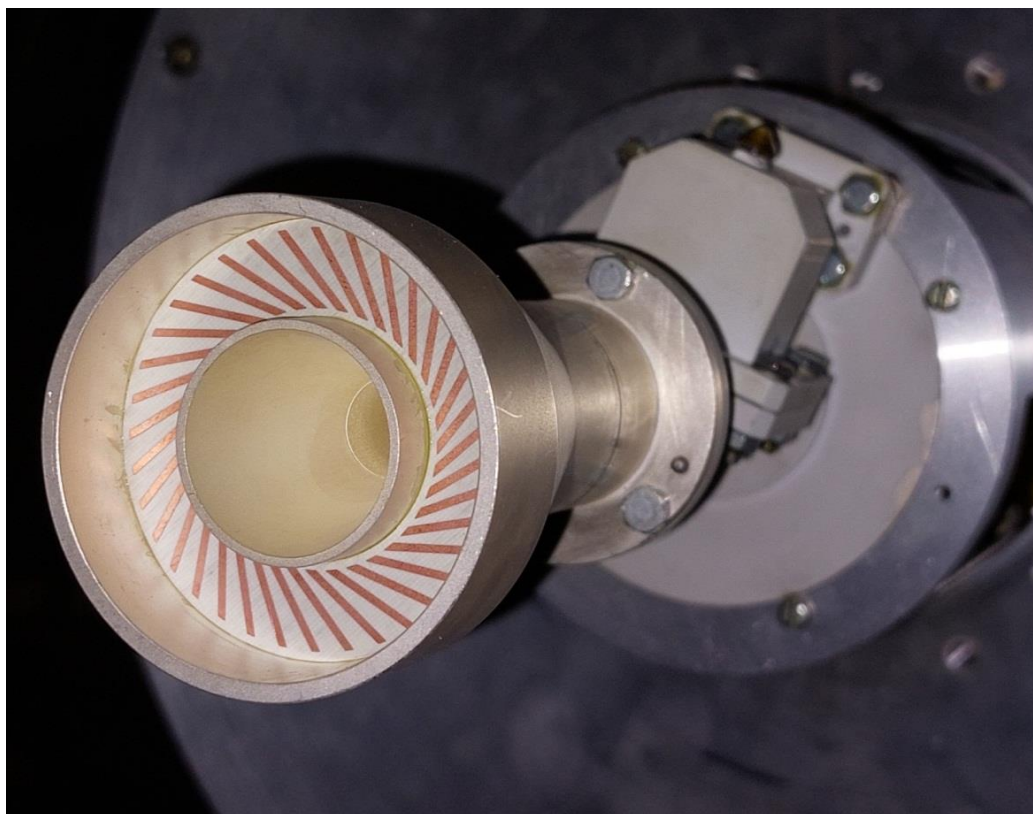


Рис. 10. Фотография макета облучателя.

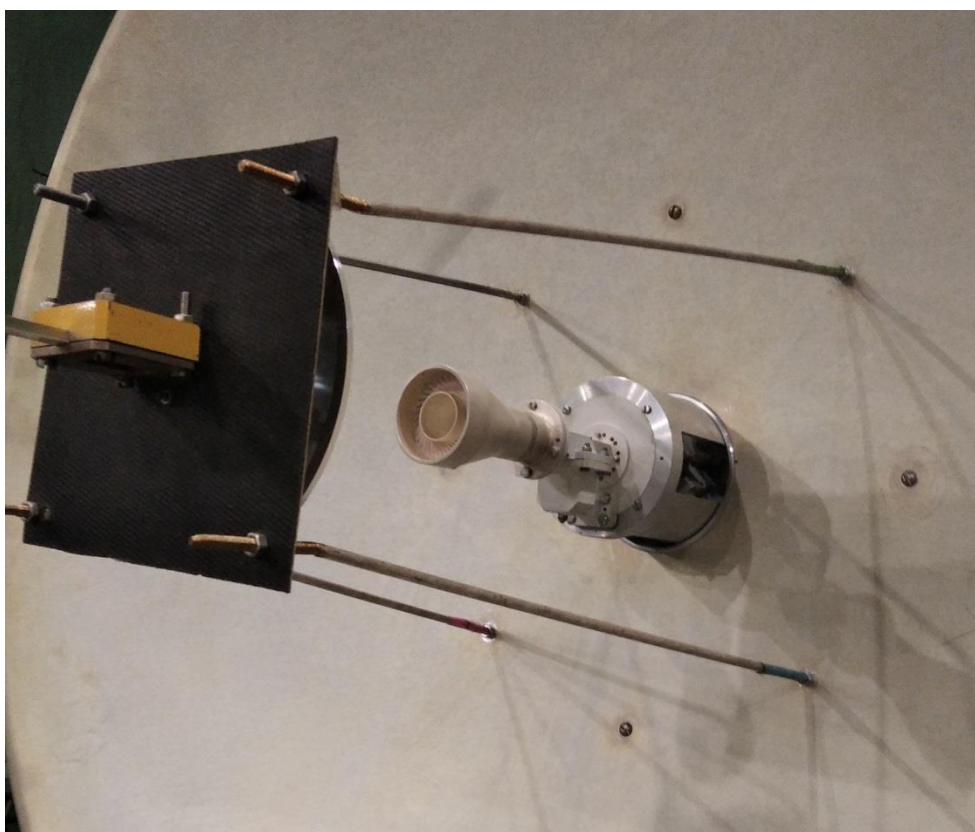


Рис. 11. Фотография макета облучателя, установленного в макет двузеркальной антенны.

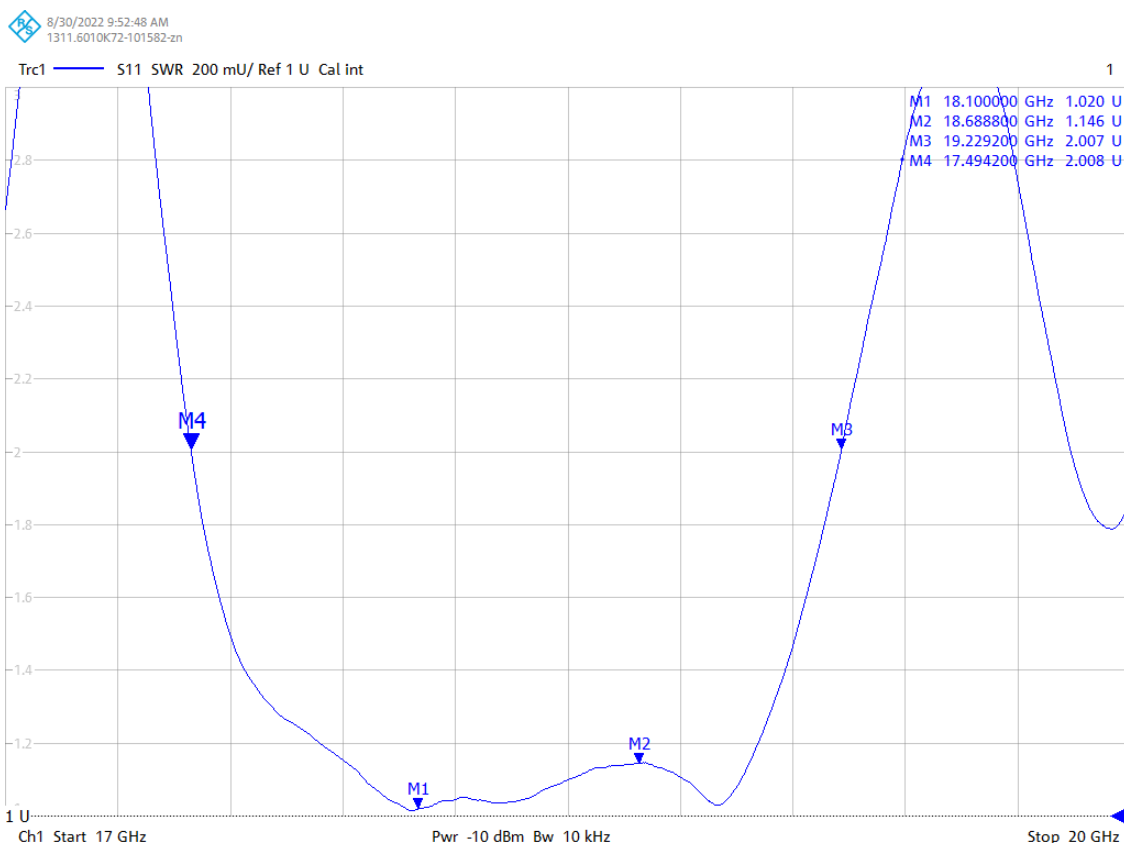


Рис. 12. Измеренный КСВН разностного канала макета облучателя.

Для рассчитанной конструкции моноимпульсного облучателя круговой поляризации был изготовлен макет, фото которого показано на рисунке 10. Далее макет облучателя был установлен в макет двузеркальной антенны, как показано на рисунке 11.

Для макета облучателя был измерен КСВН по разностному каналу, показанный на рисунке 12. В таблице 2 приведен измеренный КЭ по мощности в диапазоне частот по разностному каналу в макете облучателя (здесь подразумевается, что КЭ есть отношение малой оси эллипса поляризации к большой оси).

Таблица 2. Измеренный КЭ макета облучателя по разностному каналу.

Частота, ГГц	17,5	18,1	18,5	19,0	19,5	20,0	20,5	21,0
КЭ по мощности	0,65	0,80	0,88	0,85	0,90	0,83	0,80	0,50

Результаты измерений вторичной ДН при установке макета облучателя в двузеркальную антенну показали глубину нуля разностной ДН \approx минус 30 дБ. Измеренный УБЛ по разностной ДН составил минус 16 дБ.

Заключение

Рассмотрен оригинальный малогабаритный моноимпульсный облучатель на круговой поляризации, в разностном канале которого используется ТЕМ волна коаксиального волновода с преобразователем поляризации. Преобразователь поляризации, установленный на скачке сечения коаксиального волновода, вблизи от раскрытия облучателя, представляет собой кольцеобразный диэлектрический диск, на внешнюю сторону которого нанесены наклонные металлические полосы. При возбуждении преобразователя поляризации волной ТЕМ электрические токи на металлических полосках содержат радиальную и азимутальную составляющие, поэтому возбуждают в коаксиальном волноводе комбинацию волн ТЕМ и Н01, которые, распространяясь до раскрытия облучателя, приобретают квадратурную разность фаз и, в итоге, излучаются с формированием разностной ДН на круговой поляризации. В результате обеспечивается круговая поляризация с КЭ по мощности не менее 0,7. Наличие высокого коэффициента эллиптичности означает, что в разностном канале будет обеспечена поляризационная развязка, благодаря чему система автосопровождения сможет работать при поляризационном уплотнении, обеспечивая автосопровождение по выбранному сигналу одной круговой поляризации.

Результаты расчетов показали, что в таком облучателе можно реализовать круговую поляризацию по разностному каналу в достаточно широкой полосе частот (\approx 10%). При этом конструкция моноимпульсного облучателя получается простой и компактной. При использовании такого облучателя в зеркальных антеннах параметр F/D следует выбирать равным \approx 0,9.

Результаты макетирования моноимпульсного облучателя круговой поляризации подтвердили заложенные параметры.

Литература

1. Hawkins G., Edwards D., McGeehan J. Tracking systems for satellite communications. // IEE Proceedings. – Part F. – 1988 – Vol.135. – No.5. – pp.393-407.
2. Choung Y.H., Goudey K.R. and Bryans L.G. Theory and design of a KU-band TE_{21} -mode coupler. // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. – 1982. – Vol.30. – No.11. – pp.1862-1866.
3. Воробьев Н.Ю., Габриэльян Д.Д. и др. Анализ влияния параметров двухканальной моноимпульсной системы на основе зеркальной антенны с одним облучателем на ошибки измерения угловых координат. // Журнал радиоэлектроники. – 2013. – №3. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/mar13/3/text.pdf>
4. Armaki S.H.M, Kashani F.H., Mohassel J.R. and Fallah M. A high performance mode coupler for tracking feed antennas. // Journal of Telecommunications. – 2011. – Vol.7. – No.2. – pp.19-22.
5. Cook J.S., Lowell R. The Autotrack System. // The Bell System Technical Journal. – July 1963. – pp.1283-1307.
6. Внотченко С.Л., Конев В.Г., Лаврецкий Е.И., Чернышов В.С. Следящая двухканальная моноимпульсная антенна с волной E_{01} . // Журнал радиоэлектроники. – 2021. – №5. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.5.2>
7. Патент №2819745С1 Российская Федерация, МПК H01Q 13/02, H01Q 13/06. Моноимпульсный облучатель круговой поляризации: №2023131606: заявл. 28.11.2023; опубл. 23.05.2024 / Лаврецкий Е.И., Прусов Е.М., Чернышов В.С.; заявитель АО «НИИ ТП» – 14 с.

Для цитирования:

Лаврецкий Е.И., Прусов Е.М., Чернышов В.С. Компактный моноимпульсный облучатель круговой поляризации с разностным каналом на одном виде круговой поляризации // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 4. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.4.5>