

УДК 621.396.67

АНТЕННЫ САНТИМЕТРОВЫХ И МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН

Н.М. НАУМОВИЧ, В.В. МУРАВЬЕВ, О.А. ЮРЦЕВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 19 ноября 2003

Представлены результаты исследований и разработок антенн сантиметровых и миллиметровых волн, выполненные в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники.

Ключевые слова: антенна, миллиметровые волны, сканирование, фидерные устройства, диаграмма направленности., облучатель.

Введение

Антенны современных радиотехнических информационных комплексов; как наиболее сложная и дорогостоящая их часть, в значительной степени определяют эффективность радиотехнической системы в целом. Совершенствование радиотехнических систем и расширение областей их применения возможно при соответствующем совершенствовании антенн.

До недавнего времени антенны рассматривались на уровне элементов. Возрастающие требования к антеннам выводят их на системный уровень. Это определило в последнее время рассмотрение антенн на системном уровне как антенных систем.

Одной из наиболее важных задач современной радиотехники является проектирование антенных систем, обладающих определенными, заранее заданными параметрами.

Требования к современным антенным системам весьма многообразны.

Основные требования, определяющие работу антенной системы в составе радиотехнического комплекса, предъявляются в первую очередь к ее диаграмме направленности. Они могут быть самыми различными в зависимости от того, к каким параметрам диаграммы они предъявляются:

- к форме ее основного лепестка (косекансная диаграмма, секторная, игольчатая и др.);
- к уровню боковых лепестков или коэффициенту направленного действия;
- к пределам изменения ширины главного лепестка диаграммы направленности;
- к необходимым скорости и углам сканирования в основных плоскостях;
- к крутизне скатов разностной диаграммы;
- к полосе рабочих частот и т. д.

Реализацию требований к диаграмме направленности проводят методами теории синтеза антенн с определением необходимого амплитудно-фазового распределения по раскрытию антенны. Конструктивное же обеспечение амплитудно-фазового распределения является неоднозначным. На этапе проектирования антенных систем в качестве регламентирующих ограничений выступают следующие:

- массогабаритные характеристики и условия размещения на объекте установки;
- характер и степень эксплуатационных воздействий;

- мощность, потребляемая элементами привода и управления;
- стоимостные характеристики и др.

Большое значение при выборе окончательного варианта построения антенной системы имеет технологический уровень производства, в том числе и технологические традиции, поскольку именно эти показатели характеризуют готовность производства к освоению новых типов антенн и, в конечном итоге, их качество, реализуемое в условиях конкретного производства.

Решение вопроса о применимости того или иного типа антенной системы во вновь разрабатываемых радиотехнических комплексах основано на результатах комплексного анализа не только показателей назначения, но и конструкторско-технологических показателей. Необходимо учитывать технологическую проблематику разрабатываемых антенных систем применительно к их конкретным типам и возможности производства.

Усиленное развитие радиоэлектронных систем миллиметровых волн, наблюдаемое в последние годы, в значительной степени вытекает из одного из основных свойств антенны в этом частотном диапазоне. Антенны со скромными физическими размерами в миллиметровом диапазоне могут обеспечить высокую степень пространственного разрешения. В целом миллиметровые волны занимают уникальное положение в электромагнитном спектре излучения. Миллиметровое излучение обладает сравнимой с излучением СВЧ проникающей способностью, что определяет его эффективное использование в различных радиоэлектронных комплексах. С другой стороны, волны миллиметровой длины излучения достаточно малы, поэтому соответствующие системы и приборы могут быть основаны на квазиоптических принципах функционирования.

Многообразие возможных вариантов радиоэлектронных комплексов сантиметровых и миллиметровых волн при их интенсивном освоении выдвигает ряд разноплановых задач реализации антенных систем. Повышение информационности каналов комплексов накладывает ряд дополнительных условий и требований на их антенные системы.

Проводимые в БГУИР работы по реализации ряда перспективных радиолокационных и телекоммуникационных систем указанных диапазонов [1–2] потребовали выполнения цикла исследований по реализации конструкций ряда антенн [3–8, 10–13]. Среди наиболее значимых реализованных конструкций антенн для конкретных радиолокационных и телекоммуникационных систем можно отметить:

1. Рупорные антенны, включая рупоры с согласующими элементами.
2. Однозеркальные антенны с линейной и круговой поляризацией и игольчатой диаграммой направленности, включая однозеркальные антенны диаметром 1,5 и 1,8 м для приемных систем спутникового телевидения.
3. Малогабаритные двухзеркальные антенны ММВ с диэлектрическим гибридномодовым облучателем.
4. Двухзеркальные антенны ММВ для моноимпульсных радаров с многомодовым облучателем.
5. Микрополосковые синфазные антенные решетки с однослойной платой излучателей и увеличенным межэлементным расстоянием.
6. Двухзеркальные антенны ММВ с коническим сканированием.
7. Скоростной сканер миллиметрового диапазона для обзора полусферы.
8. Антенны с изотропной диаграммой направленности в горизонтальной плоскости.
9. Двухходовые с развязанными входами антенны для применения в подповерхностной радиолокации для обнаружения объектов с линейными и нелинейными свойствами.
10. Оригинальные узлы фидерного тракта ММВ.

Некоторые из этих антенн представлены на рис. 1. Остановимся на них более подробно.

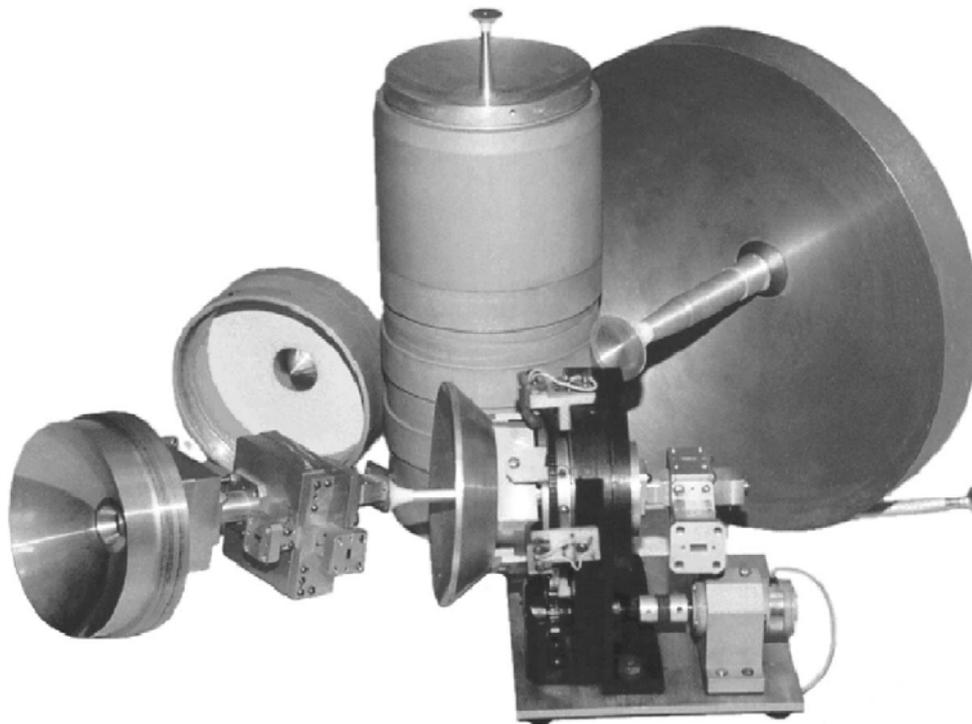


Рис. 1. Внешний вид некоторых из разработанных антенн

1. Остронаправленные антенны

В качестве облучателей зеркальных антенных систем миллиметровых волн используются рупоры, открытые концы волноводов, диэлектрические, стержневые, спиральные, щелевые излучатели и др. Выбор того или иного типа излучателей определяется рабочим диапазоном частот, требованиями в форме диаграммы направленности, излучаемой мощности, поляризационными характеристиками и шириной полосы рабочих частот. Для обеспечения требуемых характеристик антенн проведены анализ и исследования разнообразных согласующих элементов рупорных антенн. Это позволило оптимизировать конструкции в процессе разработки.

1.1. Однозеркальные антенны с линейной и круговой поляризацией и игольчатой диаграммой направленности

Разработан ряд зеркальных антенн с полосой пропускания по частоте 10–40 %, коэффициентом усиления 30–40 дБ и средней частотой в диапазоне 3–90 ГГц. Реализованы конструкции с различными размерами зеркал в зависимости от требуемых характеристик.

В результате проведенных исследований и опытно-конструкторских работ разработан ряд антенных систем с диаметрами зеркал от 300 мм до 1800 мм и опорно-поворотными устройствами напольного и настенного вариантов [3].

Исследования характеристик зеркал диаметром 900, 1500, 1800 мм, изготовленных по различным технологиям, показали предпочтительность технологий ротационной обкатки и штамповки взрывом. Наиболее приемлемыми материалами для зеркал являются мягкие алюминиевые сплавы типа АМЦМ или А7, обеспечивающие хорошую пластическую деформацию и сохранение профиля в рабочем диапазоне температур при долговременной стабильности.

Проведены разработка, подготовка производства и осуществлен выпуск 2000 антенных систем спутникового телевидения диаметром 1500 и 1800 мм (частотный диапазон 9,7–12,5 ГГц).

1.2. Малогабаритные двухзеркальные антенны ММВ с диэлектрическим гибридномодовым облучателем

Наиболее эффективными остронаправленными антеннами до настоящего времени остаются двухзеркальные антенны. Одной из сложных задач, решенных в БГУИР, является реализация малогабаритной двухзеркальной антенны, при диаметре апертуры, меньшем 15λ (λ — длина волны). Классическая схема двухзеркальной антенны не позволила обеспечить требуемые значения параметров. Анализ схем построения антенны показал, что существенное улучшение характеристик может быть достигнуто за счет использования гибридномодовых облучателей. Термин "гибридномодовый облучатель" означает, что в облучателе возбуждается поле, характеризующееся одновременным наличием составляющих электрического и магнитного полей, направление которых совпадает с направлением распространения. Создавая такие поля, можно получать диаграмму направленности с круговой симметрией и низким уровнем кроссполяризации.

Анализ возможных вариантов облучателей показывает, что для малогабаритной зеркальной антенны наиболее приемлем вариант гибридномодового облучателя с диэлектрическим конусом, помещенным в пространство между облучателем и вспомогательным зеркалом. Другие типы облучателей не обеспечивают такого сочетания низкого уровня кроссполяризации, узкой ширины луча, широкой полосы рабочих частот и короткой длины. Например, гофрированный рупор (другой, наиболее распространенный вариант гибридномодового облучателя) должен иметь диаметр апертуры 7λ и размещаться на расстоянии примерно 30λ от вспомогательного зеркала для того, чтобы вспомогательное зеркало диаметром $5,7 \lambda$ находилось в зоне дальнего поля. Такое соотношение является неприемлемым, когда диаметр основного зеркала меньше 15λ .

Реализация неклассической антенной системы потребовала поиска оригинальных решений. В результате проведенных исследований, было найдено оригинальное решение управления характеристиками излучения путем профилирования поверхности диэлектрического конуса [4–5]. Введение диэлектрического конуса между раскрытием облучателя и вспомогательным зеркалом приводит к преломлению лучей на границе раздела диэлектрик–воздух. То есть в систему с двумя отражающими поверхностями основного и вспомогательного зеркал (две степени свободы) введена дополнительная преломляющая поверхность (аналогично линзе) — третья степень свободы, которую было предложено использовать. Разработан метод расчета профиля диэлектрического конуса, основанный на применении метода геометрической оптики [6–7]. В итоге двухзеркальная антенна с диэлектрическим гибридномодовым облучателем приведена к виду, схематически представленному на рис. 2.

Антенна с применением диэлектрического гибридномодового облучателя обладает рядом преимуществ [6–7]:

- диэлектрический конус позволяет применять для облучения вспомогательного зеркала круглый волновод или простой конический рупор с основной волной H_{11} ;

- снижена мощность облучателя, перехватываемая вспомогательным зеркалом;

- фокусирующие свойства диэлектрика позволяют применить вспомогательное зеркало меньших размеров, чем в системах с открытым пространством;

- поля, образующиеся в диэлектрическом конусе, подобны полям, образующимся в гофрированном рупоре, что ведет к снижению кроссполяризации;

- вспомогательное зеркало крепится на основании диэлектрического конуса, что упрощает конструкцию антенны, исключая элементы крепления вспомогательного зеркала и упрощая довольно сложную задачу правильной юстировки облучателя и вспомогательного зеркала;

- исключение элементов крепления вспомогательного зеркала уменьшает обратные отражения и тем самым улучшает согласование облучателя с антенной системой.

Зеркальные антенны с диэлектрическим гибридномодовым облучателем просты в изготовлении и настройке, обеспечивают хорошую воспроизводимость параметров, что очень важно для антенн миллиметрового диапазона [8]. Характеристики некоторых из разработанных

антенн приведены в табл. 1. Разработанная методика расчета поверхности диэлектрических облучателей эффективна при проектировании антенных систем в частотных диапазонах от 3,6 до 145 ГГц и успешно используется разработчиками [9].

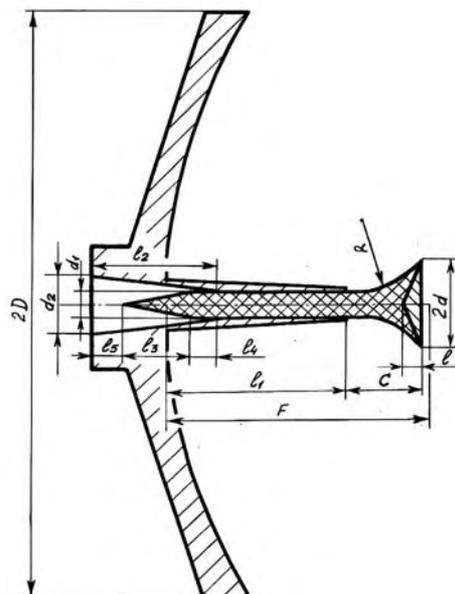


Рис.2. Двухзеркальная антенна с диэлектрическим гибридномодовым облучателем

Таблица 1. Характеристики двухзеркальных антенн с диэлектрическим гибридномодовым облучателем

| | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Диаметр основного зеркала, мм | 450 | 250 | 150 | 100 |
| Длина держателя вспомогательного зеркала, мм | 250 | 120 | 80 | 50 |
| Коэффициент усиления на 36 ГГц, дБ | >40 | >36 | >31 | >29 |
| Ширина диаграммы направленности, град | 1,5 | 2,5 | 3,5 | 5,5 |
| Уровень первого бокового лепестка, дБ | <20 | <21 | <21 | <23 |
| Уровень кроссполяризации, дБ | <-30 | <-30 | <-30 | <-30 |
| Диапазон рабочих частот, ГГц | 21,0–44,0 | 21,0–44,0 | 21,0–44,0 | 21,0–44,0 |
| Рабочая полоса при КСВ <1,3, ГГц | >2 | >2 | >2 | >2 |

1.3. Двухзеркальные моноимпульсные антенны ММВ с многомодовым облучателем

Разработка моноимпульсных антенн в БГУИР началась с моноимпульсной антенны 3-миллиметрового диапазона, являющейся сложной конструкторско-технологической задачей. Поэтому перед определением окончательной схемы были проведены анализ схем реализации, моделирование и комплекс экспериментальных исследований, подтверждающий результаты этого анализа. Конструкторско-технологический анализ показал, что для частот 94 ГГц наиболее приемлемой является двухзеркальная конструкция антенны, реализованная по схеме Кассегрена. Для компаратора наиболее оптимальной в области коротких миллиметров, как показала практика предыдущих разработок, является многомодовая схема.

Моноимпульсные антенны предназначены для излучения и приема сверхвысокочастотных сигналов при работе в составе радиоэлектронных устройств высокоточной локации, что определяет существенный к ним интерес в перспективных системах. Разработаны антенны с полосой пропускания 1–2 % и средней частотой в диапазонах 36 и 94 ГГц [10].

Технические характеристики одного из образцов:

- Частота, ГГц
- Тип антенны

94 ± 0,35
Кассегрена

| | |
|---|----------|
| - Диаметр апертуры, мм | 300 |
| - Поляризация суммарного порта | линейная |
| - Ширина луча, град | 0,8–1,0 |
| - Уровень бокового лепестка, дБ | –15 |
| - Амплитуда пика суммарной асимметрии, дБ | ±0,5 |
| - Глубина нуля, дБ | 25 |
| - КСВН | <1,5 |
| - Развязка входов, дБ | 25 |

2. Двухзеркальные антенны ММВ с коническим сканированием

Для малогабаритных приемо-передающих систем привлекательно применение конического сканирования как простого способа определения угловых координат.

Коническое сканирование осуществляется вращением луча антенны, максимум диаграммы направленности которой отклонен на некоторый угол от оси вращения. В миллиметровом диапазоне длин волн механическое сканирование может быть применено с большей эффективностью, чем в сантиметровом диапазоне длин волн за счет применения в конструкциях легких зеркальных антенн. При механическом сканировании достигается скорость в тысячи градусов в секунду за счет незначительной массы поворачиваемого зеркала. В двухзеркальных антеннах с диэлектрическим гибридномодовым облучателем, отличающихся простотой конструкции, имеется существенное число степеней свободы, что позволяет реализовать ряд способов сканирования:

- поворотом оси параболоида основного зеркала относительно общей оси антенны и вращением основного зеркала;
- смещением облучателя относительно оси вращения параболоида основного зеркала;
- линейным смещением вспомогательного зеркала и его вращением относительно оси антенны;
- наклоном плоскости вспомогательного зеркала и его вращением относительно общей оси антенной системы.

Из перечисленных способов сканирования, для малогабаритных антенн подкупают своей простотой два последних. Смещение вспомогательного зеркала, имеющего малую массу, позволяет получать меньшие вращающие моменты по сравнению с вращением основного зеркала. На начальном этапе разработки конструкции предпочтение было отдано наклону вспомогательного зеркала. Конструкция содержит в себе датчик угла поворота вспомогательного зеркала для регистрации и обработки принимаемого сигнала. Однако в таком варианте конструкции сканирование вращением наклоненного вспомогательного зеркала приводило к изменению значения КСВН. Такое изменение КСВН вызывало в приемо-передающем модуле паразитную амплитудно-частотную модуляцию, существенно ухудшающую характеристики модуля.

Анализ причин возникновения такой модуляции показал, что она возникает из-за внесения несимметричной неоднородности в диэлектрическом стержне, обусловленной наклоном вспомогательного зеркала. Вращение такой неоднородности в поле несимметричной волны HE_{11} приводит к изменению реакции облучающей системы на неоднородность при изменении ее положения.

Анализ способов сканирования показал, что в ущерб механике, но с выигрышем для электрических параметров антенны предпочтительнее осуществлять сканирование малогабаритной двухзеркальной антенны с диэлектрическим гибридномодовым облучателем поворотом оси основного зеркала [11]. Такой способ сканирования и реализован в разработанной конструкции, приведенной на рис. 2. Основное зеркало монтируется на специальной вращающейся подвеске, в то время как остальная часть антенной конструкции и приемо-передающий тракт остаются неподвижными.

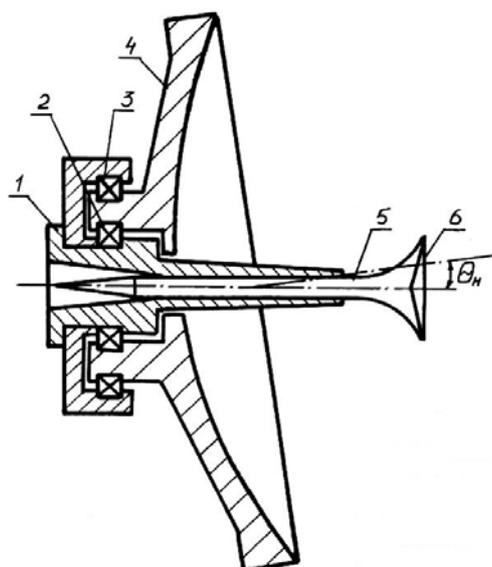


Рис. 3. Конструктивная схема малогабаритной антенны с коническим сканированием: 1 — облучатель–основание; 2, 3 — подшипники; 4 — основное зеркало; 5 — диэлектрический стержень; 6 — вспомогательное зеркало

В табл. 2 приведены характеристики разработанных малогабаритных сканирующих антенн миллиметровых волн с диэлектрическим гибридномодовым облучателем.

Таблица 2. Характеристики двухзеркальных антенн с коническим сканированием

| | | |
|--|----------|----------|
| Диаметр основного зеркала, мм | 100 | 150 |
| Ширина диаграммы направленности, град. | 5,5 | 3,6 |
| Коэффициент усиления на 36ГГц, дБ | 29 | 31 |
| Уровень первого бокового лепестка, дБ | -20 | -20 |
| Диапазон углов сканирования, град. | 15 | 12 |
| Коэффициент использования поверхности | 0,59 | 0,59 |
| Выход антенного фидера | круглый | круглый |
| Поляризация | круговая | круговая |

3. Всенаправленные антенны

Большой интерес, проявляемый к сотовым телекоммуникационным системам миллиметрового диапазона, требует создания совершенных элементов, включая широкополосные всенаправленные антенны.

Для формирования круговой диаграммы направленности в горизонтальной плоскости и обеспечения вертикальной поляризации по отношению этой плоскости наиболее известны биконические антенны, возбуждаемые круглым волноводом на волне E_{01} . Однако такие антенны не технологичны для миллиметровых волн.

Существенно меньшие габариты имеют зеркальные антенны с облучателем в виде конического рупора с волной E_{01} . Проведенный сравнительный анализ таких антенн, позволяет сделать следующие выводы:

всенаправленные зеркальные антенны с дополнительным коническим отражателем имеют существенно меньшие поперечные размеры по сравнению с биконической антенной;

в однозеркальной антенне отражающим элементом является параболический рефлектор, в двухзеркальной антенне Кассегрена — контррефлектор в виде гиперблоида вращения.

Однозеркальная всенаправленная антенна имеет конструктивные преимущества перед двухзеркальной антенной, в которой совмещенный со вспомогательным зеркалом конус — более массивная деталь антенны по сравнению с рефлектором. Поэтому крепление его должно

быть более надежным, чем в однозеркальном варианте. Усиление крепления приводит к необходимости дополнительных элементов в раскрыве, увеличивающих неоднородность круговой диаграммы направленности (провалы до бдБ). Габариты однозеркальной всенаправленной антенны с коническим отражателем меньше, чем аналогичной двухзеркальной.

В двухзеркальной антенне с зеркалом специальной формы в виде тороида с параболической образующей диаметр существенно больше, чем в других вариантах [12].

Технические характеристики одного из образцов:

- | | |
|---|------------------------|
| - Рабочий диапазон частот, ГГц | 30–36. |
| - Азимутальная диаграмма направленности, град | 360 (круговая). |
| - Угломестная диаграмма направленности по уровню –3дБ, град | <10. |
| - Коэффициент усиления, дБ | > 8. |
| - Поляризация | линейная вертикальная. |
| - Коэффициент стоячей волны по напряжению | <2,0. |

Антенна предназначена для излучения и приема сигналов СВЧ в радиотехнической аппаратуре различного назначения, включая использование в качестве антенны для базовых станций LMDS/MMDS.

4. Фидерные устройства

Для реализации радиоэлектронных систем ММДВ часто требуется обеспечение особых требований к фидерным трактам. Это определило цикл исследований по преобразователям волн миллиметрового диапазона, среди которых наиболее интересны:

- преобразователь линейной поляризации в круговую, с совмещением функций антенного переключателя, реализованный на турникетном соединении;
- широкополосный переход ММВ от прямоугольного волновода с волной H_{10} к круглому волноводу с волной E_{01} , обеспечивающий достаточную чистоту волны E_{01} и согласование в широком диапазоне частот (до 20% от центральной частоты) [13];
- компаратор моноимпульсной антенны 3-миллиметрового диапазона с модовым разделением каналов.

Заключение

Рассмотренные антенны проработаны на уровне ОКР и могут быть использованы в аппаратуре различного назначения.

Приведенные результаты показывают возможности специалистов БГУИР по реализации разнообразных антенн и узлов фидерного тракта сантиметровых и миллиметровых волн в соответствии с требованиями, предъявляемыми к конкретным радиоэлектронным системам.

ANTENNAS IN CENTIMETER AND MILLIMETER WAVES

N.M. NAUMOVICH, V.V. MURAVIEV, O.A. YURTSEV

Abstract

The investigation data and R&D achievements in the field of antennas in centimeter and millimeter waves are presented by the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Литература

1. Муравьев В.В., Наумович Н.М. // Радиотехника и электроника. Мн., 2000. Вып.25. С.30 – 39.

2. *Муравьев В.В., Наумович Н.М., Шукевич Т.В.* // *Веснік Сувязі.* 2000. №6(38). С.17-18.
3. *Муравьев В.В., Наумович Н.М., Юрцев О.А.* НТК БГУИР. Минск, 1994, ч.1. С.55-56.
4. *Воробьев Ю.П., Муравьев В.В., Наумович Н.М.* // *Тр. международного симпозиума "Спутниковая связь: реальность и перспектива".* Одесса, 1990. С.А40.1-А40.10.
5. *Муравьев В.В., Наумович Н.М., Воробьев Ю.П., Дедунович М.А.* // *1-й Украинский симпозиум "Физика и техника мм и субмм волн".* Харьков, 1991. С.343-344.
6. *Наумович Н.М., Воробьев Ю.П.* // *Межрегиональная НТК "Сложные антенные системы и их компоненты. Теория, применение, экспериментальные исследования".* Ленинград, 1991. С.71.
7. *Муравьев В.В., Наумович Н.М., Дедунович М.А., Шукевич Т.В.* // *Тр.2-й Крымской конференции "СВЧ-техника и спутниковый прием".* Севастополь, 1992. С. 506-510.
8. *Наумович Н.М., Дорогов А.Ю.* // *Радиотехника и электроника.* Мн., 1999. Вып.23. С.71-74.
9. *Акишин О. Н., Райок М. С., Пасюк С. П., Тихонов А. Е.* // *Электродинам. и техн. СВЧ и КВЧ.* 2000. Т.8, № 1-2. С. 22-25.
10. *Юрцев О.А., Наумович Н.М., Бобков Ю.Ю., Ткаченко А.А.* // *Радиотехника и электроника.* Мн., 2000. Вып.25. С.103 – 108.
11. *Наумович Н.М., Дедунович М.А.* // *35-я межвузовская НТК.* Владивосток, 1992. Т.1, Ч.2. С.18- 20.
12. *Юрцев О.А., Наумович Н.М., Бобков Ю.Ю.* *Изв. Белорус. инж. акад.* 2000. №1(9)/1. С.111-113.
13. *Юрцев О.А., Наумович Н.М., Ткаченко А.А.* *Изв. Белорус. инж. акад.* 2002. №2(14)/2. С.16-17.