

# ГЕНЕРАЦИЯ ДЕКАМЕТРОВЫХ ВОЛН ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ

**В. П. Сивоконь,**

главный научный сотрудник Института космических исследований и распространения радиоволн (ИКИР) ДВО РАН, д.т.н.; vsivokon@mail.ru

**В. И. Сединин,**

заведующий кафедрой Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики, д.т.н.

**А. В. Кубышкин,**

доцент Московского физико-технического института, д.т.н.

**М. Ю. Берсеньев,**

инженер ИКИР ДВО РАН



явлениях, как поляризационные замирания, нарушение принципа взаимности, селективное возбуждение характеристических волн в ионосфере, свойства атмосферных помех. В нашей стране исследованию поляризационных характеристик этого диапазона длин волн посвящены работы [1—3, 8—12]. Результаты выполненных исследований имеют и прикладное значение. Поляризационная селекция позволяет осуществлять локализацию источников электромагнитного излучения [13]. Использование передающих антенн вращающейся поляризации повышает помехоустойчивость декаметрового канала связи [14] и качество КВ радиовещания [15].

В Сибири и на Дальнем Востоке, учитывая малую плотность населения и большие территории, вопрос доступного радиовещания довольно актуален. Средневолновое вещание для отдаленных районов недоступно, да и ведется нерегулярно, что вызвано, по-видимому, большими эксплуатационными расходами. В декаметровом диапазоне большие надежды возлагались на внедрение стандарта DRM, но, к сожалению, они не оправдываются. Недорогое и качественное радиовещание можно организовать с помощью технологий, разработанных в МГУ [15] и базирующихся на применении передающих антенн [12, 16]. Используя полученные в [17—19] результаты, можно по-новому подойти к реализации зонных систем КВ связи [20].

Одной из существенных проблем при реализации подобных проектов является создание антенных устройств с необходимыми поляризационными характеристиками. В статье приводится опыт разработки и изготовления, а также результаты пробной эксплуатации антенн вращающейся поляризации декаметрового диапазона

**Возможные варианты реализации излучателя.** Поле вращающейся поляризации можно получить, используя турникетные антенны с линией задержки. К сожалению, такие антенны при простоте изготовления являются узкополосными и формируют требуемые поляризационные характеристики в узком телесном угле. Для получения этих характеристик можно применить специализированное радиопередающее устройство, формирующее два независимых

**Ключевые слова:** декаметровые волны вращающейся поляризации, устройства генерации.

**Введение.** Поляризация электромагнитной волны в декаметровом диапазоне играет существенную роль в таких

регулируемых по амплитуде и фазе канала, подключаемых к взаимортогональным вибраторам [21].

С экономической точки зрения при проведении НИР подобный подход возможно и обоснован, но проблематичен для практического использования в радиосвязи и радиовещании. Поэтому не случайно в рамках этой же НИР была предпринята попытка реализации антенного устройства вращающейся поляризации на основе линейного диполя, размещенного над полупроводящей подстилающей поверхностью [22]. Располагая вибратор специальным образом относительно подстилающей поверхности, можно получить эллиптическую поляризацию волны в некотором телесном угле. Но поскольку эффект получается за счет азимутального отворота вибратора от главного направления, то энергетически этот способ не эффективен. Более того, при изменении диэлектрических свойств подстилающей поверхности, например при выпадении осадков, поляризационные характеристики излучаемой волны непредсказуемо меняются.

Для генерации волн вращающейся поляризации было решено использовать не применявшиеся ранее в декаметровом диапазоне длин волн плоские спиральные антенны. Как показали расчеты, цилиндрические и конические спирали в этом диапазоне имеют неприемлемые габаритные характеристики. Плоские спирали с небольшими предельно-габаритными размерами в настоящее время используются в не выступающих конструкциях (летательные аппараты), а также в качестве самостоятельных антенн, облучателей зеркальных и линзовых антенн, возбуждателей волноводнорупорных антенн.

Из известных плоских спиральных антенн авторы остановились на архимедовой спирали, поскольку в отличие от логарифмической она имеет фиксированный шаг. При условии, что ее витки выполняются в виде прямолинейных отрезков такой спирали, антенна значительно проще по технологии изготовления.

При определении конструктивных размеров антенны использовали выражения, полученные в [23]. Максимальный радиус спирали определен исходя из приемлемого коэффициента поляризации на самой длинной волне рабочего диапазона. В соответствии с [23] для получения коэффициента поляризации  $p \geq 0,8$  должно выполняться условие:

$$\frac{2\pi a_{\max}}{\lambda_{\max}} = 1,5 \div 3,5,$$

где  $a_{\max}$  — максимальный радиус спирали. Для частоты 6 МГц  $\lambda_{\max} = 50$  м. Тогда

$$a_{\max} = (1,5 \div 3,5) \frac{\lambda_{\max}}{2\pi} = 11,9 \dots 27,9 \text{ м.}$$

При практической реализации необходимо учитывать размеры ровного поля, на котором предстоит изготовить антенну. В нашем случае размеры поля 25×25 м определили возможный максимальный радиус спирали 12,5 м. Минимальный радиус определим исходя из получения осевой диаграммы направленности (ДН). Для этого должно выполняться условие:

$$\frac{2\pi a_{\min}}{\lambda_{\min}} \geq 1, \text{ тогда } a_{\min} \geq \lambda_{\min}/2\pi = 12,5/2\pi = 1,99 \text{ м.}$$

Количество витков спирали найдем, зная ширину спиральных ветвей и зазор между ними, т.е.

$$N = \frac{a_{\max} - a_{\min}}{2S + 2Z},$$

где  $S$  — ширина спиральной ветви (примем ее равной расстоянию между однополярными проводами стандартного четырехпроводного фидера — 400 мм);  $Z$  — зазор между ветвями спирали. Выберем его равным 250 мм, что соответствует линейным размерам изолятора СБ-0120к. Параметры  $S$  и  $Z$  существенно влияют на линейные размеры антенны. Уменьшение  $Z$  или увеличение плотности намотки позволяет снизить внешний диаметр спирали при обеспечении круговой поляризации на заданной длине волны. Однако при этом необходимо учитывать требования к электрической прочности антенны. Для выбранных параметров спирали  $N = 7,7$ . Скорректируем его до целого значения 8.

Для расчета ДН воспользуемся приведенным в [24] выражением:

$$F_{n\theta}(\theta) = F_{n\phi}(\theta) = \frac{\cos(\theta)J_n(ka\sin(\theta))}{ka\sin(\theta)},$$

где  $n$  — номер гармоники или моды (в нашем случае  $n = 1$ );  $a$  — радиус спирали;  $J_n$  — функция Бесселя. ДН симметрична в обеих плоскостях. В отличие от антенн линейной поляризации для антенн вращающейся поляризации ДН в вертикальной плоскости необходимо строить с учетом обеих компонент поля: вертикальной и горизонтальной. Влияние подстилающей поверхности сказывается не только на ДН в вертикальной плоскости, но и на поляризационных характеристиках излучаемого поля. Расчетные зависимости коэффициента поляризации на трех частотах приведены на рис. 1.

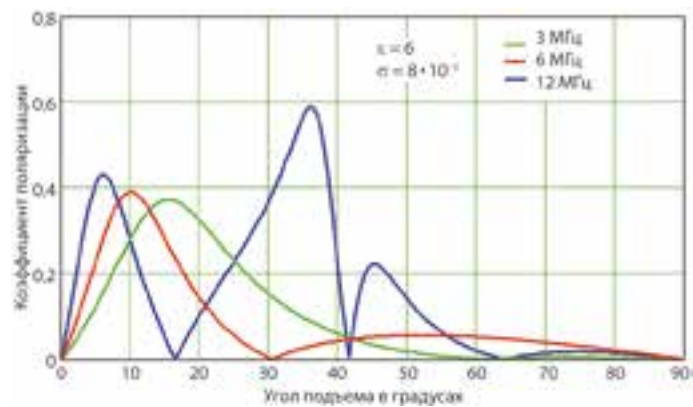


Рис. 1

Для топологии витков спирали был выбран вариант прямолинейных отрезков, поскольку он позволяет проще решить вопрос согласования антенны с фидерной линией. В КВ диапазоне передающие фидеры выполняются, как правило, четырехпроводными. Если положить, что спираль выполняется из прямоугольных отрезков, аналогичных фидерной линии, то это равносильно разворачиванию фидера в перпендикулярной плоскости (рис. 2).

Питающая линия при разворачивании трансформируется таким образом, что волновое сопротивление первоначально определяется в точке 1—1', а затем в 2—2'. При дальнейшем перемещении по спирали оно остается постоянным. При выборе расстояния между точками 1—1' учитываются требования к минимальному радиусу спирали, исходя из максимально используемой частоты и согласования антенны. Расстояние между разнополярными витками спирали после точек 2—2' составляет 0,25 м, что соответствует размерам изолятора СБ-0120к. По диагонали спирали между разнополярными витками устанавливаются изоляторы АС-750-200, соответствующие расчетным линейным размерам спирали и нагрузочным характеристикам конструкции.

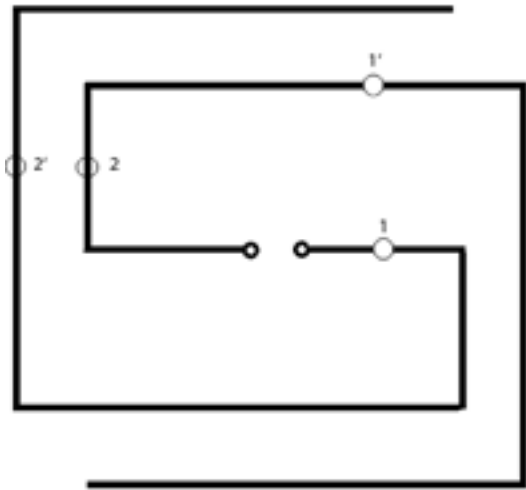


Рис. 2

Расчеты показали, что при таких параметрах перехода от четырехпроводного фидера к антенне коэффициент бегущей волны на средней частоте составляет 0,8.

Выбор направления навивки спирали зависит от ориентации трассы. Исследования на трассе Магадан — Петропавловск-Камчатский [18] показали, что в условиях средне возмущенного магнитного поля Земли для трасс с квазипродольным распространением на восходящем участке траектории минимальные замирания и, следовательно, максимальная помехоустойчивость соответствуют максимальному коэффициенту поляризации излучаемой волны [17]. При этом меньшие замирания наблюдаются в случае совпадения направления вращения вектора электрического поля излучаемой волны с обыкновенной волной. С учетом вышеизложенного антенное устройство принимает вид, показанный на рис. 3.

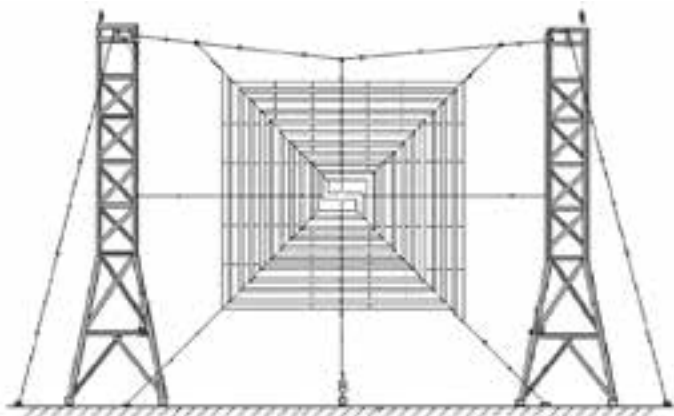


Рис. 3

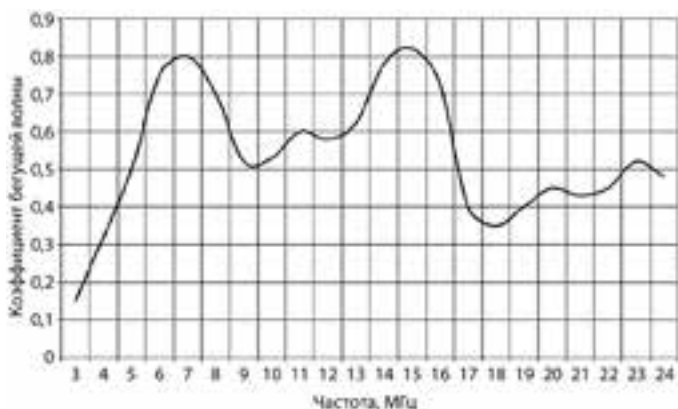


Рис. 4

Результаты измерений степени согласования антенны с фидером, проведенные с помощью передатчика «ВЯЗ-М2» и прибора КИНА-2, приведены на рис. 4. Уменьшение коэффициента бегущей волны на низких частотах вероятнее всего объясняется меньшим, по сравнению с расчетным для этих частот, радиусом спирали.

В 2004—2005 гг. такое антенное устройство применялось в системе действующей связи флота. Для нее характерна динамичность: связь с кораблями осуществляется на различных расстояниях и направлениях. Проведено около тысячи сеансов связи; данные представлены на рис. 5—7. На рис. 5 показано удаление кораблей при проведении сеансов связи. Видно, что успешная связь осуществлялась в пределах от нескольких десятков до тысяч километров. Поскольку корабли постоянно перемещаются, то азимутальное распределение выглядит так, как показано на рис. 6. Из рисунка следует, что антенное устройство обеспечивает связь в широком диапазоне азимутальных углов, при этом

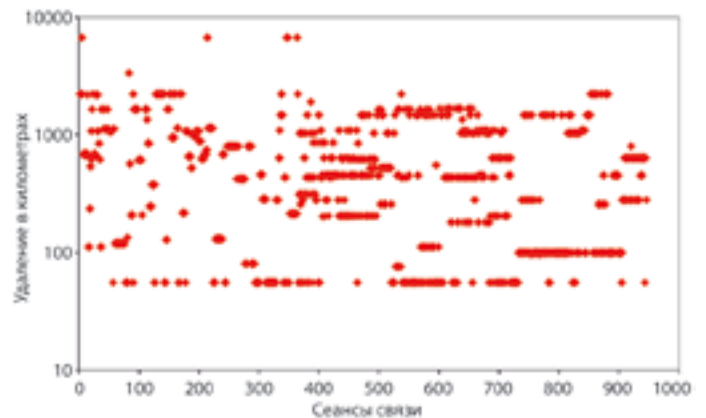


Рис. 5

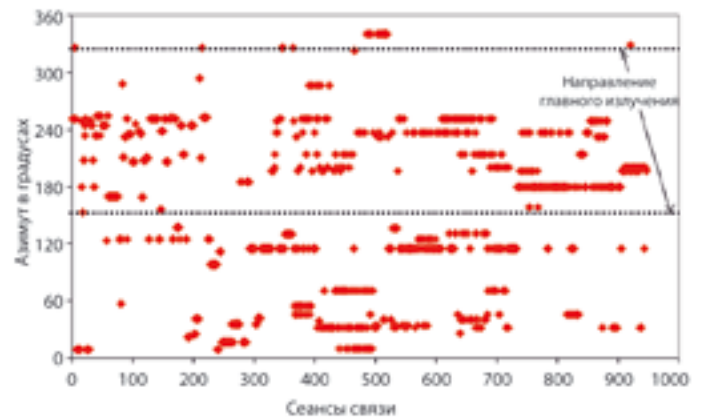


Рис. 6

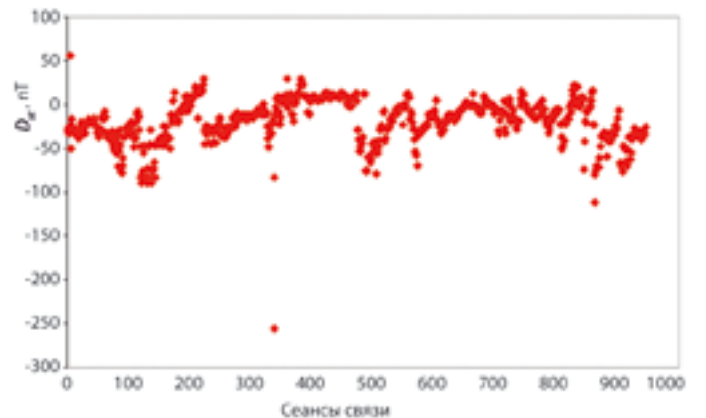


Рис. 7



присутствуют практически все типы распространения — от квазипродольного до квазипоперечного.

Эффективность коротковолновой связи в целом и с использованием волн вращающейся поляризации, в частности, зависит от состояния магнитного поля Земли. В [25] показано, что наиболее адекватную оценку этой зависимости дает анализ вариаций магнитного поля Земли  $D_{st}$ . Для такого анализа поведения  $D_{st}$  используются данные, полученные с сайта университета г. Киото (Япония). Из рис. 7 видно, что сеансы связи проходили в условиях среднего возмущения магнитного поля Земли, хотя в отдельных случаях возмущение соответствовало магнитной буре.

Использование антенного устройства в действующих сетях связи флота показало хорошие технические и эксплуатационные характеристики. В условиях неблагоприятных погодных условий Камчатки, при большом количестве осадков, выпавших зимой 2004—2005 гг., и больших ветровых нагрузках, пришедших на этот же период, внешних повреждений полотна антенны не произошло.

**Заключение.** Применение антенн вращающейся поляризации декаметрового диапазона в различных условиях геогеофизической обстановки на трассах различной протяженности и ориентации показало их достаточно высокую эффективность, а в ряде случаев и уникальные возможности, например при обеспечении спасательных работ в бухте Березовой, Камчатка.

В настоящее время все более актуальным становится обеспечение связи при перевозках Северным морским путем и проведении работ за полярным кругом, где геофизическая обстановка весьма динамична. Как показала на практике связь с кораблями на разных широтах и в различных геофизических условиях, волны вращающейся поляризации могут существенно повысить надежность декаметровой связи, в том числе и в приполярных областях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Афраймович Э.Л.** Интерференционные методы зондирования ионосферы.— М.: Наука, 1983.— 197 с.
2. **Афраймович Э.Л., Кобзарь В.А., Паламарчук К.С., Чернухов В.В.** Определение параметров поляризационного эллипса многомодового сигнала // Изв. ВУЗов; Сер. радиофизика.— 1999.— т. XLII.— № 4.— С. 324—329.
3. **Березин Ю.В., Гусев В.Д.** Выделение одной магнитоионной компоненты с эллиптической поляризацией при приеме отраженных от ионосферы радиоволн // Геомагнетизм и аэронавигация.— 1970.— № 1.— С. 59—66.
4. **Березин Ю.В.** Флуктуации поляризации радиоволн, отраженных от ионосферы // Геомагнетизм и аэронавигация.— 1970.— № 6.— С. 1003—1008.
5. **Березин Ю.В., Гусев В.Д., Смирнов В.И.** Экспериментальные исследования подавления одной магнитоионной компоненты при отражении от слоя F2 // Геомагнетизм и аэронавигация.— 1971.— № 2.— С. 258—261.
6. **Березин Ю.В., Крашенинников И.В.** Модель частично рассеянного поля с полностью смещенным спектром // Геомагнетизм и аэронавигация.— 1979.— № 4.— С. 641—645.

7. **Березин Ю.В., Вылегжанин И.С.** Декаметровые ионосферные линии радиосвязи с высокой пропускной способностью // Радиотехника.— 2005.— № 1.— С. 6—12.
8. **Березин Ю.В., Вылегжанин И.С.** Зоны помехоустойчивого приема сигнала при селективном возбуждении электромагнитных волн в ионосфере // Радиотехника.— 2005.— № 1.— С. 13—18.
9. **Жильцов А.У., Новосельцева Г.В., Симонов А.Г. и др.** Исследование зоны обслуживания зенитной антенны // Электросвязь.— 1977.— № 5.— С. 25—29.
10. **Жильцов А.У.** Использование круговой поляризации в КВ связи и вещании при зенитном излучении // Электросвязь.— 1987.— № 6.— С. 45—46.
11. **Чернов Ю.А.** Эллиптическая поляризация волн на КВ трассах.— М.: Труды НИИР, 2002.— С. 87—90.
12. **Шередько Е.Ю.** Турникетная антенна зенитного излучения // Электросвязь.— 1980.— № 2.— С. 35—39.
13. **Сивоконь В.П.** Патент РФ на изобретение № 2408895. Способ локализации источников электромагнитного излучения декаметрового диапазона.
14. **Сивоконь В.П.** Патент РФ на изобретение № 2297643. Способ формирования декаметрового ионосферного радиоканала высокой помехоустойчивости.
15. **Березин Ю.В., Балинов В.В., Рыжов Д.Е.** Патент РФ на изобретение № 2002276. Способ возбуждения характеристических электромагнитных волн в ионосфере.
16. **Айзенберг Г.З., Белоусов С.П., Журбенко Э.М. и др.** Коротковолновые антенны.— М.: Радио и связь, 1985.— 536 с.
17. **Сивоконь В.П., Дружин Г.И., Поддельский И.Н. и др.** Аппаратурный комплекс для исследования волн вращающейся поляризации в КВ-диапазоне // Электросвязь.— 2004 — № 8.— С. 9—11.
18. **Сивоконь В.П., Дружин Г.И.** Оценка замираний при излучении волн вращающейся поляризации в КВ диапазоне // Электросвязь.— 2005.— № 10.— С. 39—41.
19. **Сивоконь В.П.** Поляризация коротких волн в ионосферном канале связи // Электросвязь.— 2007 — № 7.— С. 55—58.
20. **Головин О.В.** Декаметровая радиосвязь.— М.: Радио и связь, 1990.— 240 с.
21. **Фалькович И.С., Калинин И.Н., Станиславский А.А.** Экспериментальные исследования наклонного поляризационно-согласованного зондирования ионосферы в декаметровом диапазоне волн // Геомагнетизм и аэронавигация.— 1995.— № 6.— С. 123—131.
22. **Фалькович И.С., Калинин И.Н.** КВ антенна круговой поляризации на основе линейного диполя, размещенного над полупроводящей землей // Электросвязь.— 1995.— № 3.— С. 29—31.
23. **Юрцев О.А., Рунов А.В., Казарин А.Н.** Спиральные антенны.— М.: Советское радио, 1974.— 257 с.
24. **Гошин Г.Г.** Граничные задачи электродинамики в конечных областях.— Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1987.
25. **Сивоконь В.П., Дружин Г.И.** Геомагнитный фактор  $D_{st}$ -вариаций в селективном возбуждении ионосферных характеристических волн // Геомагнетизм и аэронавигация.— 2006.— Т. 46, № 4.— С. 492—495.

Получено 30.05.12