

УДК 621.396.946

ВОЗРОЖДЕНИЕ ЗАГОРИЗОНТНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

Дубровин В. С., Никулин В.В.

ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева»,
г. Саранск

E-mail: dvs8937@saransk.ru

Аннотация. На основе материалов, опубликованных в открытой печати, рассмотрены основные этапы развития загоризонтной радиолокации; особенности проектирования станций тропосферной связи; фирмы-производители и выпускаемая продукция; проблемы и перспективы развития загоризонтных радиорелейных линий.

Ключевые слова: загоризонтная радиолокация; тропосферная связь; пространственная волна; отражение радиосигналов; дифракция радиоволн; антенные решетки.

Введение

В истории развития радиолокации можно выделить [1-9] несколько этапов:

На начальном этапе развития радиолокации (40-е – 50-е годы) использовались [1] аналоговые системы. Для обработки радиолокационных сигналов и данных в реальном масштабе времени не могло быть и речи, поскольку аппаратура в этот период была громоздкой и малопроизводительной. *Второй этап развития* РЛС связан с появлением фазированных антенных решеток (ФАР) и внедрением сигнальных процессоров. *Началом третьего этапа* в радиолокации можно считать наметившийся переход к РЛС с цифровыми антенными решетками (ЦАР), в которых принимаемые сигналы оцифровываются непосредственно на выходе каждого антенного элемента.

Первые отечественные исследования по радиообнаружению воздушных целей проводились [10] в 1934 г. с аппаратурой «Рapid». Станция обнаружения работала в диапазоне коротких волн (4,7 м), хотя следующие разработки велись в основном в декаметровом диапазоне волн. В 1938 г. прошла испытания по обнаружению самолетов станция «Ревень», работающая в режиме прямого рассеяния на метровых волнах. Работы по созданию средств загоризонтной связи с использованием явления тропосферного рассеивания радиоволн начались в СССР и за рубежом ещё в 50-х годах.

Первая антенна с электронным сканированием была разработана под руководством Ю. Я. Юрова в 1955 г. [11]. Электрическое сканирование позволяет избежать перемещения громоздких механических конструкций и тем самым резко повысить скорость перемещения луча. Электрическое сканирование обычно реализуется с помощью ФАР, представляющих собой системы излучателей с электрически управляемым фазовым распределением. ФАР формируют одновременно несколько лучей, обеспечивают гибкое управление их перемещением и позволяют реализовать наиболее совершенные методы обработки сигналов.

Перспективность цифрового формирования диаграммы направленности антенны для радиолокационной техники была доказана теоретически и практически советскими учеными к началу 90-х годов [12, 13]. Из отечественных РЛС следует отметить появление в 1976 г. приемной антенны с использованием полного цифрового формирования диаграммы направленности (ДН) [14].

С середины 70-х до середины 80-х годов прошлого столетия, как за рубежом, так и в России проводились работы по созданию систем цифрового диаграммообразования (ЦДО). Достигнутые результаты позволили в середине 1980-х годов приступить непосредственно к практическому осуществлению этих работ. Однако отсутствие необходимой элементной базы не позволило осуществить в полной мере этот шаг на практике, и только в конце XX века появилась элементная база, позволяющая непосредственно приступить к практической реализации РЛС с ЦДО.

Основная задача по созданию тропосферных средств и систем связи в СССР была возложена на МНИРТИ [4], которая и стала одним из ведущих направлений деятельности ФГУП МНИРТИ. В 1962 году была разработана первая тропосферная радиорелейная станция загоризонтной связи (ТРС) дециметрового диапазона «Баклан» (Р-408) с протяженностью интервала связи 120-150 км. Станция была предназначена для организации 12 телефонных каналов с частотным уплотнением. Технические характеристики позволяли применять ее для создания многоинтервальных линий большой протяженности.

С 1967 года начинается производство семейства станций дециметрового диапазона типа Р-410. Протяженность интервалов связи составляла от 150 до 250 км (в зависимости от типа модификации). В такой линии обеспечивалась дуплексная передача до 24 телефонных каналов, и использовалась для создания как мобильных, так и стационарных линий тропосферной связи. В 1975 году в институте была разработана ТРС «Атлет-Д» (Р-420) для обеспечения связи на сверхдальних интервалах (350-400 км). В 1981 году в МНИРТИ разработана цифровая ТРС сантиметрового диапазона «Бриг-1» (Р-423-1). Станция обеспечивает скорость передачи информации 2 Мбит/с на интервале протяженностью 150 км и скорость 64 кбит/с на интервале до 230 км. В 1981-84 годах в МНИРТИ были разработаны цифровые тропосферные станции дециметрового диапазона «Эшелон» (Р-444) и «Эшелон Д» (Р-444-7,5). Эти станции обеспечивали скорость передачи информации до 1 Мбит/с на интервале протяженностью 130-150 км и скорость 48 кбит/с на интервале до 240 км.

В период с 1980-го по 1987 год на территории стран - участниц Варшавского договора была развернута автоматизированная сеть управления и связи «Барс». В составе сети было организовано 26 узлов, обеспечивавших связь на 29 интервалах. Общая протяженность линий составляла около 5 тысяч км [4].

К началу 90-х годов СССР по многим теоретическим и практическим вопросам опережал [2] зарубежные разработки в области радиолокации и, в частности, в области загоризонтной радиолокации. Однако отставание в развитии элементной базы, вызванное разрывом экономических связей после развала СССР и отсутствием необходимого финансирования перспективных разработок, привело к утере странами СНГ многих из ранее завоеванных приоритетов. Зарубежные же фирмы не прекращали поиск новых решений в развитии радиолокационных систем и добились значительных успехов [5-8].

Несмотря на кризисные явления в мировой и российской экономике в начале 2000-х годов в России начинается новый этап в развитии загоризонтных РЛС – *этап возрождения* [3, 4, 9, 13].

Особенности загоризонтной радиолокации

В зависимости от используемого вида распространения радиоволн радиорелейные линии (РРЛ) можно разделить [15] на два класса: РРЛ прямой видимости, и тропосферные РРЛ, в которых нет прямой видимости между антеннами соседних станций. В основе построения тропосферных линий связи (ТЛС) лежит два механизма распространения радиоволн: режим дифракционного распространения радиоволн (на коротких расстояниях – менее 70 км); режим рассеяния радиоволн на неоднородностях тропосферы (на расстояниях более 70 км). Системы связи, использующие оба механизма распространения, называются **системами загоризонтной связи**. Загоризонтная радиолокация позволяет обнаружить различные объекты, глубоко скрытые за линией горизонта.

При тропосферном распространении в точку приема приходит большое число отраженных радиоволн (многолучевое распространение), в результате чего создаются специфические искажения сигнала. Из-за значительного ослабления сигнала на участке распространения и наличия глубоких замираний требуется более высокий энергетический потенциал линии. Достигается это применением передатчиков большой мощности, направленных антенн и малошумящих усилителей [16].

Для борьбы с замираниями на ТРЛ применяются многократный прием, при этом

могут использоваться различные способы комбинирования принимаемых сигналов: линейное или оптимальное сложение, а также автовыбор, при котором в любой отрезок времени используется только тот из приемников, на выходе которого сигнал имеет наибольшую величину. При линейном сложении амплитуда результирующего сигнала прямо пропорциональна сумме амплитуд составляющих, подаваемых на вход устройства сложения, причем при оптимальном сложении достигается максимально возможное отношение сигнал/шум на выходе.

Из-за глубоких замираний на интервалах ТРЛ обычный одинарный прием не может обеспечить требуемой надежности связи. Эффективным средством борьбы с быстрыми замираниями является разнесенный прием, при этом используют: пространственное, частотное и угловое разнесение.

При пространственном разнесении прием ведется на две антенны, установленные на некотором удалении друг от друга [17]. В зависимости от расположения радиопередающего и радиоприемного устройств (РПДУ и РПРУ) в пространстве РЛС подразделяют на: *однопозиционные* (совмещенные), когда РПДУ и РПРУ размещены в одном пункте; *разнесенные* (бистатистические), когда РПДУ и РПРУ расположены в двух пунктах, достаточно удаленных друг от друга; *многопозиционные*, состоящие из нескольких разнесенных в пространстве передающих, приемных или приемопередающих позиций, в которых осуществляется совместная обработка радиолокационной информации.

Частотное разнесение осуществляется посредством одновременной передачи сигнала на нескольких частотах. Передача обычно производится на двух частотах, причем величина разноса частот выбирается такой, чтобы отсутствовала корреляционная связь между быстрыми замираниями на входах приемников.

Угловое разнесение возможно как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях. С помощью двух облучателей, смещенных относительно фокуса параболического отражателя приемной антенны, создаются две диаграммы направленности, разнесенные в пространстве на некоторый угол. Угловое разнесение дешевле пространственного, поскольку требуется всего одно антенное зеркало, но возможно оно только при очень узких диаграммах направленности приемной антенны.

На интервалах ТРЛ обычно применяются двоярный или счетверенный прием, а в случае очень больших потерь может использоваться и восьмикратный. Комбинирование сигналов может производиться как до частотного детектора, так и после него.

Для борьбы с замираниями сигналов на ТРЛ находит широкое применение разработанный советскими специалистами для системы «Аккорд» автокорреляционный метод приема сигналов [18].

Перспективы тропосферной связи

Новейшие разработки для систем загоризонтной радиолокации связаны, прежде всего, с разработкой [11, 13] цифровых антенных решеток, малозумящих СВЧ-усилителей, специализированных модемов, аналого-цифровых преобразователей, специальных процессоров, программируемых логических интегральных схем, современных методов цифровой обработки сигналов (ЦОС). Технологии цифровой обработки сигналов играют определяющую роль в современных системах связи. Цифровое диаграммообразование, или формирование диаграммы направленности системы цифровыми методами, – одна из наиболее важных задач [1, 2]. В условиях все большего ужесточения требований к радиолокационной технике переход к внедрению ЦАР – это единственно разумный в настоящий момент способ устранить угрозу кризиса традиционной радиолокации. Значительное число соответствующих разработок дает основание говорить о ЦДО как основной технологии РЛС XXI века [13].

РЛС на базе ЦАР - это приемные системы, способные воспринять всю информацию, содержащуюся в структуре пространственно-временных электромагнитных полей на

раскрыве антенной решетки, и при минимальном уровне потерь трансформировать ее в данные о наличии и параметрах объектов сложной помехово-целевой обстановки [19]. Достигается такой эффект благодаря включению на выходе каждого антенного элемента решетки аналого-цифрового преобразователя (АЦП). При этом исключаются операции преобразования частоты, детектирования сигналов с выделением их огибающей, что сокращает энергетические потери.

Преимущества ЦАР (по сравнению с традиционными аналоговыми решетками) [14]:

- отсутствие потерь, вносимых фазовращателями;
- быстрое управление лучом в раскрыве антенны на прием;
- стабильность параметров;
- изменение параметров программным способом без замены аппаратной части;
- идентичность характеристик каналов;
- возможность корректировки амплитудного распределения с более высокой точностью;
- обеспечение высокого динамического диапазона за счет суммирования сигналов от составных частей антенны;
- упрощенный и более точный процесс калибровки;
- малый объем аппаратуры при большом числе лучей на прием.

Разработчики и производители загоризонтных средств связи

Одним из ведущих разработчиков в сфере тропосферной связи, является американская компания Comtech Systems Inc. [20, 21], которая выпускает оборудование для тропосферных линий более 30 лет и ведет активную работу для перехода радиорелейной связи на новый уровень. Компания с 2009 года выпускает новое цифровое оборудование уплотнения CSM8100, специально спроектированное для работы в составе наземных тропосферных линий, а также CS4400 – новый частотный конвертер, предназначенный как для работы на тропосферных линиях, так и на линиях прямой видимости. Эти две разработки позволили применить ТЛС в IP и широкополосных сетях. К числу современных разработок следует отнести и модем CS678, предназначенный для работы с различными типами тропосферных станций выпускаемых Comtech Systems, а также станций других производителей.

Американская компания Raytheon, разработчик средств связи, программных продуктов и различных устройств для авиакосмической и оборонной промышленности, возрождает тропосферную связь [22]. Raytheon удалось добиться скорости 40 мбит/с. Для передачи голоса, видео и данных. Новый вариант спутникового терминала, получивший название DART-T, позволяет действовать в режиме передачи сигналов в тропосфере, если стандартный (спутниковый) вариант связи будет недоступен. Возможно, работы по созданию такого терминала во многом были стимулированы недавним космическим экспериментом Китая по уничтожению собственного спутника.

Компания General Dynamics SATCOM Technologies (GDST), обладает более чем 40-летним опытом по производству антенных систем различного назначения, в том числе выпускаются тропосферные антенны диаметром 1,8–18 м в стационарном и подвижном исполнении [23]. Серийно производимый фирмой General Dynamics C4 Systems современный модем TM-20 [3] первым из тропосферных цифровых модемов позволил обеспечить скорость в 20 Мбит/с.

В России разработку, модернизацию и внедрение систем загоризонтной радиолокации ведут ФГУП МНИРТИ [24, 25], ОАО НПК НИИДАР [26], ФГУП «НПП «РАДИОСВЯЗЬ» [27, 28], ЗАО «РАДИОСВЯЗЬ-ФМ» [29], концерн «СОЗВЕЗДИЕ» [30].

В МНИРТИ разработано несколько поколений полевых радиорелейных станций — как прямой видимости, так и тропосферных станций загоризонтной связи. «Ладья» — единственная в России ТРРС с повышенной развед- помехозащищённостью, ее уникальной

особенностью является непрерывная случайная перестройка рабочей частоты, задаваемая средой распространения.

ФГУП «НПП «РАДИОСВЯЗЬ» с 60-х годов прошлого века занимается созданием военных средств спутниковой и тропосферной связи [27, 28]. С 2007 года в серийное производство запущена контейнерная цифровая станция тропосферной связи Р-423-АМК, в которой используются современные методы передачи информации и помехозащиты с широким применением цифровой обработки сигналов с использованием ПЛИС и сигнальных процессоров.

Открытое акционерное общество «Научно-производственный комплекс «Научно-исследовательский институт дальней радиосвязи» (ОАО НПК «НИИДАР») входящий в состав ОАО «Концерн «Радиотехнические и информационные системы» производит береговой загоризонтный радар поверхностной волны (БЗГР) «Подсолнух-Э» коротковолнового диапазона, а также высокоэффективную береговую загоризонтную РЛС поверхностной волны «Лагуна» [26].

ЗАО «РАДИОСВЯЗЬ-ФМ» – разработчик и производитель радиорелейного оборудования [20]. На предприятии ведутся работы по созданию малогабаритной радиорелейно-тропосферной станции техники тропосферной и спутниковой связи.

Успехи в области тропосферной связи делает и концерн «СОЗВЕЗДИЕ», образованный в 2004 году [30, 31]. Сотрудники концерна выполнили контракт по разработке двух комплектов опытных образцов приемо-передающего оборудования цифровых станций тропосферной связи.

Выводы:

1. Несмотря на широкое (и все более растущее) применение спутниковых средств в сетях и системах связи и развитие проводных сетей во многих странах мира широкое распространение получила радиосвязь, основанная на дальнем тропосферном распространении волн.

2. К основным достоинствам ТЛС следует отнести: неподверженность влиянию электромагнитным импульсам; возможность организации связи в труднодоступных районах севера, горных местностях и где использование спутниковых систем не представляется возможным; малые габаритные размеры, позволяющие создавать мобильные станции с малым временем разворачивания, не требующие высокого подъема антенн и наличия открытого горизонта в направлении трансляции.

3. Возможно применение загоризонтных ТЛС, как на закрытых трассах (на расстояниях до 150-200 км), так и на интервалах прямой видимости.

4. В сетях специального назначения преимуществом ТЛС перед спутниковыми является более высокая живучесть в условиях вооруженных конфликтов и/или антитеррористических мероприятий, когда средствами радиоэлектронной борьбы будет подавлены другие виды радиосвязи.

Библиографические ссылки

1. Кузьмин С. З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию / С. З. Кузьмин. – Киев: изд-во «КВЦ». – 2000. – 428 с.
2. Слюсар В. И. Цифровые антенные решетки: аспекты развития / В. И. Слюсар. // Специальная техника и вооружение. 2002 – №1–2. – С. 17–23.
3. Паутов Г. Второе пришествие ТЛС / Г. Паутов. // Connect!. – 2006. – №10. – С. 100–101.
4. Серов В. В. Развитие тропосферной связи в МНИРТИ. ИНФОРМОСТ / В. В. Серов, А. М. Сеченых. // Радиоэлектроника и телекоммуникации. – 2006. – №4(46). – С. 37–39.

5. Васильев А. Развитие загоризонтной радиолокации в США / А. Васильев. // Зарубежное военное обозрение. – 1975. – №4. – С. 61–66.
6. Яковлев. Д. Новая английская станция тропосферной связи / Д. Яковлев. // Зарубежное военное обозрение. – 1984. – №8. – С. 35–37.
7. Алмазов А. Американские загоризонтные РЛС системы 414L / А. Алмазов. // Зарубежное военное обозрение. – 1989. – №7. – С. 42–44.
8. Петров В. Современное состояние и перспективы развития загоризонтных радиолокационных станций зарубежных стран / В. Петров. // Зарубежное военное обозрение. – 2008. – №10. – С. 27–31.
9. Мацков А. А. Перспективы использования линий загоризонтной связи / А. А. Мацков, В. В. Серов, Л. И. Чернобельский. // Электросвязь. – 2006. – №8. – С. 33–37.
10. Алебастров В. А. Основы загоризонтной радиолокации / В. А. Алебастров, Э. Ш. Гойхман, И. М. Заморин, А. А. Колосов, В. А. Корrado, Ф. А. Кузьминский, Б. С. Кукис, под ред. А. А. Колосова – М. : Радио и связь. – 1984. – 256 с.
11. Вендик О. Г. Антенны с электрическим сканированием. Под ред. Л. Д. Бахраха. / О. Г. Вендик, М. Д. Парнес. – 2001. – 252 с.
12. Слюсар В. И. Цифровые антенные решетки – Будущее радиолокации / В. И. Слюсар. // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. – 2001. – №3. – С. 42–46.
13. Слюсар В. И. Цифровое формирование луча в системах связи: Будущее рождается сегодня. / В. И. Слюсар. // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. – 2001. – №1. – С. 6–12.
14. Григорьев Л. Н. Цифровое формирование диаграммы направленности в фазированных антенных решетках / Л. Н. Григорьев. – М. : Радиотехника, 2010. – 144 с.
15. Каменский Н. Н. Справочник по радиорелейной связи / Н. Н. Каменский, А. М. Модель, Б. С. Надененко. – 1981. – 416 с.
16. Калашников Н. И. Системы связи и радиорелейные линии / Н. И. Калашников. – М. : Связь. – 1977. – 392 с.
17. Сосулин Ю. Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации: Учеб. пособие для вузов / Ю. Г. Сосулин – М. : Радио и связь. – 1992. – 304 с.
18. Гусятинский И. А. Системы борьбы с интерференционными замираниями на тропосферных линиях связи / И. А. Гусятинский, А. С. Немировский. // Электросвязь. – 1973. – №2. – С. 7–12.
19. Слюсар В. И. Цифровые антенные решетки: аспекты развития / В. И. Слюсар. // Специальная техника и вооружение. 2002. – №1-2. – С. 17–23.
20. <http://ss-op.ru/reviews/view/68> (дата обращения: 10.06.2012).
21. http://www.trrlsever.org/SEVER/MODERN/tropo_review-01.html (дата обращения: 10.06.2012).
22. http://rnd.cnews.ru/tech/news/line/index_science.shtml?2007/02/12/235362 (дата обращения: 10.06.2012)
23. Паутов Г. Антенные системы General Dynamics SATCOM Technologies / Г. Паутов. // Connect!. – 2009. – №5. – С. 2–3.
24. Борисенко Т.М. Системы и средства связи, создаваемые ФГУП МНИРТИ для вооруженных сил / Т.М. Борисенко. // Связь в Вооруженных Силах Российской Федерации – 2006. – №3. – С.130–131.
25. Борисенко Т.М. ФГУП «МНИРТИ»: 55 ЛЕТ СВЧ-связи для Вооружённых Сил РФ / Т.М. Борисенко. // Связь в Вооруженных Силах Российской Федерации – 2011. – С.190–191.
26. <http://www.niidar.ru/> (дата обращения: 10.06.2012).

27. Галлеев Р.Г. Станции спутниковой и тропосферной связи ФГУП «НПП «Радиосвязь» / Р.Г. Галлеев. // Связь в Вооруженных Силах Российской Федерации – 2004. – №1. – С. 136–137.
28. Рагзин Г.М. ФГУП «НПП «Радиосвязь» - ведущее предприятие РФ в области создания военных средств спутниковой и тропосферной связи. / Г.М. Рагзин. // Связь в Вооруженных Силах Российской Федерации – 2006. – Часть3. – С. 189.
29. Терешин В.В. ЗАО «РАДИОСВЯЗЬ-ФМ» — Разработчик и производитель радиорелейного оборудования / В.В. Терешин. // Связь в Вооруженных Силах Российской Федерации – 2006. – Часть3. – С. 197.
30. http://sozvezdie.su/newspaper/1_yanvar_2011_g/pervie_uspehi_v_oblasti_troposfernoy/ (дата обращения: 10.06.2012).
31. http://www.sozvezdie.su/newspaper/16_oktyabr_2010_g/zaglyanut_za_gorizont/ – ОАО Концерн «Созвездие» (дата обращения: 10.06.2012).

REVIVAL OVER-THE-HORIZON RADAR

Dubrovin V. S., Nikulin V.V.

Mordovia State University named in honour of N. P. Ogarev, Saransk city.

E-mail: dvs8937@saransk.ru

Abstract. On the basis of the materials published in the press the main stages of over-the-horizon radar development, the design features of tropospheric communications stations, some manufacturers and products, the problems and prospects horizon radio-relay links development are considered.

Keywords: over-the-horizon radar; tropospheric communication; space wave; of radio signals reflection; of Radio Waves diffraction; antenna arrays.