УДК 621.396.96

© *А. В. Бархатов*[1], *В. И. Веремьёв*[1], *В. А. Родионов*[2], *С. В. Куприянов*[3]
[1]Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)»
[2]Секция прикладных проблем (при Президиуме РАН), Санкт-Петербург
[3]Секция прикладных проблем (при Президиуме РАН), Москва
ver_vi@mail.ru

КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ КОРОТКОВОЛНОВЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ С ВЫНЕСЕННЫМ ПРИЕМОМ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИГНАЛОВ СОБСТВЕННЫХ И СТОРОННИХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ОСВЕЩЕНИЯ МОРСКОЙ ОБСТАНОВКИ

Рассматривается структура радиолокационной станции коротковолнового диапазона с вынесенным приемом, в которой предполагается комплексировать несколько приемных и передающих позиций. Дальность действия вынесенного приемника составляет до 400 км, при этом наблюдаемые объекты могут находиться за горизонтом. Освещен вопрос о современном состоянии исследований в области разработок радиолокационных станций с вынесенным приемом. Представленная концепция позволит существенно повысить эффективность освещения морской обстановки над и за пределами РФ, и как автономный элемент может быть интегрирована в единую систему освещения обстановки при создании глобального информационного энергетического пространства РФ.

Ключевые слова: коротковолновый диапазон, пространственная волна, вынесенный прием, бистатическая радиолокация, параметры волнения, поверхностные течения.

A. V. Barkhatov[1], *V. I. Veremev*[1], *V. A. Rodionov*[2], *S. V. Kupriyanov*[3]
[1]Saint-Petersburg Electrotechnical University «LETI», St.-Petersburg, Russia
[2]Section of applied problems of Russian Academy of Sciences Presidium, Saint-Petersburg, Russia
[3]Section of applied problems of Russian Academy of Sciences Presidium, Moscow, Russia

THE DEVELOPMENT CONCEPTION OF HIGH FREQUENCY RADAR WITH A FORWARD-BASED RECEIVER AND COOPERATIVE AND NON-COOPERATIVE TRANSMITTERS SIGNALS UTILIZING FOR MARINE SITUATIONS SURVEILLANCE

The paper describes the design of a high frequency radar station with a forward-based receiver where several receiving and transmitting positions are supposed to be complexed. The range of a forward-based receiver is up to 400 km while surveillance objects can be located beyond the horizon. The current state of researches in design of radar stations with a forward-based receiver is shown. The presented concept will allow us to improve the efficiency of marine situations surveillance under and outside the Russian Federation. Moreover, it can be integrated as an independent device into the unified system of marine situations surveillance during the creation of global information and energy space of the Russian Federation.

Key words: high frequency radar, sky-wave mode, forward-based receiver, bistatic radar, marine wave characteristics, surface currents.

Радиолокационные станции (РЛС) коротковолнового (КВ) диапазона (длина радиоволны 10—100 м) используются для мониторинга водной поверхности, освещения надводной обстановки, мониторинга ионосферы. При относительно низкой точности оценки координат наблюдаемых объектов КВ РЛС имеют большую дальность действия. Короткие волны обладают свойством распространяться в ионосфере и вдоль поверхности Земли, огибая ее. Дальность действия КВ РЛС, использующих эффект огибания короткими волнами поверхности Земли, составляет до 400 км, а использующих эффект ионосферного распространения — до 3000 км [1]. КВ РЛС, в отличие от так называемых надгоризонтных РЛС, могут наблюдать объекты «за горизонтом». Это уникальное свойство дало еще одно название для КВ РЛС — загоризонтные (ЗГ) РЛС.

Серьезные достижения в применении КВ РЛС для мониторинга водной поверхности обусловлены резонансным характером отражения коротких радиоволн от гравитационных волн на воде.

КВ РЛС позволяют оценивать бальность, амплитуду, пространственно-временной спектр волнения, скорость поверхностного течения и вертикальный профиль течений до глубины 20 м [2].

При построении КВ РЛС с разнесением в пространстве передающей (Прд) и приемной (Прм) позиций встают задачи их синхронизации, согласованного управления, передачи опорного сигнала от Прд к Прм. В связи с этим в существующих КВ РЛС расстояние между Прм и Прд всегда меньше дальности распространения коротких волн в ионосфере. Между тем, современные достижения в области бистатической радиолокации, объединяющей методы и средства радиолокации объектов по сигналам удаленных источников излучения, в том числе некооперативных (сторонних), позволяют разрабатывать КВ РЛС с вынесенным приемом, в которых Прм может быть удалена от Прд на 1000 и более километров.

Структура радиолокационной станции коротковолнового диапазона с вынесенным приемом. КВ РЛС с вынесенным приемом в общем случае содержит несколько Прд и несколько Прм (рис. 1). При этом Прд могут быть как кооперативными (управляемыми вместе с Прм), так и некооперативными. Сигналы, излученные Прд, распространяются через ионосферу и достигают Прм и места, в котором находится наблюдаемый объект (далее — цель). Отраженные от цели сигналы распространяются к Прм так называемой поверхностной волной.

Использование нескольких Прд одной Прм становится возможным за счет большого допустимого расстояния между Прд и Прм. При излучении сигналов под углом к земной поверхности и однократном отражении от ионосферы луч возвращается на Землю на расстоянии 800—3000 км [1], т. е. расстояние между Прм и Прд может быть приблизительно 800—2600 км (в предположении, что расстояние от Прм до цели достигает 400 км). При этом для Прм практически в любой точке Земли будут доступны одновременно сигналы сразу нескольких Прд КВ-диапазона.

В то же время, использование нескольких Прд обусловлено не только имеющимися возможностями, но и необходимостью: из-за изменчивости ионосферы сигналы некооперативных Прд, для которых отсутствует возможность управлять углом места и частотой, будут пропадать в зависимости от координат Прд, времени суток, года, цикла солнечной активности и т. д. При этом Прм должен содержать блок анализа и выбора рабочих частот с непрерывно выполняемыми функциями анализа и выбора сигналов доступных Прд. В частном случае КВ РЛС с вынесенным приемом может использовать только некооперативные Прд.

В качестве примера, показывающего загруженность КВ-диапазона сигналами сторонних Прд, на рис. 2 приведен участок спектра 9.5—10.5 МГц. Запись сделана 21.03.2013 в Санкт-Петербурге сотрудниками СПбГЭТУ.

Включение в состав КВ РЛС с вынесенным приемом не одной, а нескольких приемных позиций обуславливается фактическим дефицитом мест для размещения громоздких антенных систем. По сравнению с размещением одной приемной позиции с антенной решеткой длиной несколько сотен метров (и более) размещение нескольких разнесенных в пространстве Прм с малогабаритными антеннами (несколько десятков метров) и совместная обработка информации от них представляются в значительной степени более реализуемыми и выгодными с экономической точки зрения.

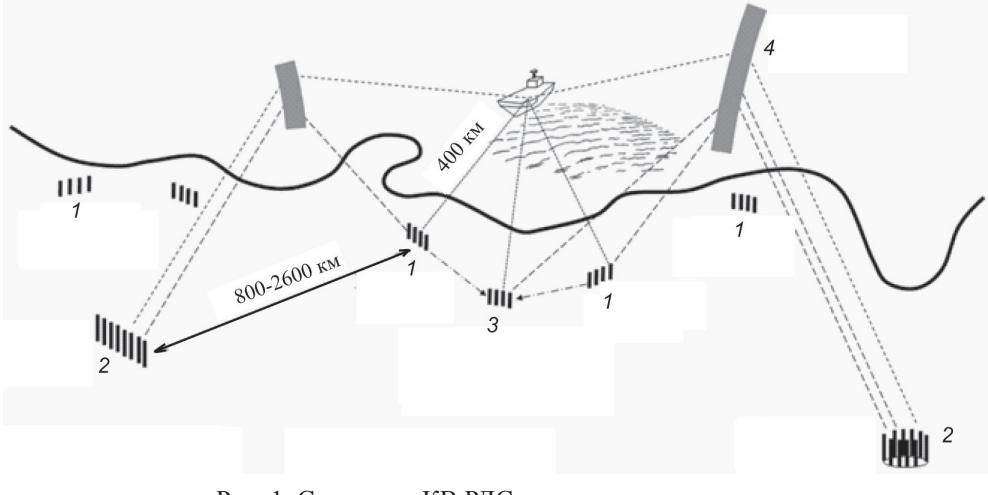

Рис. 1. Структура КВ РЛС с вынесенным приемом.

1 — приемная и *2* — передающая позиции; *3* — приемная позиция и центр совместной обработки; *4* — ионосфера.

-·-·- каналы связи; сигналы: - - - - подсвета, — — прямой, —— отраженный.

Методы обработки в радиолокационной станции коротковолнового диапазона с вынесенным приемом. Каждая пара Прд и Прм в КВ РЛС с вынесенным приемом является так называемой бистатической РЛС. Если бы прямой сигнал Прд не использовался в Прм, то в части обнаружения и определения координат точечных целей Прм работали бы как пассивные РЛС, и для определения координат целей на плоскости понадобилось бы не менее двух Прм, для определения координат целей в пространстве — не менее трех Прм. Мониторинг водной поверхности в этом случае был бы невозможен. Межу тем, в рассматриваемой КВ РЛС прямой (а точнее, распространяющийся по кратчайшему пути от Прд к Прм) сигнал принимается в Прм и используется в качестве опорного при обработке. Один из этапов обработки — вычисление взаимной функции неопределенности (ВФН) наблюдаемого сигнала и опорного сигнала, в результате чего происходит формирование дальносто-доплеровских каналов и, после решения задачи обнаружения, определение задержки и сдвига частоты отраженного целью сигнала относительно прямого. Отличие от упомянутой традиционной схемы построения КВ РЛС заключается в том, что задержка и частотный сдвиг определяются не относительно излучаемого передающей позицией сигнала, а относительно прямого сигнала, попавшего в Прм после распространения через ионосферу. В простейшем случае, когда Прд, Прм и цель расположены на плоскости (рис. 3), расстояние от Прм до цели определяется как

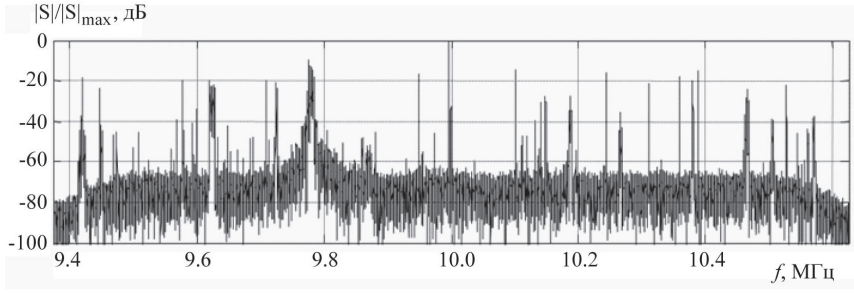

Рис. 2. Пример загруженности КВ-диапазона сторонними сигналами.

$$R_r = \frac{(c\tau)^2 + 2c\tau L}{2\left(c\tau + L\left[1 - \cos\alpha_r\right]\right)},$$

где c — скорость света; τ — измеренная задержка; L — расстояние от Прд до Прм; α_r — угол между направлениями на цель и на Прд (индекс «*r*» показывает, что величина относится к Прм — англ. *receiver*).

Частотный сдвиг f_d (индекс «*d*» показывает, что сдвиг доплеровский — англ. *Doppler*) связан со скоростью цели:

$$f_d = \frac{2V}{\lambda}\cos\varphi\cos(\beta/2),$$

где V — модуль вектора скорости цели; φ — угол между вектором скорости цели и биссектрисой так называемого бистатического угла β; λ — длина волны сигнала.

В отличие от простейшего случая в КВ РЛС с вынесенным приемом необходимо учитывать, что Прд и Прм располагаются не на плоскости, а на поверхности сферы (геоида), и сигналы от Прд к Прм и от Прд к цели распространяются не по прямой, а через ионосферу по сложной траектории.

Прямой сигнал, приходящий к Прм, имеет не только полезную функцию, но и является помехой, попадая в канал наблюдения за целями. При этом в точке размещения Прм отношение уровней прямого сигнала и отраженного может достигать 100 дБ. В связи с этим в бистатических РЛС, использующих сигналы некооперативных Прд, всегда применяются меры по подавлению прямого сигнала в канале наблюдения за целями (формирование диаграммы направленности антенны с провалом в направлении прямого сигнала, адаптивная фильтрация и др.). На рис. 4 приведен пример действия адаптивного фильтра LSL (*Least Square Lattice* [3]), показан спектр сигнала в канале наблюдения за целями до применения (рис. 4, *а*) и после применения фильтра LSL (рис. 4, *б*). В данном примере используется фильтр первого порядка — подавляется только прямой сигнал.

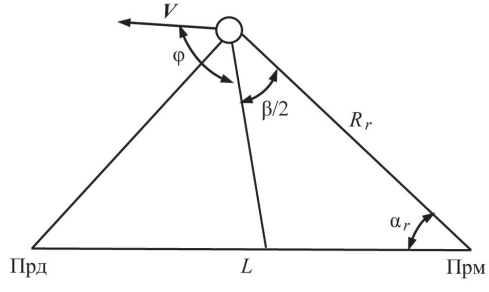

Рис. 3. К расчету расстояния до цели.

Представленные на рисунке спектры принадлежат сигналам цифрового радиовещания стандарта DRM (*Digital Radio Mondiale*) и получены 18.06.2013 сотрудниками СПбГЭТУ. Нулевая частота на графиках соответствует несущей частоте 9.85 МГц.

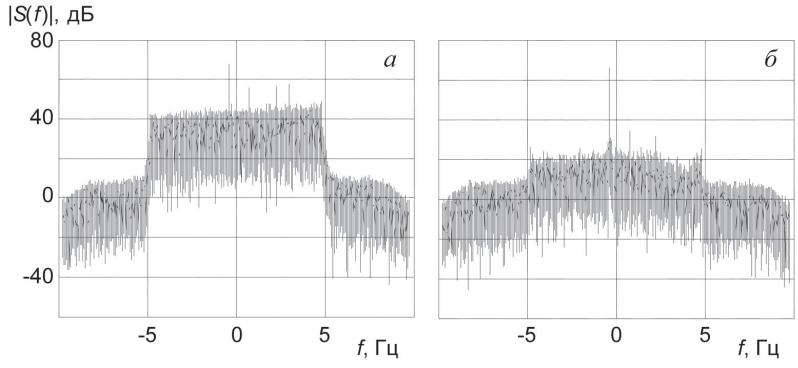

Рис. 4. Пример действия адаптивного фильтра LSL.
а — спектр сигнала в канале наблюдения за целями до применения LSL;
б — спектр сигнала в канале наблюдения за целями после применения фильтра LSL.

Несмотря на то, что использование прямого сигнала в КВ РЛС с вынесенным приемом позволяет оценивать координаты цели даже с одним Прм, точность такой оценки будет относительно низкой из-за ограниченных размеров антенны. Для повышения точности применяется совместная обработка информации от нескольких Прм. На рис. 5 проиллюстрировано повышение точности при объединении измерений четырех Прм по формуле последовательного уточнения.

Данные на рис. 5 получены в статистическом модельном эксперименте, проведенном с помощью зарегистрированного программного средства [4]. Цель находится в точке с координатами (0, 0). Пунктирные линии на рис. 5 отмечают для отдельных Прм так называемый эллипс равной вероятности (ЭРВ) (фигура, внутрь которой с заданной вероятностью, в данном случае — 0.95, попадают все измерения координат цели).

Современное состояние в области разработок КВ РЛС с вынесенным приемом. В настоящее время доступно большое количество публикаций по тем или иным аспектам рассматриваемой темы. Обзор этих публикаций выходит далеко за рамки данной статьи, так как требует не только отдельного места, но и заметно большего объема. Здесь мы отметим только несколько работ, которые представляются нам знаковыми в текущем контексте.

Концепция, аналогичная обсуждаемой, использована в австралийской экспериментальной системе FBRA (от англ. *Forward-Based Receiver Augmentation*) [5]. Четыре малогабаритных Прм «вынесены вперед» от управляемого Прд на расстояние одного отражения от ионосферы. Рабочий диапазон Прм — 9—25 МГц. Минимальное расстоянием между Прм — 15 км, максимальное — 37 км. Прм связаны беспроводной линией стандарта 802.11b, синхронизация Прм — при помощи GPS-приемника. На рис. 6 [5] приведена фотография 10-элементной антенной решетки Прм в составе системы FBRA. Разработчики заявляют об обнаружении воздушных целей на дальности до 400 км и о планах использовать сигналы некооперативных Прд.

В работе [6] представлен макет Прм, разработанный в Уханьском университете (КНР). Прм установлена в городе Циндао и используется для приема и обработки сигналов DRM-радиовещания, отраженных от поверхности Желтого моря. Источник сигналов DRM — передатчик радиостанции «Голос России», расположенный в Комсомольске-на-Амуре на удалении 2000 км от Прм. На рис. 7 [6] показана ВФН сигнала канала наблюдения и прямого сигнала. Сечения ВФН вдоль частоты fД, представляют собой типичный доплеровский спектр рассеянного морской поверхностью сигнала с так называемыми брэгговскими пиками от удаляющейся (Б1) и приближающейся (Б2) резонансных волн на воде. Брэгговские пики, по положению которых оцениваются поверхностные течения, а также вертикальный профиль течений на небольших глубинах, наблюдаются на расстояниях R до 300 км.

В работе [7] (и других работах тех же авторов) представлены результаты экспериментов,

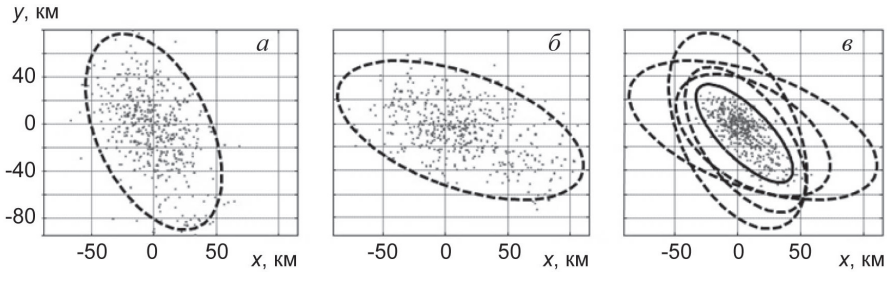

Рис. 5. Результаты статистического модельного эксперимента.
а, *б* — разброс измерений и ЭРВ для первого и второго Прм; *в* — ЭРВ отдельно для четырех Прм (пунктир) и разброс измерений и ЭРВ (сплошная линия) при объединении измерений всех Прм по формуле последовательного уточнения.

проведенных специалистами ОАО НПК НИИДАР, который является лидером в разработке и производстве КВ РЛС в России. На рис. 8 [7] показаны окружности равной дальности от Прм (100, 200 и 300 км), направление движения рейсовых пассажирских самолетов (стрелки), траектории движения самолетов, полученные «от Регионального центра организации воздушного движения», и отметки целей, «полученные одной из приемных позиций». Передающая позиция — сторонняя ЗГ РЛС на острове Кипр. Параметры стороннего передатчика оценивались с помощью аппаратуры радиочастотного мониторинга. Самолеты наблюдаются на дальности более 300 км.

***

Таким образом, существующие и перспективные разработки в области загоризонтной радиолокации позволяют предопределить принципиальную возможность создания ЗГ КВ РЛС с вынесенным приемом и использованием сигналов собственных и сторонних источников излучения. Представленная концепция построения ЗГ КВ РЛС позволяет существенно повысить эффективность освещения обстановки над и за пределами РФ, в т. ч. удаленных (арктических) районах, и как автономный элемент должна быть интегрирована в единую систему освещения обстановки при создании глобального информационного энергетического пространства РФ.

Рис. 6. Экспериментальная система FBRA (Австралия) [5].

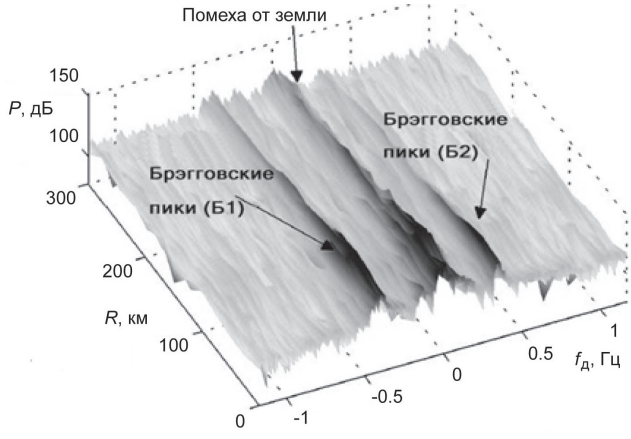

Рис. 7. ВФН сигнала, отраженного от поверхности моря, и прямого сигнала [6].

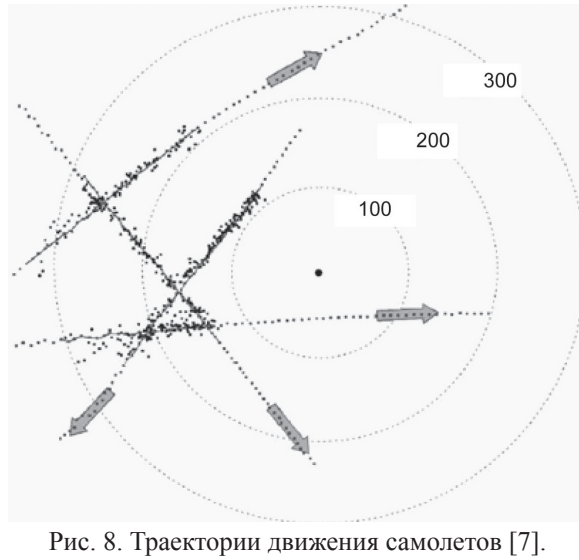

Рис. 8. Траектории движения самолетов [7].

Литература

1. Основы проектирования многопозиционных декаметровых РЛС пространственной волны / Под общ. ред. В. М. Кутузова. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. 191 с.
2. *Гарбацевич В. А., Телегин В. А., Лапшин В. С.* и др. Малогабаритная многочастотная РЛС декаметрового диапазона для мониторинга океана и ионосферы. Концепция разработки и первые результаты // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. № 4. С. 100—106.
3. *Simon S.* Haykin. Adaptive Filter Theory (4th edition). New Jersey: Prentice Hall, 2002. 936 p.
4. Св-во о гос. рег. программы для ЭВМ № 2012617001 «Программный комплекс моделирования работы декаметровой РЛС пространственной волны» / Д. А. Ковалев, А. В. Бархатов, А. В. Безуглов, В. И. Веремьев. Заявка № 2012614856. Дата поступления 15.06.2012 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 06.08.2012. Правообладатель ФГБОУ ВПО СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина).
5. *Frazer G. J.* Forward-based Receiver Augmentation for OTHR // Proc. of 2007 Radar Conference. P. 373—378.
6. *Zhixin Zhao, Xianrong Wan, Delei Zhang and Feng Cheng.* An Experimental Study of HF Passive Bistatic Radar via Hybrid Sky-surface Wave Mode // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2013. № 1. P. 415—424.
7. *Ткачев Г. Н., Готовчиц И. В., Крылов Б. Н.* Результаты исследований по проблеме полуактивной радиолокации в диапазоне коротких волн // Тр. IV Всерос. конф. «Радиолокация и радиосвязь», ИРЭ РАН. 2010. С. 264—268.

Статья поступила в редакцию 26.03.2015 г.