

УДК 621.396.96+621.271.029.65

## МОНИТОРИНГ ВОЗДУШНОЙ ОБСТАНОВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗЛУЧЕНИЯ ВЕЩАТЕЛЬНЫХ СТАНЦИЙ КОРОТКОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА

*В. И. Луценко \**, *И. В. Луценко*, *И. В. Попов*

Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАНУ, г. Харьков, Украина

Рассмотрена возможность использования излучения (коротковолновых) вещательных станций для обнаружения воздушных объектов. Получены соотношения для оценки дальности обнаружения и определены требования к степени подавления прямого сигнала от вещательной станции. Экспериментально исследованы спектральные характеристики сигналов вещательных коротковолновых станций при разных поляризациях принимаемого излучения. Показана возможность обнаружения воздушных объектов с использованием эффекта Доплера. Приведены теоретические оценки эффективной площади рассеяния (ЭПР) воздушных объектов для различных поляризаций падающего излучения. Экспериментально установлено, что для вертикальной и горизонтальной поляризаций их эффективные площади рассеяния примерно одинаковы.

### ВВЕДЕНИЕ

Последние 40 лет характеризуются интенсивным развитием активно-пассивной многопозиционной радиолокации. За это время была создана теория построения активно-пассивных радиолокационных станций, проведены их испытания и внедрены многие важные компоненты многопозиционных радаров [1, 2]. Однако уязвимость активных радиолокационных систем по отношению к средствам радиоэлектронной борьбы, а также разработка специальных программ по снижению радиолокационной наблюдаемости воздушных целей выдвигают на первый план проблему дальнейшего развития активно-пассивных многопозиционных систем и нетрадиционных методов обнаружения, в том числе основанных на вторичных эффектах, обусловленных возмущением атмосферы двигательной установкой летательного аппарата [3]. В связи с этим для решения задач мониторинга воздушной обстановки актуальным является использование излучения существующих вещательных станций [4] или телевизионных центров [5, 6].

В работах [1, 2, 7] рассмотрены особенности построения пространственно-когерентных би-статических радиолокаторов, в которых для «подсветки» зоны обнаружения воздушных целей применяется квазишумоподобный сигнал (как постановщиков активных помех, так и наземных источников шумоподобных сигналов).

В активно-пассивных системах используют «подсветку» цели с передающего пункта и измерение её координат в местах расположения приёмного и передающего пунктов [2, 7]. Возможен вариант использования «подсветки» цели сигналом внешнего передатчика и использование вторичного рассеянного поля для обнаружения и определения координат цели методами, характерными для пассивных систем [2].

В работах [8–12] проанализировано использование коротковолновых вещательных станций для обнаружения воздушных объектов. В настоящей статье рассмотрена возможность обнаружения воздушного объекта на основе информации о доплеровском смещении частоты рассеянного объектом сигнала при «подсветке» его внешним источником. В качестве внешнего источника использованы коротковолновые вещательные станции, которые могут располагаться на большом

---

\* hutsenko@ire.kharkov.ua

удалении от зоны ответственности бистатической радиолокационной станции, что повышает живучесть системы. Получена зависимость доплеровского смещения частоты от размещения станций подсветки, что позволит в дальнейшем оптимизировать его выбор. Оценена эффективная площадь рассеяния различных самолётов для излучения с горизонтальной и вертикальной поляризациями. Рассчитаны зависимости нормированной «доплеровской» скорости от курсового угла. Экспериментально показано отсутствие существенных отличий эффективных площадей рассеяния воздушных объектов в декаметровом диапазоне длин волн для излучения с вертикальной и горизонтальной поляризациями.

### 1. БИСТАТИЧЕСКИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ СТАНЦИИ С ПОДСВЕТКОЙ ЧЕРЕЗ ИОНОСФЕРУ

Система обнаружения воздушных объектов с использованием излучения коротковолновых вещательных станций может быть отнесена к классу бистатических радиолокационных станций. Обнаружение проводится с использованием излучения вещательных станций, рассеянного воздушными объектами. Чтобы выделить полезный сигнал объекта на фоне пассивных помех, создаваемых отражениями от подстилающей поверхности, можно использовать когерентную обработку с выделением сигнала на сдвинутой частоте. Сдвиг частоты обусловлен эффектом Доплера при изменении расстояния, проходимого электромагнитной волной по трассе: источник подсветки—ионосфера—объект—приёмник. Система обнаружения с подсветкой через ионосферу сигналом вещательной станции схематически изображена на рис. 1.

Мощность принимаемого отражённого от цели сигнала определяется соотношением

$$P_T = \frac{P_{Tr} G_{Tr} G_R F^2(\theta_{TR}) \sigma_T(\theta_{TrT}, \theta_{TR}) \lambda^2}{(4\pi)^3 R_{TrT}^2 R_{TR}^2 L_{TrT} L_{TR}}, \quad (1)$$

где  $P_{Tr}$  — мощность излучаемого сигнала;  $G_{Tr}$ ,  $G_R$  — коэффициенты усиления передающей и приёмной антенн;  $R_{TrT}$ ,  $R_{TR}$  — расстояния между передатчиком и целью и целью и приёмником;  $\sigma_T(\theta_{TrT}, \theta_{TR})$  — бистатическая эффективная площадь рассеяния цели;  $\theta_{TrT}$ ,  $\theta_{TR}$  — углы, определяемые направлениями на передатчик и приёмник соответственно;  $F^2(\theta_{TR})$  — значение нормированной диаграммы направленности приёмной антенны по мощности в направлении на цель;  $L_{TrT}$ ,  $L_{TR}$  — коэффициент потерь при распространении радиоволн от передатчика до цели и от цели до приёмника соответственно;  $\lambda$  — рабочая длина волны излучения.

Мощность принимаемого сигнала от передающей станции определяется формулой

$$P_R = \frac{P_{Tr} G_{Tr} G_R F^2(\theta_{TrR}) \lambda^2}{(4\pi)^2 R_{TrR}^2 L_{TrR}}, \quad (2)$$

где  $R_{TrR}$  — дальность между передатчиком и приёмником,  $F^2(\theta_{TrR})$  — значение диаграммы направленности приёмной антенны по мощности в направлении на передатчик,  $L_{TrR}$  — коэффици-

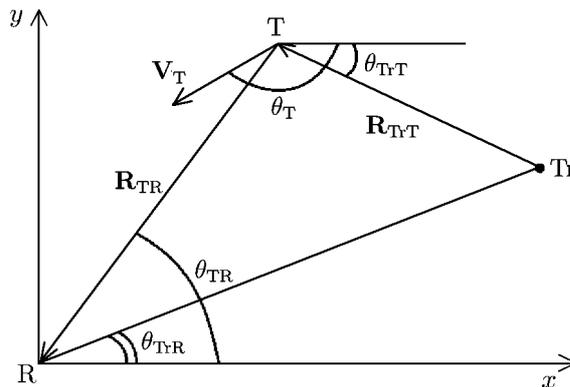


Рис. 1. Схематическое изображение бистатической системы: Tr, R, T — передатчик, приёмник и цель соответственно;  $V_T$  — скорость цели;  $|R_{TrT}|$ ,  $|R_{TR}|$  — дальности между передатчиком и целью, целью и приёмником;  $\theta_{TrT}$ ,  $\theta_{TR}$  — углы, определяемые направлениями от цели на передатчик и приёмник соответственно;  $\theta_T$  — курсовой угол цели;  $\theta_{TrR}$  — угол, определяемый направлением от передатчика на приёмник

ент, учитывающий потери при распространении от передатчика к приёмнику.

Отношение мощностей сигналов, принимаемых от цели и от передающей вещательной станции,  $\mu_{TR}$ , определяется соотношением

$$\mu_{TR} = \frac{P_T}{P_R} \approx \frac{\sigma_T F^2(\theta_{TR})}{4\pi R_{TR}^2 F^2(\theta_{TR})}. \quad (3)$$

При этом учитывается, что расстояние от станции подсветки до цели и приёмной системы существенно больше расстояния от цели до приёмника,  $R_{TTR}^2 \approx R_{TR}^2 \gg R_{TR}^2$ , а потери при распространении до цели и приёмника примерно одинаковы,  $L_{TTR} \approx L_{TR}$  (причём цель в этом частотном диапазоне можно считать изотропно отражающей,  $\sigma_T(\theta_{TTR}, \theta_{TR}) \approx \text{const}$ , и находящейся в пределах прямой видимости приёмной системы,  $L_{TR} \approx 1$ ),

Анализ формулы (3) показывает, что для увеличения отношения мощности сигнала, отражённого от цели, к мощности прямого сигнала передатчика станции подсветки, которым и определяется дальность обнаружения, необходимо увеличивать отношение значений диаграммного множителя в направлениях на цель и на станцию подсветки. При этом целесообразно ориентировать максимум диаграммы направленности на цель, а ноль диаграммы направленности — на станцию подсветки. Степень подавления сигнала подсветки диаграммой направленности приёмной станции будет определять максимальную дальность обнаружения.

Необходимо обратить внимание, что для воздушных объектов длина волны облучающего поля вещательных станций может быть соизмерима с их размерами, что может приводить к возрастанию их эффективных площадей рассеяния. Помимо выбора резонансной длины волны облучающего сигнала и формирования нуля диаграммы направленности в направлении на станцию подсветки, повышение отношения сигнал/помеха может быть достигнуто за счёт применения узкополосной доплеровской фильтрации. Известно, что спектр обратного рассеяния от воздушных, надводных и наземных объектов достаточно узкополосен даже в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне. Ширина спектра сигнала, отражённого от линии корпуса (т. е. от невращающихся частей корпуса), не превышает десятка герц [13–15]. Немногочисленные данные по исследованию обратного рассеяния от надводных и воздушных объектов в декаметровом диапазоне длин волн [16–18] позволяют сделать вывод о том, что ширина спектра отражённых от них сигналов составляет сотые доли герца и определяется, в основном, флуктуациями проекции вектора скорости объекта на направление облучения за время формирования спектральной оценки. При доплеровской селекции можно выделять спектральную линию рассеянного объектом сигнала на смещённой за счёт эффекта Доплера частоте. При этом отношение сигнал/шум  $\mu$  будет определяться отношением  $\mu_{TR}$  мощностей сигнала от цели и сигнала подсветки, а также отношением  $\mu_{SN}$  уровня спектральной линии несущей к спектральной плотности шума в диапазоне частот смещённого за счёт эффекта Доплера сигнала (где происходит обнаружение цели):

$$\mu = \mu_{TR} \mu_{SN}. \quad (4)$$

Используя соотношение (3), можно записать оценку дальности обнаружения в бистатических радиолокационных станциях, в которых в качестве подсветки применяется сигнал вещательных коротковолновых станций:

$$R_{TR} = \sqrt{\frac{\mu_{SN}}{\mu} \frac{\sigma_T}{4\pi} \frac{F^2(\theta_{TR})}{F^2(\theta_{TR})}}. \quad (5)$$

Рассмотрим воздушные объекты с эффективной площадью рассеяния  $10^3 \div 10^4 \text{ м}^2$  в резонансной области. Пусть отношение сигнал/помеха равно  $10 \div 15 \text{ дБ}$  (что необходимо для обнаружения с вероятностями правильного обнаружения  $0,90 \div 0,99$  и ложной тревоги

$10^{-2} \div 10^{-5}$ ), глубина провала диаграммы направленности антенны в направлении на передатчик станции подсветки составляет около 40 дБ, а уровень шумов по отношению к спектральной плотности несущей равен  $40 \div 50$  дБ при расстройке на доплеровское смещение частоты. Тогда дальность обнаружения таких объектов, как видно из соотношения (5), будет составлять  $20 \div 100$  км.

## 2. ЭФФЕКТИВНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ РАССЕЯНИЯ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ В ДЕКАМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ

Существующие к настоящему времени данные об эффективных площадях рассеяния воздушных объектов в декаметровом диапазоне длин волн немногочисленны и противоречивы [4, 6]. Они были получены при работе радиолокационных станций в моностатическом режиме. При горизонтальной поляризации облучающего объекта поля (одна из компонент волны при подсветке через ионосферу) рассеяние происходит резонансным образом (поскольку горизонтальные размеры самолётов соизмеримы с длиной волны) и эффективная площадь рассеяния может достигать значительной величины. Одной из основных особенностей радиолокации поверхностной вертикально поляризованной волной в декаметровом диапазоне длин волн является принципиальная возможность обнаружения объектов, находящихся в зоне ближней геометрической тени, что обусловлено эффектом дифракции радиоволн на хорошо проводящей поверхности моря. Однако практическая реализация этой возможности при работе с маловысотными объектами встречает ряд затруднений, связанных, в первую очередь, с их малой эффективной площадью рассеяния. Ранее полагалось, что эффективные площади рассеяния самолётов вблизи поверхности раздела двух сред (т. е. в зоне, где преобладает вертикальная поляризация зондирующего излучения) мала. Это объясняется тем, что вертикально-ориентированные элементы конструкции малы по сравнению с длиной волны и при этом имеет место закон рассеяния Рэлея, когда  $\sigma \propto \lambda^{-4}$ , где  $\sigma$  — эффективная площадь рассеяния объекта,  $\lambda$  — длина волны облучающего поля. По различным оценкам [4, 6, 19] считалось, что эффективные площади рассеяния таких объектов лежат в пределах  $0,1 \div 20$  м<sup>2</sup>. В то же время для высоко летящих самолётов, когда они находятся в поле со значительной интенсивностью горизонтально поляризованного излучения (это характерно для радиолокационных станций ионосферной волны), полагалось, что их эффективные площади рассеяния при выборе длины волны радиолокационной станции, соизмеримой с размахом крыла, может достигать значений  $\sigma \sim \lambda^2$ , что для декаметрового диапазона длин волн  $10 \div 50$  м даёт величины  $80 \div 2000$  м<sup>2</sup>.

Проведённые при вертикальной поляризации излучения передачи и приёма модельные эксперименты [21] позволили получить данные о частотной зависимости эффективных площадей рассеяния несимметричных конструкций, имитирующих сочленение киль—фюзеляж самолёта, а также киль—хвостовое оперение—фюзеляж, когда вертикальные размеры конструкции меньше, а горизонтальные могут быть соизмеримы с длиной волны облучающего поля. Было установлено, что при определённых размерах конструкции (меньших длины волны облучающего поля) наблюдается резонансное возрастание эффективных площадей рассеяния при вертикальной поляризации излучения передачи и приёма.

Изучение поляризационных матриц рассеяния моделей сложных тел, имитирующих элементы самолётов [21], позволило установить, что эффективные площади рассеяния для горизонтальной и вертикальной поляризаций принимаемого излучения при горизонтальной поляризации облучения из-за взаимного влияния элементов конструкции отличаются незначительно. Эффективная площадь рассеяния самолёта для горизонтальной поляризации падающего излучения в резонансной области длин волн определяется его длиной и размахом крыла  $L$  [19, 20],  $\sigma_H \approx 3,44L^2$ , а для вертикальной поляризации, как показали экспериментальные исследования [21, 22], резонанс на-

Таблица 1. Характерные размеры и эффективные площади рассеяния летательных аппаратов

Тип самолёта	Назначение	Длина самолёта, м	Размах крыла, м	Высота самолёта, м	Горизонтальная поляризация		Вертикальная поляризация	
					ЭПР, 1 000 м <sup>2</sup>	Частоты, МГц	ЭПР, 1 000 м <sup>2</sup>	Частоты, МГц
С-17А	Т	53,0	51,0	16,8	9,7÷9,0	2,8÷2,9	1,25	4,5
EMB-145RS	Т	30,0	20,0	6,8	3,0÷1,4	5,0÷7,5	0,20	11,1
«Мираж»	И	15,3	9,3	4,5	0,77÷0,24	10,0÷17,9	0,09	16,7
F1								
ТА-7	Ш	14,1	11,8	4,9	0,67÷0,56	10,7÷17,9	0,10	15,3
«Корсар-2»								
Бе-12	Т	30,1	30,2	7,4	3,1	5,0	0,24	10,1
Бе-200	Т	32,0	32,7	8,9	3,7÷3,5	4,6÷4,7	0,35	8,4
Ан-24	П	23,5	29,2	8,3	1,9÷2,9	6,4÷5,1	0,31÷0,33	9,0÷8,7
Ан-26				8,6				
Ан-22	Т	57,3	64,4	13,5	12,5÷13,5	2,6÷2,3	0,81	5,6
Ан-72	Т	28,0	31,9	8,7	2,7÷3,5	5,4÷4,7	0,34	8,6
Ан-74								
Ил-18	П	35,9	37,4	10,2	4,4÷4,8	4,2÷4,0	0,46	7,4
Ил-62	П	53,1	42,5	12,3	9,7÷6,2	2,8÷4,5	0,67	6,1
Ил-76	Т	46,6	50,5	14,8	7,5÷8,8	3,2÷3,0	0,97	5,1
Ил-114(Т)	П (Т)	26,9	30,0	9,3	2,5÷3,1	5,6÷5,0	0,38	8,1
Ту-160	СБ	54,1	35,6÷55,7	13,1	4,4÷10,7	4,2÷2,7	0,76	5,7
Ту-22М3	СБ	41,5	23,3÷34,3	11,0	1,9÷5,9	6,4÷3,6	0,54	6,8
Б-52	СБ	49,1	56,4	12,4	8,3÷10,9	3,1÷2,7	0,68	6,0
Миг-29	И	17,3	11,4	4,7	0,4÷1,0	13,2÷8,7	0,099	15,9

Примечание. В табл. 1 использованы следующие сокращения типов самолётов: Т — транспортный; СБ — стратегический бомбардировщик; П — пассажирский; Ш — штурмовик; И — истребитель.

ступает, когда высота самолёта  $h$  примерно равна четверти длины волны облучающего поля. При этом его эффективная площадь рассеяния  $\sigma_V \approx 4,44h^2$  примерно на 3÷5 дБ меньше, чем эффективная площадь рассеяния полуволнового диполя [21, 22]. С учётом результатов [19–22] оценены эффективные площади рассеивания самолётов для горизонтальной (H) и вертикальной (V) поляризаций падающего излучения в резонансной области и определены резонансные частоты (табл. 1). Следует отметить, что при расчётах характеристик для вертикальной поляризации использовалась высота самолёта с учётом выпущенного шасси.

Это даёт завышенные оценки резонансной длины волны и эффективной площади рассеяния. Более правильным является использование высоты без учёта шасси, т. е. с убранным шасси.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УРОВНЕЙ ПОМЕХ ДЛЯ БИСТАТИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ

При использовании в качестве подсветки излучения коротковолновых вещательных станций рассеянный объектом сигнал  $\dot{S}_T(t)$  имеет временную структуру, схожую со структурой сигнала подсветки  $\dot{S}_T(t)$ . Доплеровское смещение частоты  $\omega_D$  рассеянного объектом сигнала определяется скоростью изменения суммы расстояний от передатчика до цели и от цели до приёмника:

$$\omega_D = \frac{2\pi}{\lambda_0} \frac{\partial(R_{\Gamma T} + R_{TR})}{\partial t} \leq \frac{2\pi}{\lambda_0} 2V_0, \quad (6)$$

где  $R_{\text{TГТ}}(\theta_{\text{TГТ}})$  — расстояние между передатчиком станции подсветки и объектом,  $R_{\text{ТР}}(\theta_{\text{ТР}})$  — расстояние между объектом и приёмной системой,  $\lambda_0 = 2\pi c/\omega_0$  — длина волны несущей,  $V_0$  — скорость полёта.

Скорость изменения расстояния определяется проекциями вектора скорости самолёта на направления распространения электромагнитной волны (на направление радиус-вектора  $\mathbf{R}_{\text{TГТ}}(\theta_{\text{TГТ}})$  от передатчика станции подсветки на объект, а также на направление радиус-вектора  $\mathbf{R}_{\text{ТР}}(\theta_{\text{ТР}})$  от объекта на приёмную систему).

Учитывая, что

$$\frac{\partial R_{\text{TГТ}}}{\partial t} = \frac{\mathbf{V}(\theta_{\text{T}})\mathbf{R}_{\text{TГТ}}}{|\mathbf{R}_{\text{TГТ}}|} = V_0 \cos(\theta_{\text{TГТ}} - \theta_{\text{T}}), \quad \frac{\partial R_{\text{ТР}}}{\partial t} = \frac{\mathbf{V}(\theta_{\text{T}})\mathbf{R}_{\text{ТР}}}{|\mathbf{R}_{\text{ТР}}|} = V_0 \cos(\theta_{\text{ТР}} - \theta_{\text{T}}), \quad (7)$$

можно записать уравнение, описывающее поведение «доплеровской» скорости  $V_{\text{D}} = \lambda_0 \omega_{\text{D}}/(2\pi)$ , а значит, и доплеровского смещения частоты:

$$V_{\text{D}}/V_0 = \cos(\theta_{\text{TГТ}} - \theta_{\text{T}}) + \cos(\theta_{\text{ТР}} - \theta_{\text{T}}). \quad (8)$$

Если дальность до станции подсветки  $R_0$  существенно превышает дальность до цели, т. е.  $R_0 \approx R_{\text{TГТ}} \gg R_{\text{ТР}}$ , то  $\theta_{\text{TГТ}} \rightarrow 0$  и из соотношения (8) следует, что отношение

$$V_{\text{D}}/V_0 = \cos \theta_{\text{T}} + \cos(\theta_{\text{ТР}} - \theta_{\text{T}}). \quad (9)$$

Зависимости нормированной «доплеровской» скорости от курсового угла, рассчитанные с использованием соотношения (9), представлены на рис. 2.

Видно, что в широком секторе курсовых углов доплеровские смещения частоты достаточны для селекции сигнала от объекта на фоне отражений от подстилающей поверхности. Лишь в секторе углов  $210^\circ \geq \theta_{\text{ТР}} \geq 150^\circ$  возникают определённые проблемы, связанные с попаданием доплеровски смещённой частоты в окрестность несущей частоты сигнала подсветки. Оценки с использованием соотношения (8) показывают, что для воздушных объектов с крейсерской скоростью полёта  $600 \div 2000$  км/ч доплеровское смещение частоты лежит в пределах  $3 \div 30$  Гц для дециметровых длин волн  $20 \div 60$  м падающего излучения. В то же время спектр информационного сигнала вещательных станций сосредоточен на частотах, которые выше несущей частоты примерно на 50 Гц. Это означает, что в интервале частот между несущей частотой и частотами информационного сообщения возможно обнаружение сигналов, отражённых от воздушных объектов.

Экспериментально изучены уровни помех в диапазоне частот между линией несущей и информационным сигналом. В качестве антенны использовался диполь с эффективной высотой около 40 см. Он размещался на опорно-поворотном устройстве, обеспечивающем смену поляризации приёма путём поворота диполя на  $90^\circ$  в вертикальной плоскости. Через симметрирующее устройство антенна подключалась к супергетеродинному приёмнику Р-399А («Катран»), выход фазового детектора которого через звуковую карту был подключён к компьютеру.

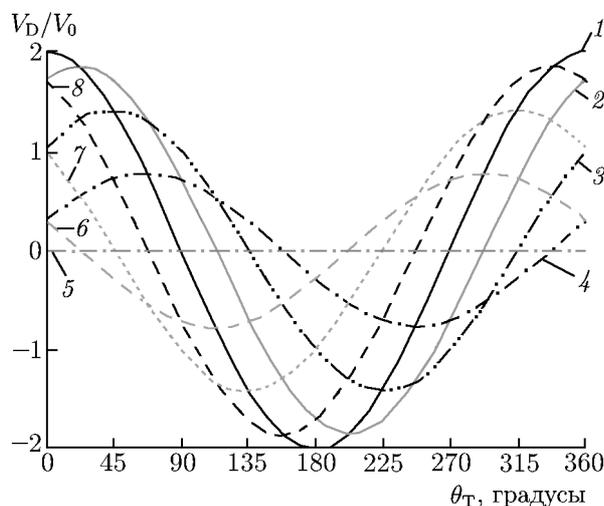


Рис. 2. Зависимости нормированной «доплеровской» скорости от курсового угла  $\theta_{\text{T}}$  и от определяемого направлением на цель угла  $\theta_{\text{ТР}} = 0^\circ$  (кривая 1),  $45^\circ$  (2),  $90^\circ$  (3),  $135^\circ$  (4),  $180^\circ$  (5),  $225^\circ$  (6),  $270^\circ$  (7),  $315^\circ$  (8)

Таблица 2. Основные технические характеристики измерительного комплекса

Действующая высота антенны	0,4 м
Диапазон рабочих частот	1,0 ÷ 31,9 МГц
Чувствительность	≤ 0,6 мкВ
Полоса пропускания приёмника	0,3; 1,0; 3,0; 6,0 кГц
Динамический диапазон приёмника	≥ 70 дБ
Разрядность преобразования	16 бит
Точность установки частоты гетеродина	1 Гц
Относительная стабильность частоты гетеродинов	$2,5 \cdot 10^{-8}$
Разрешающая способность по частоте	0,06 Гц

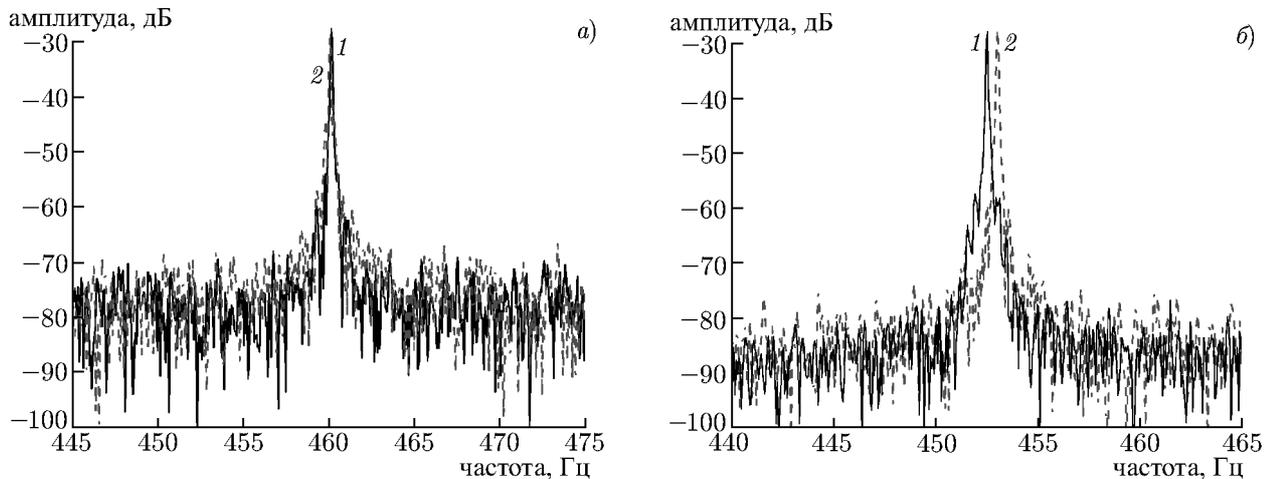


Рис. 3. Спектры сигналов вещательных станций после гетеродинного преобразования: кривая 1 соответствует горизонтальной поляризации принимаемого излучения; 2 — вертикальной поляризации. Панель а —  $f = 5990$  кГц; панель б —  $f = 9590$  кГц

Таблица 3. Отношение сигнал/шум при различных частотах и поляризациях принимаемого излучения

Частота, МГц	Поляризация	Ширина линии несущей, Гц	Отношение сигнал/шум, дБ при расстройке от несущей	
			-10 Гц	+10 Гц
15,130	вертик.	0,56	61,1	57,8
15,130	горизонт.	0,50	54,2	52,9
9,590	горизонт.	0,34	60,4	60,4
9,590	вертик.	0,28	57,9	58,2
13,840	вертик.	0,77	50,1	48,2
13,840	горизонт.	1,17	44,3	44,3
5,990	вертик.	0,34	52,0	52,9
5,990	горизонт.	0,42	47,9	49,5

Поскольку у звуковой карты компьютера существуют ограничения по нижней граничной частоте входного сигнала, то при приёме сигнал гетеродина сдвигался относительно частоты несущей. Следует отметить, что в разных опытах и для разных поляризаций приёма этот сдвиг отличался. Основные технические характеристики измерительного комплекса приведены в табл. 2.

На рис. 3 показаны спектры сигналов вещательных станций в окрестности несущей частоты при различных поляризациях принимаемого излучения на разных частотах  $f$  после гетеродинного преобразования. Видно, что уровень сигнала на несущей частоте превышает уровень шумов более чем на 40 дБ. Проведённое экспериментальное изучение уровней помех в диапазоне частот между линией несущей частоты и информационным сигналом показало, что как уровень сигнала на несущей частоте, так и шума слабо изменяются при смене поляризации приёма.

Полученное в ходе экспериментов отношение мощности сигнала на несущей частоте к уровню шумов при различных частотах и поляризациях принимаемого излучения приведено в табл. 3. Анализ показывает, что уровень шума практически одинаков при смещении как вниз, так и вверх от несущей частоты. Разность отношений сигнал/шум, как правило, не превышает 3 дБ. Однозначный вывод о влиянии смены поляризации на соотношение между уровнем сигнала на несущей частоте и уровнем шума сделать не удалось, однако в ряде случаев большие отношения сигнал/шум наблюдались при вертикальной поляризации принимаемого излучения. Вместе с тем можно отметить, что ширина линии несущей, как правило, уже в случае большого отношения сигнал/шум.

Это, по-видимому, связано с влиянием на прямой сигнал дальности между передатчиком и приёмником. В случаях односкачкового распространения наблюдаются более узкая частотная полоса несущей и большее отношение сигнал/помеха, чем в случаях многоскачкового распространения. Это обстоятельство нужно учитывать при выборе станций подсветки для обнаружения воздушных объектов.

#### 4. ОПЫТЫ ПО ОБНАРУЖЕНИЮ САМОЛЁТОВ

Проведены эксперименты для оценки возможности обнаружения воздушных объектов с использованием в качестве сигнала подсветки излучения вещательных станций коротковолнового диапазона (рис. 4). Объектами обнаружения были самолёты типов Ан-74 и Ан-140.

На рис. 5 приведены спектры сигналов на несущей частоте и смещённого на доплеровскую частоту отражённого от самолёта Ан-74 сигнала, полученные при использовании в качестве сигнала подсветки излучения радиостанции «Свобода» (азимутальный угол  $\theta_{ТТ}$  около  $75^\circ$ ).

Поляризация принимаемого излучения сменялась поворотом приёмной антенны на  $90^\circ$ . Характеристики для нескольких опытов (отношение уровней сигнала на несущей частоте и спек-



Рис. 4. Приёмо-передающие пункты и трассы самолётов: 1 — направление на передающую радиостанцию «Свобода», 2 — приёмный пункт, 3 — аэродром взлёта/посадки

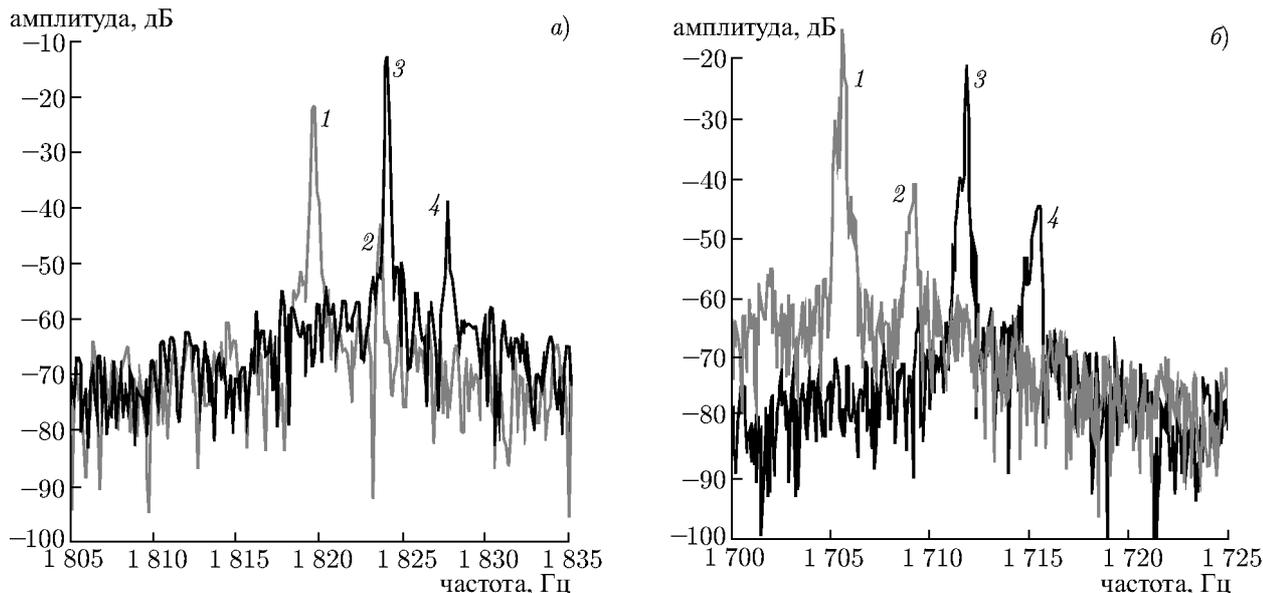


Рис. 5. Спектры после гетеродинного преобразования сигналов на несущей частоте (кривые 1, 3) и смещённого на доплеровскую частоту отражённого самолётом сигнала (2, 4). Панель а — горизонтальная поляризация принимаемого излучения, кривые 1, 2 — опыт № 1; 3, 4 — опыт № 2. Панель б — вертикальная поляризация, кривые 1, 2 — опыт № 3; 3, 4 — опыт № 4

Таблица 4. Характеристики отражений от линии корпуса (т. е. неврацающих частей корпуса) самолёта

Частота МГц	Поляри- зация	Отражённый от самолёта сигнал		Отношение сигнал/шум, дБ		Отношение отражённый сигнал/несущая, дБ
		«Доплеровская» частота, Гц	Ширина полосы, Гц	10 Гц	3 Гц	
15,130	вертик.	4,22	1,12	38,8	24,8	-22,3
15,130	горизонт.	4,03	0,68	32,2	20,4	-22,0
15,130	вертик.	3,58	1,05	34,7	23,6	-26,0
15,130	горизонт.	3,58	0,90	32,3	21,7	-26,1

тральной линии отражённого от самолёта сигнала, а также её ширина при различных поляризациях принимаемого излучения) приведены в табл. 4.

Отличие частот на рис. 5 в разных опытах связано с изменением частоты гетеродинирования, в то время как несущие частоты станции подсветки в этих экспериментах были одинаковы.

Используя соотношение (8), а также данные табл. 4 по частотам и азимутальные углы станции подсветки, можно оценить доплеровское смещение частоты сигнала, отражённого от самолёта в момент взлёта (когда его скорость составляет 230÷240 км/ч). Оно имеет величину 4,06÷4,23 Гц, что удовлетворительно согласуется с данными, полученными во время эксперимента. Следует отметить, что отражённые от самолёта сигналы как с горизонтальной, так и с вертикальной поляризациями имеют примерно одинаковую мощность и превышение над уровнем шумов. В наших опытах использовался диполь, который в горизонтальной плоскости имел круговую диаграмму направленности. Время формирования спектральной оценки составляло около 15 с. Дальность наблюдения самолётов в нашем случае равно нескольким километрам. При этом отношение сиг-

нал/шум, как видно из табл. 4, превышало 30 дБ при расстройке на 10 Гц и составляло более 20 дБ при расстройке около 3 Гц.

Такое отношения сигнал/шум достаточно для надёжного обнаружения. Формирование провала с глубиной около 40 дБ в направлении станции подсветки при незначительном ослаблении сигнала от цели позволит реализовать её обнаружение на дальностях более 100 км. Следует отметить, что спектральная линия корпуса излучения несколько шире для вертикальной поляризации принимаемого излучения, чем для горизонтальной поляризации. Измерения подтвердили отсутствие существенных отличий между эффективными площадями рассеяния для вертикальной и горизонтальной поляризаций принимаемого излучения при использовании в качестве подсветки сигнала ионосферной волны. Отсутствуют отличия для разных поляризаций принимаемого излучения и в уровне шумов. Это позволяет использовать для мониторинга воздушной обстановки приём излучения с вертикальной поляризацией.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённых теоретических и экспериментальных исследований получены энергетические соотношения для трасс распространения: станция подсветки—ионосфера—объект—приёмник и станция подсветки—ионосфера—приёмник, которые показали, что при подавлении прямого сигнала примерно на 40 дБ возможно обнаружение воздушных объектов на удалении более 100 км. Установлено, что соотношение спектральной плотности мощности в окрестности несущей частоты сигнала подсветки к спектральной плотности мощности шумов в полосе частот, характерных для доплеровских смещений частоты сигналов, отражённых от воздушных объектов, составляет для большинства вещательных станций 40÷50 дБ. Подтверждена возможность обнаружения и измерения скорости воздушных объектов с использованием для подсветки ионосферной волны вещательных коротковолновых станций. Экспериментально показано отсутствие существенных отличий эффективной площади рассеяния воздушных объектов в декаметровом диапазоне длин волн на вертикальной и горизонтальной поляризациях принимаемого излучения.

Рассмотренный в статье подход может использоваться для построения многопозиционных радаров, использующих для подсветки излучение радиовещательных станций коротковолнового диапазона.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по радиолокации. Т. 4. Радиолокационные станции и системы / Под ред. М. Сколника. М.: Сов. радио, 1978. 376 с.
2. Справочник по радиоэлектронным системам / Под ред. Я. Д. Ширмана. М.: Маквис, 1998. 828 с.
3. Kulemin G. P. Millimeter-wave radar target and clutter. London: Artech House, 2003. 327 p.
4. Вичкань А. В., Мельяновский П. А., Шуть А. И. // Радиофизика и электроника. 2010. Т. 15, № 1. С. 72.
5. Седышев Ю. Н., Седышев П. Ю., Тютюнник В. А. // Прикладная радиоэлектроника. Харьков. нац. ун-т радиоэлектрон., 2002. Т. 1, № 2. С. 189.
6. Лобочко С. Е. // Тр. Международ. науч. конф. «Излучение и рассеяние электромагнитных волн». Таганрог, 2003. С. 287.
7. Сайбель А. Г. Основы радиолокации. М.: Сов. радио, 1961. 384 с.
8. Popov I. V., Lutsenko V. I., Lutsenko I. V. // Proc. Int. Radar Symp. "IRS 2006": 2nd Microwave and Radar Week in Poland, 24–26 May 2006. P. 233.

9. Попов И. В., Луценко В. И., Луценко И. В. // Современные проблемы радиоэлектроники: Сб. научн. трудов. М.: Радио и связь, 2006. С. 25.
10. Попов И. В., Луценко В. И., Луценко В. И. // Радиофизика и электроника: Сб. научн. трудов ИРЭ им. А. Я. Усикова НАНУ. 2007. Т. 12, № 1. С. 193.
11. Popov I. V., Lutsenko V. I., Lutsenko V. I. // Telecommun. Radio Engin. 2008. V. 67, No. 4. P. 285.
12. Lutsenko V. I., Popov I. V. // Proc. 5th European Radar Conf., 30–31 October 2008. P. 396.
13. Небабин В. Г., Сергеев В. В. Методы и техника радиолокационного распознавания. М.: Радио и связь, 1984. 284 с.
14. Луценко В. И., Луценко И. В., Хлопов Г. И. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2007. Т. 12, № 3. С. 9.
15. Lutsenko V. I., Popov I. V., Khlopov G. I., Khomenko S. I. // Proc. 16th Int. Conf. "Microwaves, Radar and Wireless Commun.", May 22–24, 2006. P. 1192.
16. Брауде С. Я., Мень А. В., Шульга В. Ф. // Радиоокеанографические исследования морского волнения. Киев: Изд-во АН УССР, 1962. С. 26.
17. Брауде С. Я., Мень А. В., Поплавко Ю. В. и др. // Радиоокеанографические исследования морского волнения. Киев: Изд-во АН УССР, 1962. С. 49.
18. Мельяновский П. А., Кашеев С. Б., Зайцев Г. В. // Радиофизические исследования океана: Сб. научн. тр. ИРЭ им. А. Я. Усикова НАНУ. 1992. С. 80.
19. Степанов Ю. Г. Противорадиолокационная маскировка. М.: Сов радио, 1968. 145 с.
20. Современная радиолокация / Под ред. Ю. Б. Кобзарева. М.: Сов. радио, 1969. 704 с.
21. Луценко В. И., Хоменко С. И. // Радиофизика и электроника: Сб. научн. трудов ИРЭ им. А. Я. Усикова НАНУ. 1998. Т. 3, № 2. С. 33.
22. Lutsenko V. I., Tolstel S. Y. // Telecommun. Radio Engin. 2001. V. 55, No. 4. P. 33.

Поступила в редакцию 5 декабря 2014 г.; принята в печать 29 января 2015 г.

## ILLUMINATION OF THE AIR ENVIRONMENT USING RADIATION OF HF BROADCAST STATIONS

*V. I. Lutsenko, I. V. Lutsenko, and I. V. Popov*

We consider the possibility of using illumination of the HF broadcast stations for location of air objects. The relationships for estimation of the detection range are obtained and requirements for the degree of suppression of a direct signal from the broadcast station are defined. Spectral characteristics of the signals from HF broadcast stations are studied experimentally for different polarizations of the received radiation. The possibility of air object detection using the Doppler effect is shown. Theoretical estimates of the radar cross section (RCS) of air objects for different polarizations of the incident radiation are given. It is found experimentally that the RCS is about the same for the vertical and horizontal polarizations.