

УДК 621.391.26

В.Д. Карлов<sup>1</sup>, А.Н. Чёрный<sup>2</sup>, О.В. Бесова<sup>1</sup><sup>1</sup>Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков<sup>2</sup>Научно-исследовательский центр (государственный океанариум) ВС Украины, Севастополь

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ О СРЕДЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ ДО ЭЛЕМЕНТОВ СЛОЖНОЙ БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ ЦЕЛИ

В статье рассматривается возможность использования поляризационных различий между элементами сложной баллистической цели, обусловленной средой распространения радиоволн, для повышения точности измерения дальности до элементов сложной баллистической цели. Предложено устройство, реализующее такую возможность. Оценена эффективность его работы применительно к условиям локации элементов сложной баллистической цели в среднеширотной ионосфере. Сформулированы границы применимости рассмотренного в статье устройства.

**Ключевые слова:** сложная баллистическая цель, среднеширотная ионосфера, измерение дальности, согласованный фильтр, управляемый фазовращатель.

### Введение

**Постановка проблемы.** Тенденция развития средств воздушно-космического нападения свидетельствует о том, что для повышения вероятности преодоления средств уничтожения космических объектов, состав сложной баллистической цели неуклонно возрастает. Увеличение элементов сложной баллистической цели происходит с одной стороны за счет использования разделяющейся головной части, а с другой – за счет использования ложных целей, которые вместе с элементами ракеты-носителя увеличивают число элементов сложной баллистической цели. При этом, как показывает опыт локации подобных целей на РЛС дальнего обнаружения, протяженность такой цели может составлять несколько сотен километров. Это обстоятельство позволяет использовать информацию о среде распространения для повышения точности измерения дальности до элементов сложной баллистической цели.

В основе использования информации о среде лежит то обстоятельство, что при распространении в ионосфере сигнала с линейной поляризацией происходит поворот плоскости их поляризации. Это явление получило название в литературе [1], как эффект Фарадея. Использование в радиолокации эффекта Фарадея подробно рассмотрено в литературе, перечень которой приведен в [2]. Вместе с тем в литературе не рассматривался вопрос использования эффекта Фарадея для повышения точности измерения дальности до элементов сложной баллистической цели. Данная статья и предназначена для того, чтобы восполнить этот пробел.

**Цель статьи.** Рассмотреть возможность использования информации о среде распространения радиоволн для повышения точности измерения дальности до элементов сложной баллистической цели.

### Основная часть

При локации сложной баллистической цели возникает задача точного измерения дальности до одного из её элементов. В этом случае сигнал, отраженный элемента сложной баллистической цели дальность до которого следует измерить более точно, чем до других элементов, называют полезным сигналом, а сигналы, отраженные от других элементов сложной баллистической цели – помеховыми. Из общей теории локации известно [1], что если каким либо образом уменьшить амплитуду помеховых сигналов, то точность измерения запаздывания полезного сигнала возрастает. При этом, как показано в [1] наиболее сложной с точки зрения обеспечения выигрыша в точности измерения запаздывания является ситуация, когда имеется полезный и помеховый сигналы. То есть сложная баллистическая цель состоит из двух элементов. Если в этом случае удастся подавить помеховый сигнал, то в случае, когда помеховый сигнал будет образован совокупностью отражений от многих элементов, выигрыш в точности измерения полезного сигнала обеспечить намного проще [1].

Рассмотрим работу устройства, в котором подавление помехового сигнала достигается за счет использования поляризационных различий между полезным и помеховым сигналом, обусловленным пространственным различием угла  $\Phi$  фарадеевского вращения плоскости поляризации сигнала в ионизированной среде.

Схема устройства приведена на рис. 1. Устройство содержит: две приемные антенны с круговыми поляризациями противоположного направления вращения, два согласованных фильтра, управляемый фазовращатель, сумматор, квадратичный детектор, блок оценки дальности и измеритель угла  $\Phi$  фарадеевского вращения плоскости поляризации линейно-поляризованного сигнала в ионизированной среде.

Рассмотрим работу устройства рис. 1 и получим выражение для сигнала на входе блока оценки дальности для случая, когда цель состоит из двух и более элементов. При этом передающую антенну будем полагать линейно-поляризованной.

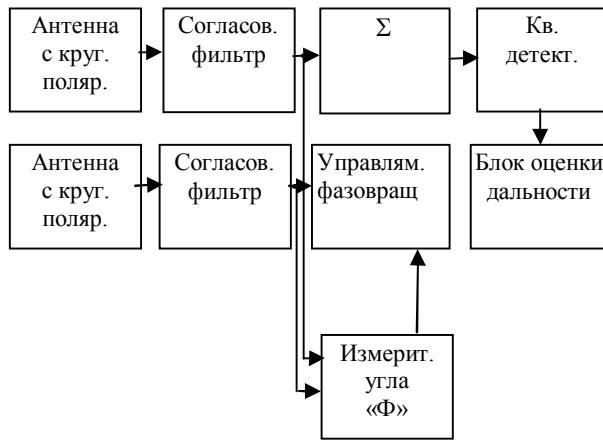


Рис. 1. Схема приёмного устройства с поляризационным подавлением мешающего сигнала

Линейно-поляризованный зондирующий сигнал  $\dot{\vec{E}}(t)$ , который излучается передающей антенной, представим в виде суммы двух сигналов  $\dot{\vec{E}}_1(t)$  и  $\dot{\vec{E}}_2(t)$  с круговыми поляризациями соответственно правого и левого направления вращения:

$$\dot{\vec{E}}(t) = \dot{\vec{E}}_1(t) + \dot{\vec{E}}_2(t), \quad (1)$$

где

$$\dot{\vec{E}}_1(t) = \sqrt{\frac{P_0}{2}} (\dot{i}\bar{x}^0 + \dot{y}^0) \dot{u}(t) \exp\{j\omega_0 t\}; \quad (2)$$

$$\dot{\vec{E}}_2(t) = \sqrt{\frac{P_0}{2}} (\bar{x} + i\dot{y}^0) \dot{u}(t) \exp\{j\omega_0 t\}, \quad (3)$$

где  $\bar{x}^0, \bar{y}^0$  вектора единичной длины, характеризующие положение плоскости поляризации в прямоугольной системе координат.

Из (1)-(3) видно, что суммарный сигнал  $\dot{\vec{E}}(t)$  имеет линейную поляризацию (вектор  $\vec{E}$  ориентирован под углом  $45^\circ$  к оси  $\bar{x}^0$ ). Ионизированная среда (ионосфера, искусственные ионизированные образования) в магнитном поле Земли является анизотропной средой. Поэтому сигналы  $\dot{\vec{E}}_1(t)$  и  $\dot{\vec{E}}_2(t)$  распространяются каждый со своей скоростью:

$$V_{1гр} = Cn_1; \quad V_{2гр} = Cn_2;$$

$$V_{1ф} = \frac{C}{n_1}; \quad V_{2ф} = \frac{C}{n_2}.$$

Здесь  $V_{1,2гр}, V_{1,2ф}$  – групповая и фазовая скорость распространения сигналов  $\dot{\vec{E}}_1(t)$  и  $\dot{\vec{E}}_2(t)$  со-

ответственно;  $n_1, n_2$  – показатель преломления ионизированной среды для сигнала с правой и для сигнала с левой круговыми поляризациями (обыкновенный и необыкновенный компоненты) соответственно;  $C$  – скорость света в вакууме. Сигналы  $\dot{\vec{E}}_{1,2}(t)$ , распространяясь в ионизированной среде, встречают на своем пути цель и отражаются от неё.

Поляризация сигналов  $\dot{\vec{E}}_{1,2}(t)$  при отражении их от объектов сложной геометрической формы из круговой превращается в эллиптическую. Мы будем рассматривать лишь объекты простой геометрической формы. Поэтому будем считать, что при отражении изменяется лишь направление вращения векторов  $\dot{\vec{E}}_{1,2}(t)$ . Это допущение является основанным в рассматриваемой задаче. Оно основано на том, что согласно [3] при облучении космического объекта линейно-поляризационным сигналом на частоте  $100 \div 150$  МГц, кросскомпонент в отраженном сигнале составляет всего лишь  $10 \div 15\%$  по сравнению с основным компонентом отраженного сигнала.

Найдем сигналы  $u_{1,2}(t)$  на выходах приемных антенн. Для этого сначала запишем выражения для сигналов  $\dot{\vec{E}}_{1,2}(t)$  у цели до их отражения, и после отражения. До отражения:

$$\dot{\vec{E}}_1(t) = \frac{\sqrt{2P_0 G_n}}{2R} g_n(\varphi, \theta) (\dot{i}\bar{x}^0 + \dot{y}^0) \times \times \dot{u} \left( t - \frac{1}{c} \int_0^{R(t)} \frac{dr}{n_1(r)} \right) \times \exp \left\{ j \left[ \omega_0 t - \frac{\omega_0}{c} \int_0^{R(t)} n_1(r) dr \right] \right\};$$

$$\dot{\vec{E}}_2(t) = \frac{\sqrt{2P_0 G_n}}{2R} g_n(\varphi, \theta) (\bar{x}^0 + i\dot{y}^0) \times \times \dot{u} \left( t - \frac{1}{c} \int_0^{R(t)} \frac{dr}{n_2(r)} \right) \times \exp \left\{ j \left[ \omega_0 t - \frac{\omega_0}{c} \int_0^{R(t)} n_2(r) dr \right] \right\},$$

где  $R, \varphi, \theta$  – координаты цели.

После отражения:

$$\dot{\vec{E}}_{1отр}(t) = \frac{\sqrt{2P_0 G_n}}{2R} g_n(\varphi, \theta) (\bar{x}^0 + i\dot{y}^0) \sqrt{\sigma} \times \times \dot{u} \left( t - \frac{1}{c} \int_0^{R(t)} \frac{dr}{n_1(r)} \right) \times \exp \left\{ j \left[ \omega_0 t - \frac{\omega_0}{c} \int_0^{R(t)} n_1(r) dr + \Delta\varphi_1 \right] \right\};$$

$$\dot{\vec{E}}_{2отр}(t) = \frac{\sqrt{2P_0 G_n}}{2R} g_n(\varphi, \theta) (\dot{i}\bar{x}^0 + \dot{y}^0) \sqrt{\sigma} \times \times \dot{u} \left( t - \frac{1}{c} \int_0^{R(t)} \frac{dr}{n_2(r)} \right) \times \exp \left\{ j \left[ \omega_0 t - \frac{\omega_0}{c} \int_0^{R(t)} n_2(r) dr + \Delta\varphi_1 \right] \right\},$$

где  $\sigma$  – эффективная отражающая поверхность (ЭПР) цели,  $\Delta\varphi_1$  – набег фазы, приобретенный сигналом при отражении от цели.

В точке приема:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{1np}(t) &= \frac{\sqrt{2P_0 G_n}}{2R^2} g_n(\varphi, \theta) (\bar{x}^0 + i\bar{y}^0) \sqrt{\sigma} \times \\ &\times \dot{u} \left( t - \frac{1}{c} \int_0^{2R(t)} \frac{dr}{n_1(r)} \right) \times \exp \left\{ j \left[ \omega_0 t - \frac{\omega_0}{c} \int_0^{2R(t)} n_1(r) dr + \Delta\varphi_1 \right] \right\}, \\ \dot{E}_{2np}(t) &= \frac{\sqrt{2P_0 G_n}}{2R^2} g_n(\varphi, \theta) (i\bar{x}^0 + \bar{y}^0) \sqrt{\sigma} \times \\ &\times \dot{u} \left( t - \frac{1}{c} \int_0^{2R(t)} \frac{dr}{n_2(r)} \right) \times \exp \left\{ j \left[ \omega_0 t - \frac{\omega_0}{c} \int_0^{2R(t)} n_2(r) dr + \Delta\varphi_1 \right] \right\}. \end{aligned}$$

Антенна с круговой поляризацией левого вращения примет сигнал  $\dot{E}_{1np}(t)$ , а антенна с круговой поляризацией правого вращения примет сигнал  $\dot{E}_{2np}(t)$ . Напряжения  $u_{1,2}(t)$ , создаваемые сигналами  $\dot{E}_{1,2}(t)$  на входе согласованных фильтров, записываются в виде:

$$\begin{aligned} u_{1,2}(t) &= \frac{k\sqrt{\sigma}}{R^2} \operatorname{Re} \left\{ u \left( t - \frac{1}{c} \int_0^{2R(t)} \frac{dr}{n_{1,2}(r)} \right) \times \right. \\ &\times \exp \left[ j \left( \omega_0 t - \frac{\omega_0}{c} \int_0^{2R(t)} n_{1,2}(r) dr + \Delta\varphi_1 + \frac{\pi}{2} \right) \right] \left. \right\}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{где } k = \sqrt{\frac{P_0 G_{1np} G_{1n} \lambda^2}{(4\pi)^3}} \cdot g_n(\varphi, \theta) g_{np}(\varphi, \theta).$$

Положим  $n_{1,2}=1$  в  $\dot{u}(t)$ . Это означает, что пренебрегаем добавкой к групповому запаздыванию и фазо-частотными искажениями сигнала, обусловленными ионизированной средой. Зависимостью  $R$  от времени в  $\dot{u}(t)$  также пренебрегаем, т. е. считаем, что закон внутриимпульсной модуляции не изменится при отражении импульса от цели. Движение цели будем учитывать лишь при анализе фазы принятого сигнала. С учетом сделанных допущений, находим напряжения  $z_{1,2}(t)$  на выходе фильтров:

$$\begin{aligned} z_{1,2}(t) &= \frac{1}{2} C_1 T_{\text{эф}} \cdot \frac{k\sqrt{\sigma}}{R^2} |\psi(t-t_0-\tau, \Omega)| \times \\ &\times \cos \left[ \omega_0(t-t_0) - \frac{\omega_0}{c} \int_0^{2R} n_{1,2}(r) dr + \Delta\varphi_1 + \frac{\pi}{2} + \Omega \frac{2R}{c} \right], \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\tau = \frac{2R}{c}$  – запаздывание сигнала;  $\Omega = \frac{2\omega_0}{c}$  – доплеровское смещение частоты сигнала.

Сигнал  $z_2(t)$  далее поступает на управляемый фазовращатель. Фаза сигнала  $z_2(t)$  при этом изменяется на величину  $2\varphi_0$ . Затем сигналы  $z_{1,2}(t)$  суммируются.

В результате суммирования получаем сигнал  $W(t)$  следующего вида:

$$\begin{aligned} W(t) &= C_1 T_{\text{эф}} \cdot \frac{k\sqrt{\sigma}}{R^2} |\psi(t-t_0-\tau, \Omega)| \times \\ &\times \cos \left[ \omega_0(t-t_0) - \omega_0\tau + \Delta\varphi_1 + \frac{\pi}{2} \Omega\tau + \varphi_0 \right] \cos \left[ \varphi_0 - \Phi(\tau) \right], \end{aligned}$$

где  $\Phi(\tau)$  – угол поворота плоскости поляризации линейно-поляризованного сигнала из-за эффекта Фарадея при распространении последнего в ионизированной среде до цели и обратно,

$$\Phi(\tau) = \frac{\omega_0}{2c} \int_0^{2R} [n_1(r) - n_2(r)] dr.$$

Рассмотренная часть схемы рис. 1 является линейной. Поэтому для случая, когда цель состоит из «m» элементов, суммарный сигнал на входе детектора может быть найден, как сумма элементарных сигналов:

$$\begin{aligned} W_{\Sigma}(t) &= C_1 T_{\text{эф}} \sum_{e=1}^m \frac{k_e \sqrt{\sigma_e}}{R_e^2} \cdot |\psi(t-t_0-\tau_e, \Omega_e)| \times \\ &\times \cos \left[ \omega_0(t-t_0-\tau_e) + \Delta\varphi_e + \frac{\pi}{2} + \Omega_e \tau_e + \varphi_0 \right] \cos \left[ \varphi_0 - \Phi(\tau_e) \right], \end{aligned}$$

где  $e$  – номер элемента.

После детектирования  $W_{\Sigma}(t)$  квадратичным детектором и фильтрации гармоник с удвоенными частотами получаем:

$$\begin{aligned} u_{\text{дет}}(t) &= \frac{(C_1 T_{\text{эф}})^2}{2} \sum_{e=1}^m \frac{k_e^2 \sigma_e}{R_e^4} \cdot |\psi(t-t_0-\tau_e, \Omega)|^2 \times \\ &\times \cos^2 \left[ \varphi_0 - \Phi(\tau_e) \right] + \frac{(C_1 T_{\text{эф}})^2}{2} \cdot \sum_{i=1}^m \frac{k_e k_i \sqrt{\sigma_e \sigma_i}}{R_e^2 R_i^2} \times \\ &\times |\psi(t-t_0-\tau_e, \Omega_e)| |\psi(t-t_0-\tau_i, \Omega_i)| \times \\ &\times \cos \left[ \varphi_0 - \Phi(\tau_i) \right] \cos \left[ \varphi_0 - \Phi(\tau_e) \right] \times \\ &\times \cos \left[ \Omega_e \tau_e - \Omega_i \tau_i + \omega_0(\tau_i - \tau_e) + \Delta\varphi_e - \Delta\varphi_i \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

Из (6) следует, что в случае, когда фазовращатель отслеживает изменение по дальности угла поворота плоскости поляризации сигнала в ионосфере ( $\varphi_0 = \Phi(t)$ ), то помеховые сигналы ослабляются.

Для примера рассмотрим работу схемы рис. 1 в случае, когда лоцируют двухэлементную цель. Как следует из (6) в момент времени  $t=t_0+\tau$  сигнал от первого элемента цели будет максимален, а сигнал от второго элемента (помеховый сигнал) будет ослаблен в величину  $\cos^2[\Phi(\tau_2)-\Phi(\tau_1)]$ . При этом также будет ослаблен и интерференционный член в (6). В момент времени  $t=t_0+\tau_2$  сигнал от второго элемента цели будет проходить на вход блока оценки дальности без ослабления, а сигнал от первого элемента цели будет ослабляться в величину  $\cos^2[\Phi(\tau_1)-\Phi(\tau_2)]$ . При  $\Delta\Phi = \Phi(\tau_2) - \Phi(\tau_1) = \frac{\pi}{2}$  в схеме рис. 1 происходит полное подавление мешающего сигнала.

Для  $m$  – елементарної цілі в момент часу  $t = \tau_i$  максимальний сигнал, відбитий від  $i$ -ї цілі, інші (помехові) сигнали будуть ослаблені в величину  $\cos^2[\Phi(\tau_j) - \Phi(\tau_i)]$ . Будуть ослаблені також і інтерференційні члени.

Для оцінки ефективності пристрою подавлення помехових сигналів (рис. 1) проводився розрахунок очікуваних значень  $\Delta\Phi$  в іоносфері. При оцінці  $\Delta\Phi$  враховувалося, що розмір області простору, зайнятого багаторічковою космічною ціллю, порядку 160÷320 км вздовж траєкторії польоту і в діаметрі 40÷50 км, а відстань  $\Delta R$  між елементами цілі порядку декількох десятків кілометрів. Розрахунок  $\Delta\Phi$  проводився применливо до робочої частоти 150 МГц. Результати розрахунок  $\Delta\Phi$  наведені в табл. 1 (для  $\Delta R = 40$  км і довільної складової напруженості геомагнітного поля  $H_L = 20$  а/м).

Таблиця 1  
Результати розрахунок  $\Delta\Phi$

Активність Сонця	Час доби	Плаз. частота $f_N$ , МГц	$\Delta\Phi$ , рад.
Максимальна	Утро	6,8÷10,4	1,5÷3,5
	Полдень	8,3÷13,6	2,5÷6
	Полночь	5,5÷14,1	1÷6,5
Середня	Утро	5,5÷7,8	1÷2
	Полдень	6,8÷10,4	1,5÷3,5
	Полночь	3,0÷5,5	0,5÷1
Мінімальна	Утро	3,9÷4,5	0,5÷0,65
	Полдень	4,8÷5,5	0,75÷1
	Полночь	2,8÷3,9	0,25÷0,5

З табл. 1 видно, що робота розглянутого пристрою буде ефективною лише в тому випадку, коли концентрація електронів іонізованої середовища достатньо велика (плазменная частота  $f_N \sim 8 \div 10$  МГц), робоча частота  $f_0$  достатньо низька ( $f_0 \sim 100 \div 200$  МГц), а відстань між елементами

СБЦ велика ( $\Delta R \sim 40 \div 50$  км). Якщо ці умови не виконані, то в схемі рис. 1 будуть ослаблені лише сигнали від «дальніх» елементів багаторічкової космічної цілі.

При впливі на іонізовану середовищу потужними джерелами природного і штучного характеру концентрація електронів суттєво збільшується (на 2÷3 порядки). Тому відстань  $\Delta R$  між елементами багаторічкової космічної цілі, при якій в схемі рис. 1 будуть подавлятися помехові сигнали, зменшується.

## Висновки

Поляризаційні відмінності між корисними і помеховими сигналами, зумовлені іонізованою середовищу, практично не залежать від виду зондування сигналу і визначаються робочою частотою і параметрами іонізованої середовища. Тому запропонований пристрій можна застосовувати як при випромінюванні вузькополосних сигналів, так і при випромінюванні широкополосних сигналів.

## Список літератури

1. Справочник. Радиоэлектронные системы / под ред. Я.Д. Ширмана. – М., Радиотехника, 2007. – 510 с.
2. Карлов В.Д. Теория и техника генерирования, излучения и приема радиолокационных сигналов. Распространение радиоволн / В.Д. Карлов. – ВИРТА ПВО, 1986. – 120 с.
3. Распознавание целей при многочастотной радиолокации: моногр. / Е.Л. Казаков, В.Б. Бзот, Д.Г. Васильев, А.Е. Казаков, А.И. Коваленко; под ред. Е.Л. Казакова. – Х., 2007. – 188 с.

Поступила в редакцию 30.06.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

## ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЇ ПРО СЕРЕДОВИЩЕ ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВІМІРУ ДАЛЬНОСТІ ДО ЕЛЕМЕНТІВ СКЛАДНОЇ БАЛІСТИЧНОЇ ЦІЛІ

В.Д. Карлов, А.М. Черний, О.В. Бесова

У статті розглядається можливість використання поляризаційних відмінностей між елементами складної балістичної цілі, зумовленої середовищем поширення радіохвиль для підвищення точності виміру дальності до елементів складної балістичної цілі. Запропонований пристрій, що реалізує таку можливість. Оцінена ефективність його роботи стосовно умов локації елементів в складній балістичній цілі в середньопівнічній іоносфері. Сформульовані межі застосовності розглянутого в статті пристрою.

**Ключові слова:** складна балістична цілі, середньопівнічна іоносфера, вимір дальності, погоджений фільтр, керований фазоврацатель.

## USE OF INFORMATION ABOUT ENVIRONMENT OF DISTRIBUTION OF RADIO WAVES FOR INCREASE OF EXACTNESS OF MEASURING OF DISTANCE TO ELEMENTS OF DIFFICULT BALLISTIC AIM

V.D. Karlov, A.M. Cherny, O.V. Besova

In the article possibility of the use of polarization distinctions is examined between the elements of difficult ballistic aim, conditioned by the environment of distribution of radio waves for the increase of exactness of measuring of distance to the elements of difficult ballistic aim. A device, realizing such possibility, is offered. Efficiency of his work is appraised as it applies to the terms of location of elements in a difficult ballistic aim in a middle-latitude ionosphere. The borders of applicability of the device considered in the article are formulated.

**Keywords:** difficult ballistic aim, middle-latitude ionosphere, measuring of distance, concerted filter, guided phase changer.