

УДК 621.396.96

Р.Ю. Кольцов<sup>1</sup>, Е.С. Ленков<sup>2</sup>, В.Н. Лоза<sup>1</sup><sup>1</sup> Военный институт Киевского национального университета имени Тараса Шевченко, Киев<sup>2</sup> Военный институт телекоммуникации и информатизации НТУУ «КПИ», Киев

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАДИОЛОКАЦИИ ЦЕЛЕЙ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ФИЛЬТРОВ СЕЛЕКЦИИ

Рассматривается влияние интерференции сигналов при двулучевом распространении радиоволн при малых углах места цели на информационные характеристики радиолокационной станции (РЛС). Представлены результаты синтеза системы пространственной селекции переотражённого сигнала методом ортогонального проектирования и оценки его эффективности по сравнению с оптимальным алгоритмом.

**Ключевые слова:** радиолокационная станция, фильтр-проектор, маловысотная цель.

### Введение и постановка задачи

Задача радиолокации целей с малыми углами места носит проблемный характер в силу целого ряда физических факторов, значительно снижающих возможности обнаружения и измерения параметров таких целей. Кроме влияния кривизны земной поверхности, к таким факторам относится отражения полезного сигнала от поверхности. Отражения, создающие пассивную помеху, достаточно эффективно устраняются современными цифровыми системами селекции движущихся целей. Другим фактором, снижающим качество обнаружения и измерения, является интерференция прямого и переотражённого поверхностью сигналов (так называемого сигнала «антипода»). Последнее создаёт сильную изрезанность диаграммы направленности (ДН), особенно на углах места, меньших  $\lambda/8h_a$  ( $\lambda$  – длина волны,  $h_a$  – высота подъёма фазового центра антенны). При этом кроме возникновения интерференционных потерь при обнаружении, существенно затрудняется измерение угла места целей классическим методом (по максимуму) и, вследствие этого качество определения высоты.

Иллюстрация фрагмента зоны видимости для одного из образцов РЛС обнаружения маловысотных целей с высокими характеристиками (19Ж6) приведена на рис. 1.

Для уменьшения степени влияния интерференции на качество обнаружения-измерения целей с малыми углами места в отдельных РЛС применяют многоэтажные антенные системы. Однако подобный способ имеет низкую эффективность повышения качества измерения угла места, так как влияние на результат интерференции зависит от позиции вокруг РЛС и не обеспечиваются возможности оперативно-

го изменения положений интерференционных провалов в зоне видимости РЛС.

Кардинальной мерой повышения качества обнаружения-измерения при двулучевом распространении радиоволн является устранение или существенное уменьшение влияния переотражённого сигнала на изрезанность ДН за счёт применения новых алгоритмов пространственно-временной обработки в РЛС с антенной типа линейной антенной решётки (ЛАР), обеспечивающих угловую селекцию мешающего сигнала «антипода».

Таким образом, целью статьи является теоретическое обоснование метода и алгоритма системы пространственной фильтрации на основе режекторных фильтров-проекторов и оценка эффективности его применения.

### Основные положения исследования

#### Метод синтеза системы обработки

Классические методы синтеза по заданному критерию качества (Неймана-Пирсона, максимального правдоподобия и др.) в качестве математической базы используют теорию статистических решений. Оптимальные алгоритмы обнаружения, полученные на основе классических методов синтеза,

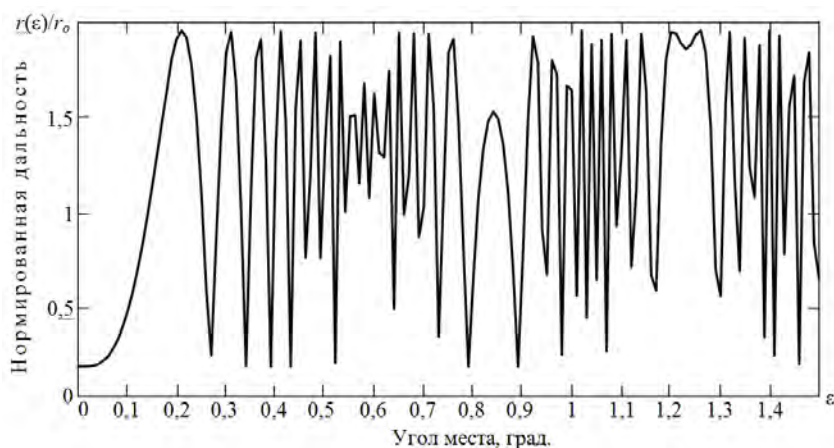


Рис. 1. Фрагмент зоны видимости радиолокационной станции 19Ж6

в ряде случаев оказываются трудно реализуемыми на практике. К таким случаям относится алгоритм построения адаптивных многоканальных обнаружителей [1], реализация которого требует наличия больших вычислительных ресурсов системы обработки в связи с вычислением обратной корреляционной матрицы помеховых сигналов.

Последнее время характеризуется интенсивным проникновением идей и методов функционального анализа (ФА) в различные области технических приложений. Применение методов ФА в теории радиолокационных систем было стимулировано появлением работы [2]. Теоремы и положения ФА в применении к пространству сигналов являются плодотворными в решении задач синтеза систем пространственно-временной обработки. Первой публикацией применения методов ФА для синтеза обнаружителей является статья [3].

Метод синтеза предполагает решение задачи представления произвольного аналогового сигнала  $\mathbf{u} \in L^2(T)$  с ограниченной энергией её численным эквивалентом в пространстве  $C^n$ . Если обозначить через  $M_n$  линейное подпространство, натянутое на систему независимых функций  $\Phi = \{\varphi_i; i = 1, 2, \dots, n\}$  в  $L^2(T)$ , то сигнал, принадлежащий  $M_n$ , может быть единственным образом представлен в виде линейной комбинации:

$$x(t) = \sum \alpha_i \varphi_i(t); x \in M_n; t \in T. \quad (1)$$

Набор  $\alpha_i$  образует искомое представление в  $C^n$ .

Особенность решаемой задачи синтеза заключается в том, что принятый сигнал не принадлежит подпространству  $M_n$ . Поскольку  $L^2(T)$  метрическое пространство можно поставить в соответствие произвольному вектору  $\mathbf{u}$ , принадлежащему  $M_n$ , вектор  $\hat{\mathbf{u}}$ , наиболее близкий к  $\mathbf{u}$ . Такая процедура основана на применении теоремы ортогонального проектирования [2].

Теорема: для любого вектора  $\mathbf{u} \in L^2(T)$  существует единственный вектор  $\hat{\mathbf{u}}$  в  $M_n$ , задаваемый разложением:

$$\hat{\mathbf{u}} = \sum_{i=1}^n (\mathbf{u}, \varphi_i) \varphi_i, \quad (2)$$

такой, что разность  $(\mathbf{u} - \hat{\mathbf{u}})$  ортогональна ко всем векторам из  $M_n$  и выполняется условие:  $\|\mathbf{u} - \hat{\mathbf{u}}\| < \|\mathbf{u} - \tilde{\mathbf{u}}\|$ , где  $\tilde{\mathbf{u}}$  – любой другой вектор в  $M_n$ .

Здесь совокупность функций  $\{\varphi_i; i = 1, 2, \dots, n\}$  представляет собой взаимный базис, соответствующий условию:

$$(\varphi_i, \varphi_j) = \delta_{i,j}. \quad (3)$$

Выполнение условия (3) доказывает, что

$\|\mathbf{u} - \hat{\mathbf{u}}\|$  есть минимальная норма для всех  $\|\mathbf{u} - \tilde{\mathbf{u}}\|$ .

Величина  $\hat{\mathbf{u}}$  называется ортогональной проекцией  $\mathbf{u}$  на подпространство  $M_n$ . Точность приближения оценивается величиной разности  $(\mathbf{u} - \hat{\mathbf{u}})$ , которая численно определяется её нормой. Как показано в [2], учитывая свойство сепарабельности пространства  $L^2(T)$ , ортогональное проектирование позволяет получить сколь угодно близкую аппроксимацию при достаточном большом  $n$ .

*Выбор базиса проектирования.* Сложность технической реализации алгоритма обработки сигналов, в частности, объём вычислительных операций, зависит от выбора базиса проектирования. С этой точки зрения одной из наилучших систем базисных функций является множество (подпространство) ожидаемых сигналов. Такому требованию наиболее удовлетворяет базис, описываемый матрицей, определяющей амплитудно-фазовое распределение сигнального поля в раскрыве ЛАР:

$$\mathbf{V}_o = [\mathbf{v}_{o1}, \mathbf{v}_{o2}, \dots, \mathbf{v}_{oM}], \quad (4)$$

где  $\mathbf{v}_{ok}$  – оценочный вектор с элементами:

$$\mathbf{v}_{ok}^M = \exp(j(M-1)\varphi_{ok}); \quad \varphi_{ok} = 2\pi d / \lambda \sin \beta_{ok}, \quad (5)$$

при этом оценочный вектор представляется в виде:

$$\mathbf{U}_c^{\wedge} = \mathbf{V} \cdot \mathbf{u}_1^{\wedge}, \quad (6)$$

где  $\mathbf{u}_1^{\wedge}$  – оценочный вектор-столбец сигнала цели на выходе первого приёмного канала.

Решение при подстановке (5), как показано в [4], (применение теоремы ортогонального проектирования для синтеза системы «сверхразрешения») имеет вид:

$$\mathbf{U}_c^{\wedge} = \mathbf{V}(\mathbf{V}^H \mathbf{V})^{-1} \mathbf{V}^H \mathbf{U}. \quad (7)$$

В правой части равенства (7) выделим выражение, соответствующее, фильтру-проектору, который обозначим  $\mathbf{P}_{rM}^{\wedge}$  и будем называть матричным фильтром-проектором (МФП).

$$\mathbf{P}_{rM}^{\wedge} = \mathbf{V}(\mathbf{V}^H \mathbf{V})^{-1} \mathbf{V}^H, \quad (8)$$

где  $M$  – число источников сигналов (для задачи селекции сигнала «антипода»  $M = 1$ ).

Задача режекции переотражённого сигнала требует применения вместо согласованного пространственного фильтра-проектора (ПФП) ортогонального проектора, характеристика которого на основании свойств проекторов [5] определяется выражением (для  $i$ -го сигнала):

$$\mathbf{P}_{r\perp 1} = (\mathbf{I} - \mathbf{P}_{r1}). \quad (9)$$

где  $\mathbf{I}$  – единичная матрица.

Поскольку угловая координата переотражённого сигнала по модулю равна углу места цели, то режекторный ПФП перестраивается опорным сигналом.

### Оценка интерференционных потерь в РЛС с угловой селекцией переотражённого сигнала

Степень подавления мешающих сигналов адаптивной системой компенсации помех ( $K_{\Pi}$ ), построенной по строго оптимальному алгоритму пространственно-временной обработки в многоканальной системе приёма, определяется коэффициентом корреляции помехи  $\rho$  в соответствии с известным выражением:

$$K_{\Pi} = 1 / (1 - \rho^2).$$

В рассматриваемой задаче полезный и переотражённый сигналы не только коррелированы, но также являются когерентными, поэтому оптимальная система адаптивной защиты имеет очень высокую степень подавления сигнала «антипода» (но, как было указано выше, трудно реализуема по вычислительным ресурсам при обработке в реальном масштабе времени). Оценку эффективности предложенного квазиоптимального углового селектора на основе ПФП проведём путём анализа потерь по сравнению с оптимальным алгоритмом.

При этом будет иметь место та часть интерференционных потерь, которая обусловлена ослаблением плотности потока мощности зондирующего сигнала РЛС в точке нахождения цели и потери за счёт пространственного режекторного фильтра (ПРФ).

Для оценки предельных возможностей следует положить, что в состав мешающей помехи входит только сигнал цели, переотражённый поверхностью Земли. Если ПРФ настроен на режекцию сигнала, переотражённого поверхностью Земли, то будем иметь:

$$L_{\text{угл реж пер сигн}} = 1 / (1 - \Gamma_{01}^2), \quad (10)$$

где  $L_{\text{угл реж пер сигн}}$  – коэффициент потерь, обусловленный использованием в РЛС обнаружения пространственного режекторного фильтра для рекации переотражённого от Земли сигнала.

К ПРФ переотражённого сигнала цели не предъявляются жесткие требования к точности «настройки». Это обстоятельство можно использовать для снижения интерференционных потерь при больших дальностях до маловысотных целей за счёт увеличения соответствующих потерь при малых (по сравнению с дальностью прямой видимости) дальностях.

На рис. 2 изображены графики, иллюстрирующие зависимость потерь в отношении сигнал/шум, обусловленных ПРФ, от дальности до цели при угловой селекцией переотражённого от Земли сигнала цели.

Зависимости, приведенные на рис. 2, соответствуют следующим исходным данным: Земля «плоская»,  $h_{\text{max}}=20$  м,  $\lambda=5$  см,  $N=200$ ,  $\delta=0,95$ , ПРФ настроен «точно» (кривая 1); ПРФ настроен на режекцию переотражённого сигнала, приходящего под углом места  $\varepsilon = -(\varepsilon_{\text{ц}} + 0,6\varepsilon_{0,5\rho})$ , отличным от угла места, равного  $\varepsilon = -\xi$  (кривая 2).

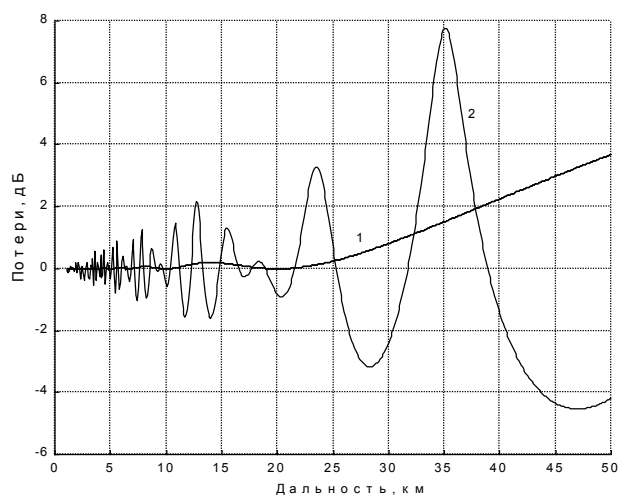


Рис. 2. Потери при угловой рекации переотражённого от Земли сигнала ( $\varphi_0 = \xi$ ,  $H_0 = 100$  м)

Видно, что при расстройке ПРФ существенно снижаются интерференционные потери при больших дальностях и увеличиваются потери при малых дальностях.

Например, если при точно настроенном ПРФ потери за счёт ПРФ при дальности до цели 50 км равны примерно 4 дБ, то при расстройке ПРФ потери на дальности 50 км становятся отрицательными, а на дальности 35 км увеличиваются до 8 дБ.

### Вывод

Увеличение потерь при дальности до цели 35 км практически полностью компенсируются увеличением исходного отношения сигнал/шум (при уменьшении дальности до цели с 50 км до 35 км исходное отношение сигнал/шум увеличивается на 6,2 дБ).

### Список литературы

1. Ширман Я.Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я.Д. Ширман, В.Н. Манжос. – М.: Радио и связь, 1981. – 328 с.
2. Френкс Л. Теория сигналов: Пер. с англ. / Л. Френкс. – М.: Мир, 1974. – 134 с.
3. Бондаренко Б.Ф. Применение методов функционального анализа для решения задачи синтеза системы пространственной обработки / Б.Ф. Бондаренко, В.П. Прокофьев // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – М., 1982. – Т. 25, № 3. – С. 15-23.
4. Бондаренко Б.Ф. Оценка состава групповой сосредоточенной цели методом пространственной фильтрации с помощью совокупности матричных фильтров-проекторов / Б.Ф. Бондаренко, В.П. Долгушин, В.Н. Осына, В.Н. Лоза // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К., 2012. – № 35. – С. 20-25.
5. Воеводин В.В. Матрицы и вычисления / В.В. Воеводин, Ю.А. Кузнецов. – М.: Наука, 1984. – 320 с.

Поступила в редколлегию 13.12.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Д. Карлов, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РАДІОЛОКАЦІЇ ЦІЛЕЙ В ПРИЗЕМНОМУ ШАРІ  
НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ ПРОСТОРОВИХ ФІЛЬТРІВ СЕЛЕКЦІЇ**

Р.Ю. Кольцов, Є.С. Ленков, В.М. Лоза

*Розглядається вплив інтерференції сигналів при двопробному розповсюдженні радіохвиль при малих кутах місця цілі на інформаційні характеристики радіолокаційної станції (РЛС). Представлено результати синтезу системи просторової селекції перевідбитого сигналу методом ортогонального проектування та оцінки його ефективності в порівнянні з оптимальним алгоритмом.*

**Ключові слова:** радіолокаційна станція, фільтр-проектор, маловисотна ціль.

**INCREASE OF EFFICIENCY OF RADIO-LOCATION OF AIMS IN THE GROUND LAYER  
ON BASIS OF APPLICATION OF SPATIAL FILTERS OF SELECTION**

R.Yu. Koltsov, Ye.S. Lenkov, V.N. Loza

*The influence of interference signals in two beam propagation at small angles to the information of the target performance radar (SAR). The results of the synthesis of spatial selection Backlight signal by orthogonal design and evaluation of its effectiveness in comparison with the optimal algorithm.*

**Keywords:** radar station, filter projector, low-altitude target.