

УДК 621.396.96

АДАПТИВНЫЙ АМПЛИТУДНЫЙ МОНОИМПУЛЬСНЫЙ ПЕЛЕНГАТОР С ПОЛНЫМ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫМ ПРИЕМОМ

КУЗЬМИЧЕВ Н. К.

*Военная академия Республики Беларусь
(г. Минск, Республика Беларусь)*

E-mail: kolya.kuzmichev.82@mail.ru

Аннотация. Синтезирован адаптивный амплитудный моноимпульсный пеленгатор с полным поляризационным приемом, отличающийся наличием дополнительного канала формирования невязки и схемы адаптации к поляризации принятого сигнала, что позволило устранить искажение дискриминационной характеристики при воздействии кросс-поляризационных помех. Проведен сравнительный анализ показателей качества предложенного устройства и ранее известных.

Abstract. An adaptive amplitude monopulse direction finder with full polarization reception is synthesized, characterized by the presence of an additional channel for the formation of a residual and a circuit for adapting to the polarization of the received signal, which made it possible to eliminate the distortion of the discriminatory characteristic when exposed to cross-polarization interference. A comparative analysis of the quality indicators of the proposed device and previously known ones is carried out.

Введение и постановка задачи

Для радиоэлектронного подавления (РЭП) амплитудных моноимпульсных пеленгаторов (АМП) сопровождения все чаще применяются имитирующие кросс-поляризационные помехи [1]. Воздействие кросс-поляризационных помех на АМП приводит к искажению дискриминационной характеристики следящих измерителей угловых координат. В результате этого измерение угловых координат носит нерегулярный характер, что приводит к появлению систематической ошибки.

Имитирующая ответно-импульсная кросс-поляризационная помеха (ОИП КП) представляет собой радиоимпульс, имеющий поляризацию, ортогональную рабочей поляризации антенной системы АМП. Рассмотрим ОИП КП, в которой вектор временных параметров соответствует вектору временных параметров отраженного сигнала. Такая ситуация представляет наибольшую угрозу для пеленгатора по причине отсутствия временных признаков селекции сигнала на фоне помехи. При этом будем считать, что во всех элементах дальности, в которых отсутствует отраженный сигнал селекция помех в принятом сигнале осуществляется по временным признакам. Способы селекции имитирующих помех по временным признакам подробно описаны в [2] и в данной статье не рассматриваются.

Основным отличительным признаком кросс-поляризационной помехи является ее поляризация [3]. Поляризационные отличия сигнала и помехи позволят проводить адаптацию измерителя угловых координат к поляризации принятого сигнала. Таким образом актуальным является статистический синтез адаптивного амплитудного моноимпульсного пеленгатора с полным поляризационным приемом и селекцией кросс-поляризационных помех.

Статистический синтез адаптивного амплитудного моноимпульсного пеленгатора с полным поляризационным приемом

Извлечение поляризационных параметров электромагнитных волн в большинстве существующих моноимпульсных пеленгаторах не возможно, поэтому рассмотрим перспективный моноимпульсный пеленгатор с полным поляризационным приемом. Прием сигнала на согласованной поляризации осуществляется основным каналом, на кроссовой – дополнительным. Приемные каналы являются идентичными, но ортогональными по поляризации. После обнаружения цели, радиолокатор переходит на ее сопровождение.

В таком случае, принятый сигнал $\mathbf{f}(t)$ представляет собой аддитивную смесь отраженного сигнала $\mathbf{m}(t)$, кросс-поляризационной помехи $\mathbf{m}_{\text{кр}}(t)$ и внутреннего шума приемника $\mathbf{h}(t)$

$$\mathbf{f}(t) = \mathbf{m}(t) + \mathbf{m}_{\text{кр}}(t) + \mathbf{h}(t). \quad (1)$$

Введем дискретный параметр \mathcal{G}_i , характеризующий условия проведения радиолокационного наблюдения. Значению \mathcal{G}_1 соответствует согласованный прием \mathcal{G}_2 – кроссполяризационный. С учетом введенного обозначения представим

$$\mathbf{f}(t) = \|f(t, \mathcal{G}_1) \quad f(t, \mathcal{G}_2)\|. \quad (2)$$

На k -ом интервале наблюдения измеритель радиолокатора формирует оценку угловых координат. Будем считать что измерение угловых координат в плоскости азимута $\hat{\beta}_k$ и угла места $\hat{\varepsilon}_k$ осуществляется независимо, а взаимное влияние каналов измерения угловых координат отсутствует. В дальнейшем будем рассматривать обобщенную угловую координату θ_k и ее оценку $\hat{\theta}_k$, зависящую от поляризации принятого сигнала. Оценку угловой координаты, полученную на согласованной поляризации будем обозначать $\hat{\theta}_k^c$, а на кроссовой $\hat{\theta}_k^k$. Безусловную оценку угловой координаты будем отображать в виде вектора

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_k = \|\hat{\theta}_k^c \quad \hat{\theta}_k^k\| = \|\hat{\theta}_k(\mathcal{G}_1) \quad \hat{\theta}_k(\mathcal{G}_2)\|. \quad (3)$$

Для оптимизации измерителя использовался байесовский подход к оценке параметров распределений. В качестве критерия синтеза устройства использовался минимум апостериорного риска \bar{R}_{ps} совместного измерения вектора состояния и селекции кросс-поляризационных помех в принятом сигнале с простой функцией стоимости принятия решения о воздействии помехи и квадратичной функции потерь для задачи измерения угловой координаты. Вопросу селекции кросс-поляризационной помехи в принятом сигнале будет посвящена отдельная статья. Оптимальная оценка вектора состояния $\hat{\boldsymbol{\theta}}_{k+1}$ вычисляется в соответствии с правилом [4]:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_{k+1} = \sum_{i=1}^2 P(\mathcal{G}_i | \mathbf{f}'_{k+1}) \hat{\boldsymbol{\theta}}_{k+1}(\mathcal{G}_i), \quad (4)$$

где $\hat{\boldsymbol{\theta}}_{k+1}(\mathcal{G}_i)$ – условная по поляризации оценка вектора состояния;

$$P(\mathcal{G}_i | \mathbf{f}'_{k+1}) = \frac{P(\mathcal{G}_i) \Lambda(\mathbf{f}'_{k+1} | \mathcal{G}_i)}{\sum_{i=1}^M P(\mathcal{G}_i) \Lambda(\mathbf{f}'_{k+1} | \mathcal{G}_i)} - \text{апостериорная вероятность } i\text{-й гипотезы о поляризации};$$

$$\Lambda(\mathbf{f}'_{k+1} | \mathcal{G}_i) = \frac{p(\mathbf{f}'_{k+1} | \mathcal{G}_i)}{p(\mathbf{f}'_{k+1} | \mathcal{G}_0)} - \text{обобщенное отношение правдоподобия при наличии принятой}$$

реализации \mathbf{f}'_{k+1} при условии према сигнала на i -ой поляризации;

$p(\mathbf{f}'_{k+1} | \mathcal{G}_0)$ – плотность распределения принятой реализации при условии отсутствия сигнала (гипотеза \mathcal{G}_0).

В следящих измерителях оценка вектора состояния формируется как функция невязки $\Delta \hat{\boldsymbol{\theta}}$ и априорного значения $\hat{\boldsymbol{\theta}}_0$. Как известно [4], для формирования оценки вектора состояния, используются

приемники, вырабатывающие логарифм условного отношения правдоподобия $\ln \Lambda(\mathbf{f} | \hat{\theta}, \vartheta_i)$. Условное по оценке вектора состояния, но безусловное по поляризации отношение правдоподобия определяется:

$$\Lambda(\mathbf{f} | \hat{\theta}) = \sum_i \Lambda(\mathbf{f} | \hat{\theta}, \vartheta_i) P(\vartheta_i) = \sum_i \Lambda(\mathbf{f} | \hat{\theta}_i) P_i \quad (5)$$

После проведения преобразований был получен алгоритм работы дискриминатора с полным поляризационным приемом

$$D(\Delta \hat{\theta}) = \frac{\operatorname{Re} \sum_{i=1}^2 \left[P(\vartheta_i) S'(\mathbf{f} | \hat{\theta}_0, \vartheta_i) S^*(\mathbf{f} | \hat{\theta}_0, \vartheta_i) \right]}{\sum_{i=1}^2 \left[P(\vartheta_i) |S(\mathbf{f} | \hat{\theta}_0, \vartheta_i)|^2 \right]}. \quad (6)$$

Выражению (6) соответствует двухканальный дискриминатор, каждый канал которого формирует условную по поляризации невязку. Объединение каналов осуществляется в весовом сумматоре.

Для разработки алгоритма работы амплитудного моноимпульсного пеленгатора с полным поляризационным приемом выразим $S(\mathbf{f} | \hat{\theta}_0, \vartheta_i)$ через комплексную диаграмму направленности $F(\Delta \theta_u, \vartheta_i) e^{j\phi(\Delta \theta_u, \vartheta_i)}$ и независящую от вектора пространственных параметров $S(t)$. После проведения преобразований и дифференцирования по невязке измерения угловой координаты для нахождения максимума, получим:

$$D(t, \Delta \hat{\theta}_u) = \frac{2 \operatorname{Re} \sum_{i=1}^2 \left[F(\Delta \theta_u, \vartheta_i) F'(\Delta \theta_u, \vartheta_i) + j \phi'(\Delta \theta_u, \vartheta_i) F^2(\Delta \theta_u, \vartheta_i) \right] |S(t, \vartheta_i)|^2 P(\vartheta_i)}{\sum_{i=1}^2 \left[P(\vartheta_i) |S(\Delta \theta_u, \vartheta_i)|^2 \right]}. \quad (7)$$

Полученный алгоритм работы моноимпульсного пеленгатора (7) является общим, на основе которого могут быть получены частные алгоритмы измерения угловой координаты: амплитудный, фазовый и амплитудно-фазовый. Алгоритм работы амплитудного моноимпульсного измерителя угловых координат получим при условии слабой зависимости фазовой диаграммы направленности от угловой координаты $\phi(\theta) \approx \text{const}$ ($\phi'(\theta) \approx 0$). Тогда выражение (7) можно представить в следующем виде:

$$D(t, \Delta \hat{\theta}_u) = \frac{2 \operatorname{Re} \sum_{i=1}^2 \left[F(\Delta \theta_u, \vartheta_i) S(t, \vartheta_i) F'(\Delta \theta_u, \vartheta_i) S^*(t, \vartheta_i) \right] P(\vartheta_i)}{\sum_{i=1}^2 \left[P(\vartheta_i) |S(\Delta \theta_u, \vartheta_i)|^2 \right]}. \quad (8)$$

Наличие производной, делает алгоритм (8) физически не реализуемым. Что требует перехода к квазиоптимальному алгоритму работы. Для этого представим производную функции $f(x)$ через конечные разности и получим:

$$D_{\text{ампл}}(t, \Delta \hat{\theta}) = \frac{2 \operatorname{Re} \sum_{i=1}^2 \left[F_{\Sigma}(\Delta \theta_u, \vartheta_i) S(t, \vartheta_i) F_{\Delta}(\Delta \theta_u, \vartheta_i) S^*(t, \vartheta_i) P(\vartheta_i) \right]}{\sum_{i=1}^2 \left[P(\vartheta_i) |S_{\Sigma}(\Delta \theta_u, \vartheta_i)|^2 \right]}, \quad (9)$$

где $F_{\Sigma}(\Delta \theta_u, \vartheta_i) = F(\theta_a + \delta, \vartheta_i) + F(\theta_a - \delta, \vartheta_i)$ – диаграмма направленности суммарного канала радиолокатора на i -ой поляризации;

$F_{\Delta}(\Delta \theta_u, \vartheta_i) = F(\theta_a + \delta, \vartheta_i) - F(\theta_a - \delta, \vartheta_i)$ – диаграмма направленности разностного канала радиолокатора на i -ой поляризации.

Структурная схема квазиоптимального адаптивного амплитудного моноимпульсного пеленгатора с полным поляризационным приемом, соответствующая алгоритму (9) и отличается от классической.

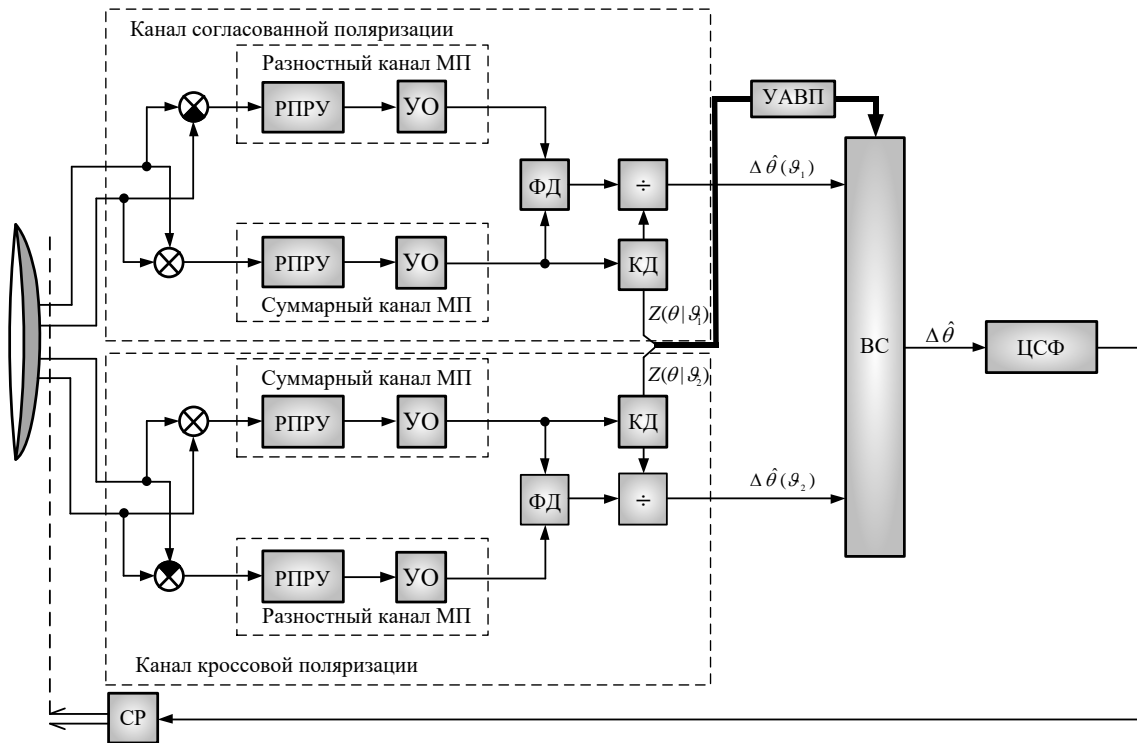


Рис. 1. Структурная схема квазиоптимального адаптивного амплитудного моноимпульсного пеленгатора с полным поляризационным приемом

Основными особенностями схемы (рис. 1.) является:

- двухканальное по поляризации построение;
- формирование в пространстве суммарной и разностных диаграмм направленности на двух взаимно ортогональных поляризациях;
- адаптация к поляризации принятого сигнала за счет весового суммирования условных по поляризации невязок измерения на весовом сумматоре (ВС);
- наличие устройства вычисления апостериорных вероятностей гипотез (УАВП) приема сигнала на i -ой поляризации.

Показатели качества адаптивного амплитудного моноимпульсного измерителя угловых координат с полным поляризационным приемом

Аналізу подвергався следящий амплитудный моноимпульсный измеритель угловых координат (ИУК). Структура измерителя при проведении модельных экспериментов не изменялась. Анализ показателей качества проводился для двух случаев:

- невязка измерения угловых координат формировалась в известном дискриминаторе с суммарно-разностной обработкой и перемножением;
- невязка измерения угловых координат формировалась в новом устройстве – адаптивном к поляризации дискриминаторе с полным поляризационным приемом.

В качестве показателей качества были выбраны вид и параметры дискриминационной характеристики.

Анализ показателей качества измерителя угловых координат

В ходе моделирования результаты усреднялись по 2000 опытным реализациям для обеспечения значения относительной погрешности не более 5% и доверительной вероятности не менее 0,95 [6].

Диапазон изменения рассогласования измеряемого параметра превышал ширину $2\Delta\theta_{0.5}$ суммарной диаграммы направленности пеленгатора. При определении вида и параметров дискриминационной характеристики рассогласование угловой координаты изменялось в диапазоне от θ_n до θ_k с шагом δ . Мощность шума $\sigma_{\text{ш}}^2$ принималась единичной. Отношение сигнал/шум $\gamma_{\text{с/ш}}$ и помеха/шум $\gamma_{\text{п/ш}}$ задавалось относительно единичной мощности шума.

Результаты модельного эксперимента по снятию дискриминационной характеристики амплитудного классического моноимпульсного пеленгатора на согласованной и кроссовой поляризациях представлены на рис. (2).

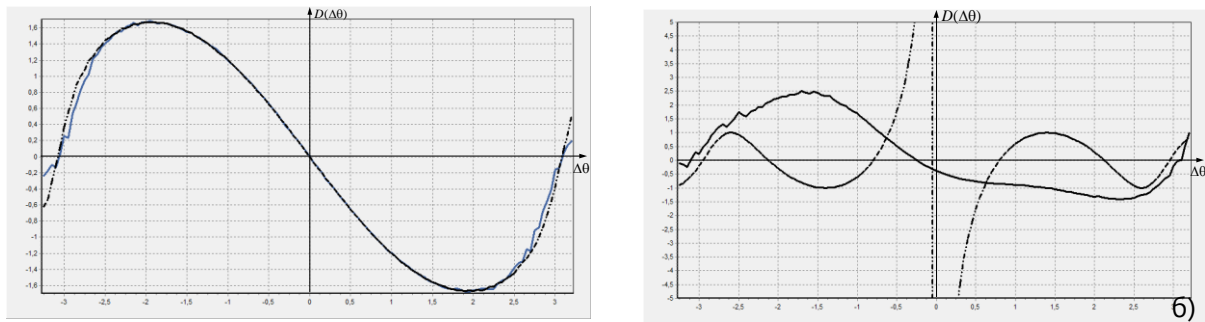


Рис.2. Дискриминационная характеристика моноимпульсного пеленгатора на согласованной (а) и кроссовой (б) поляризациях

Из рис. (2.а) видно, что на согласованной поляризации дискриминатор имеет дискриминационную характеристику классического вида. Нулевому рассогласованию параметра соответствует нулевой сигнал ошибки. Дискриминационная характеристика имеет ярко выраженный линейный участок. С ростом рассогласования в пределах линейного участка происходит рост сигнала ошибки. При смене знака рассогласования происходит смена знака сигнала ошибки.

На кроссовой поляризации (рис. 2.б) дискриминатор имеет дискриминационную характеристику, отличающуюся от классического вида. Нулевому рассогласованию параметра соответствует стремящийся к бесконечности сигнал ошибки. Дискриминационная характеристика не имеет ярко выраженного линейного участка. Вид дискриминационной характеристики существенно зависит от мощности помехи. Пунктирной линии на рисунке (2, б) соответствует характеристика, полученная при большей мощности помехи. При этом, на графике, соответствующем мощной помехе (изображен пунктирной линией) имеются два квазилинейных участка, сопровождение цели на которых возможно. При этом, возникает ошибка измерения угловых координат, среднее значение которой равно величине этих смещений. Такую ошибку будем называть систематической.

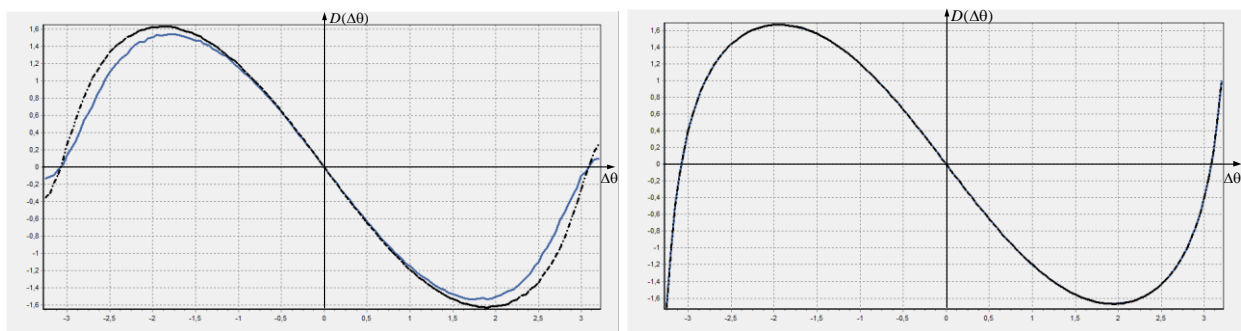


Рис. 3. Дискриминационная характеристика моноимпульсного пеленгатора с полным поляризационным приемом на согласованной (а) и кроссовой (б) поляризациях

Из рис. За видно, что на согласованной поляризации дискриминатор имеет дискриминационную характеристику классического вида. На кроссовой поляризации (рис. 3б) дискриминатор имеет дискриминационную характеристику классического вида. Весовое суммирование условных по поляризации невязок в соответствии с выражением (9) приводит к адаптации дискриминатора к поляризации принятого сигнала. Из-за отсутствия смещения равносигнального направления систематической ошибки измерения не возникает.

Выводы

Таким образом синтезирован адаптивный амплитудный моноимпульсный пеленгатор с полным поляризационным приемом, отличающийся учетом поляризационной структуры принятого сигнала, за счет чего устраняется зависимость формы и параметров дискриминационной характеристики от поляризации принятого сигнала. Весовое суммирование условных по поляризации невязок позволяет избавиться от влияния поляризации принятого сигнала на вид и параметры дискриминационной характеристики.

Список использованных источников

1. Куприянов, А. И. Радиоэлектронная борьба / А. И. Куприянов. – М. : Вузовская книга, 2013. – 360 с.
2. Гейстер, С.Р. Адаптивное обнаружение – распознавание с селекцией помех по спектральным портретам / С. Р. Гейстер. – Минск. Военная академия РБ, 2000. – 172 с.
3. Кузьмичев, Н. К. Анализ известных способов защиты моноимпульсных пеленгаторов от воздействия кросс-поляризационных помех / Н. К. Кузьмичев, С. А. Горшков, И. В. Чигирь, // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2018. – № 1 (58). – С. 44–51.
4. Трифионов, А. П. Совместное различение сигналов и оценка их параметров на фоне помех/ А. П. Трифионов, Ю. С. Шинаков. – М.: Радио и связь, 1986. – 264 с.: ил.
5. Горшков, С. А. Основы радиолокации. Конспект лекций. Ч.3 / С. А. Горшков, В. В. Латушкин, С. Ю. Седышев. – Минск. Военная академия РБ, 2016. – 175 с.
6. Косачев, И. М. Методики расчета показателей достоверности и точности оцениваемых тактико-технических характеристик вооружения, военной и специальной техники / И. М. Косачев, Д. С. Нефедов // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2015. – № 1 (46). – С. 107 – 134.