

УДК 621.396.96:534.853.6

СИНТЕЗ АЛГОРИТМА СОВМЕСТНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ-ОЦЕНИВАНИЯ ОТВЕТНОЙ ШУМОВОЙ ПОМЕХИ

ЧИГИРЬ И. В.

учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь»
(г. Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. В докладе для импульсно-доплеровских РЛС (ИД РЛС) сопровождения представлен синтез оптимального алгоритма обнаружения и измерения параметров протяженной по дальности коррелированной ответной шумовой помехи (ОШП), действующей в составе комбинированной имитирующей и маскирующей помехи (КИМ-помехи), оптимального по критерию минимума среднего риска. Использован байесовский двухэтапный подход к минимизации апостериорного риска, с применением простой функции потерь.

Abstract. The article for pulse-Doppler tracking radars presents a synthesis an optimal algorithm for detecting and measuring the parameters of a cover-pulse jamming (CPJ), acting as part of a combined simulating and masking interference, optimal according to the criterion of minimum average risk. A Bayesian two-stage approach to minimizing posterior risk is used, using a simple loss function.

Введение

Развитие средств радиоэлектронного подавления усложняет задачу помехозащиты (ПХЗ) ИД РЛС сопровождения от КИМ-помехи самоприкрытия [1 с. 55, 2 с. 587, 3 – 4]. КИМ-помеха самоприкрытия представляет собой аддитивную смесь уводящей по дальности и/или скорости помехи (УП) и протяженной по дальности коррелированной ОШП [4]. УП идентична по своей структуре с отраженным сигналом (ОС) и превосходит его не менее чем на 3–5 дБ на импульс, обеспечивая увод следящих систем по дальности и/или скорости. ОШП представляет собой шумоподобное колебание в полосе от 7 до 20 кГц относительно частоты Доплера сопровождаемой воздушной цели (ВЦ) [1, с. 154]. Она излучается в ответ на каждый принятый зондирующий импульс РЛС в течение времени, не превышающего периода повторения, обеспечивая маскирование ОС на определенном интервале частот и времени запаздывания. Согласованное по времени воздействие УП и ОШП с определенными энергетическими соотношениями [4] способствует фактически приумножению выигрыша по сравнению со случаем отдельного применения помех. Для сопровождения воздушной цели (ВЦ) - постановщика КИМ-помех и повышения точности наведения на нее управляемых ракет необходимо адаптировать следящие системы ИД РЛС к виду и параметрам такого рода помех.

Решение задачи совместного обнаружения-измерения

Согласно [12] оптимальное решение задачи совместного обнаружения-измерения предполагает поэтапную минимизацию выражения апостериорного риска [12]: сначала производится минимизация по переменной $\tilde{\alpha}_{\text{ОШП}}$ при фиксированном значении $A_{\text{ОШП}_i}^*$, а затем результат минимизируется по решениям $A_{\text{ОШП}_i}^*$ [12]. Результатом первого этапа минимизации апостериорного риска является выражение для формирования оптимальной оценки параметров ОШП.

Результирующая оценка $\hat{\alpha}_{\text{ОШП}}$ представляет собой аргумент апостериорной плотности вероятности $p(\alpha_{\text{ОШП}} | A_1)$, при котором последняя достигает максимума [12]

$$\hat{\alpha}_{\text{ОШП}} = \arg \max_{\alpha_{\text{ОШП}}} [p(\alpha_{\text{ОШП}} | \mathbf{f}, A_{\text{ОШП}_1}^*)]. \quad (1)$$

Усредненное ОП $\Lambda(\mathbf{f} | A_{\text{ОШП}})$ определяется выражением

$$\Lambda(\mathbf{f} | A_{\text{ОШП}}) = \int_{\Gamma_{\text{ОШП}}} p(\mathbf{a}_{\text{ОШП}}) \Lambda(\mathbf{f} | \mathbf{a}_{\text{ОШП}}, A_{\text{ОШП}}) d\mathbf{a}_{\text{ОШП}} \quad (2)$$

Решающее правило обнаружения ОШП совместно с оценкой ее параметров определяется [12]

$$\text{если } \Lambda(\mathbf{f}) \geq \Lambda_* = \frac{p(A_{\text{ОШП}_0}) [I_{10} - I_{00}]}{p(A_{\text{ОШП}_1}) [I_{01} - I_{11} + a_{11} b_{11} p(\hat{\mathbf{a}}_{\text{ОШП}} | \mathbf{f}, A_{\text{ОШП}_1} - a_{11})]} \text{, то } A_{\text{ОШП}_1}^* \quad (3)$$

Особенности алгоритма совместного обнаружения (3) – оценивания (1): вычисление порога Λ_* , зависящего от апостериорной плотности вероятности оцениваемого параметра; оценка параметров ОШП выдается решающим устройством только если принимается решение $A_{\text{ОШП}}^* = 1$

Для вычисления усредненного ОП (2) необходим переход от интеграла к сумме, что обуславливает сложность технической реализации, так как число каналов такого устройства по априорно неизвестному параметру $\mathbf{a}_{\text{ОШП}}$ является бесконечно большим. Также для реализации алгоритма (3) отсутствует требуемая априорная информация: о плотностях вероятностей распределения параметров ОШП; о вероятностях наблюдения ОШП; о ценах за принятие решений о наличии (отсутствии) ОШП. Это обуславливает необходимость перехода к квазиоптимальному устройству обнаружения и оценивания.

Допустим, что, исходя из максимальной неопределенности, априорные вероятности появления ОШП одинаковы [9] и параметр $\mathbf{a}_{\text{ОШП}}$ имеет равномерное распределение в интервале граничных значений $[\mathbf{a}_{\text{ОШП}_{\min}}, \mathbf{a}_{\text{ОШП}_{\max}}]$. В таком случае результирующая оценка определяется как положение максимума функции правдоподобия $p(\mathbf{f} | \mathbf{a}_{\text{ОШП}}, A_{\text{ОШП}_1})$ согласно (1). Кроме того, в решающем правиле обнаружения (3) порог обнаружения выбирается из условия, что вероятность его превышения при $A_{\text{ОШП}_0}$ с учетом остатков компенсации МО, не превышает заданную вероятность ложной тревоги F –

$$P\left(\Lambda_*(\mathbf{f}) \geq \lambda_* | A_{\text{ОШП}_0}\right) = F, \quad (4)$$

(на основе известного критерия Неймана-Пирсона) [16].

Область $\Gamma_{\text{ОШП}}$ может быть представлена совокупностью прямых: по времени запаздывания $(t_{\text{ОШП}}^{\min}, t_{\text{ОШП}}^{\max})$; по радиальной протяженности $(T_{\text{ОШП}}^{\min}, T_{\text{ОШП}}^{\max})$ и по ширине спектра $(\Delta f_{\text{ОШП}}^{\min}, \Delta f_{\text{ОШП}}^{\max})$. Каждую из прямых разобьем на отрезки общим числом $N_{t_r}, N_{T_0}, N_{\Delta f}$ по времени запаздывания, радиальной протяженности ширине спектра соответственно. Вся область $\Gamma_{\text{ОШП}}$ в таком случае разбивается на совокупность точек $\mathbf{a}_{\text{ОШП}_m}$, где $m = 0..M - 1$ ($M = N_{t_r} \cdot N_{T_0} \cdot N_{\Delta f}$).

При этом число каналов M зависит от параметров ОШП $\mathbf{a}_{\text{ОШП}}$, а также от величины интервала дискретизации Δt и ширины элемента разрешения по частоте Δf_{Π} соответственно. Количество M определяются выражениями

$$N_{t_r} = \Delta t^{-1} (t_{r_{\text{ОШП}}}^{\max} - t_{r_{\text{ОШП}}}^{\min}). \quad (5)$$

$$N_{T_0} = \Delta t^{-1} (T_{0_{\text{ОШП}}}^{\max} - T_{0_{\text{ОШП}}}^{\min}). \quad (6)$$

$$N_{\Delta f} = \Delta F_{\Pi}^{-1} (\Delta f_{\text{ОШП}}^{\max} - \Delta f_{\text{ОШП}}^{\min}). \quad (7)$$

В таком случае выражение (2) принимает вид

$$\Lambda(\mathbf{f} | A_{\text{ОШП}_1}) = \sum_{m=0}^{M-1} p(\alpha_{\text{ОШП}_m}) \Lambda(\mathbf{f} | \alpha_{\text{ОШП}_m}, A_{\text{ОШП}_1}). \quad (8)$$

Согласно правилам оптимального приема, сравниваться с порогом может достаточная статистика (8), монотонно связанная с ОП [13]. Зачастую используют натуральный логарифм ОП $\ln \Lambda(\mathbf{f} | A_{\text{ОШП}_g}) = Z(\mathbf{f} | A_{\text{ОШП}_g})$ (ЛОП). При условии, что наблюдается только одна ОШП, накопление экспонент логарифмов условных ОП по каналам обработки $\ln[\Lambda(\mathbf{f} | \alpha_{\text{ОШП}_m})]$ (квадратов модуля корреляционного интеграла $Z(\mathbf{f} | \alpha_{\text{ОШП}_m})$) и сравнение логарифма их суммы с порогом асимптотически (при малых вероятностях ложных тревог) эквивалентно сравнению $\ln[\Lambda(\mathbf{f} | \alpha_{\text{ОШП}_m})]$ со своим порогом в каждом канале и последующим объединением решений по критерию «1 из M » (в соответствие с логикой работы схемы «или»). Этот факт был доказан в работе Р.Л. Добрушина, предпринятой по инициативе академика Ю.Б.Кобзарева [14].

Прологарифмируем (8) и представим безусловный ЛОП в следующем виде

$$Z(\mathbf{f} | A_{\text{ОШП}_g}) = \ln \left\{ \sum_{m=0}^{M-1} \exp \left[\ln \left(\Lambda(\mathbf{f} | \alpha_{\text{ОШП}_m}, A_{\text{ОШП}_g}) \right) + \ln p(\alpha_{\text{ОШП}_m}, A_{\text{ОШП}_g}) \right] \right\}. \quad (9)$$

Введенные ограничения и допущения приводят к тому, что обнаружение сводится к сравнению $Z(\mathbf{f} | \alpha_{\text{ОШП}_m})$ каждого канала с индивидуальным порогом обнаружения, определяемого по критерию Неймана-Пирсона, а параметры канала, в котором регистрируется максимум квадрата модуля корреляционного интеграла, будет определять оценку параметра $\hat{\alpha}_{\text{ОШП}}$.

В соответствии с синтезированным алгоритмом структура устройства обработки принятого сигнала (9) представляет собой M -канальное устройство (рис. 1). Каждый m -й канал которого настроен на обработку сигнала с ожидаемым параметром $\alpha_{\text{ОШП}_m}$. В каждом канале производится формирование квадрата модуля корреляционного интеграла $Z(\mathbf{f} | \alpha_{\text{ОШП}_m})$ с последующим сравнением его с порогом Z_{*m} . На вход устройства оценивания подаются через ключи $Z(\mathbf{f} | \alpha_{\text{ОШП}_m})$, превысившие свой порог. В схеме выбора максимума (СВМ) выбирается номера канала, которому соответствует максимум $Z(\mathbf{f} | \alpha_{\text{ОШП}_m})$ и на выходе формируется оценка $\hat{\alpha}_{\text{ОШП}} = m \cdot \Delta \alpha$ ($\Delta \alpha$ – межканальная расстройка).

Частные решения об обнаружении каналов поступают на схему ИЛИ (1 из M), на выходе которой формируется решение о наличии или отсутствии ОШП $A_{\text{ОШП}_1}^*$, которое управляет ключом, пропускающим (или нет) оценку $\hat{\alpha}_{\text{ОШП}}$.

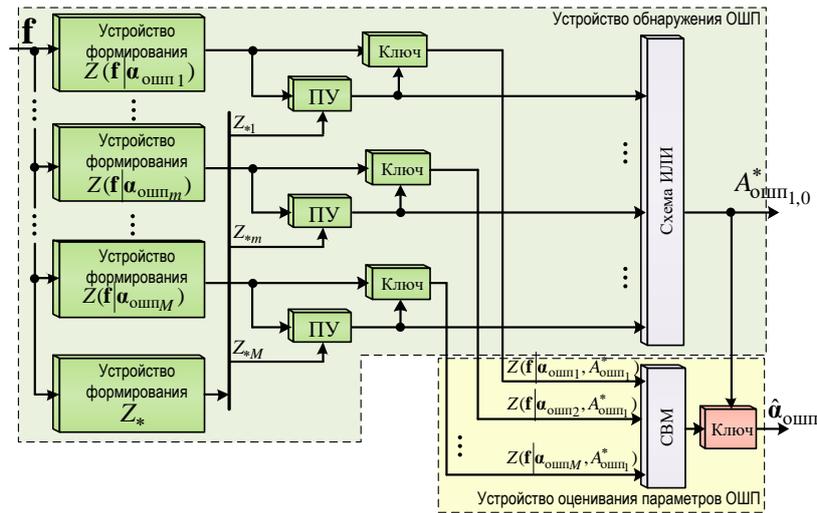


Рис. 1. Структурная схема устройства обнаружения и оценивания параметров ОШП, действующей в составе КИМ-помехи

Анализ параметров ОШП с учетом особенностей ее постановки

Из [4] известно, что параметры ОШП выбираются такими, чтобы на протяжении всего времени действия КИМ-помехи, она «накрывала» ОС, обеспечивая выполнение неравенства

$$\Delta f_{\text{ОШП}} \geq F_{\text{ДуП}} - F_{\text{Дс}} \quad (10)$$

где $F_{\text{ДуП}}$ – навязываемая частота Доплера УП; $F_{\text{Дс}}$ – частота Доплера ОС.

Представленную в (10) разность можно выразить через длину волны РЛС λ , величину навязываемого ускорения $a_{\text{УП}}$ и время увода $t_{\text{УВ}}$

$$\Delta f_{\text{ОШП}} \geq \frac{2}{\lambda} a_{\text{УП}} t_{\text{УВ}} \quad (11)$$

Оценивание минимально допустимого $a_{\text{УП}}$. Задача постановщика помех обеспечить в течение времени увода $t_{\text{УВ}}$ такую величину навязываемого ускорения $a_{\text{УП}}$, чтобы положение нуля дискриминационной характеристики измерителя по оси соответствующего параметра сместить на величину, превышающую размер полустроба сопровождения по нужной координате. Величина полустроба сопровождения, выбирается близкой к разрешающей способности по соответствующей координате [13]. Таким образом, для обеспечения увода по дальности должно выполняться следующее неравенство

$$\frac{a_{\text{УП}} t_{\text{УВ}}^2}{2} \geq \Delta r = \frac{c}{2\Delta f_0} \quad (12)$$

где Δr – разрешающая способность по дальности; Δf_0 – ширина спектра закона модуляции.

С учетом того, что ширина спектра закона модуляции ППРИ определяется длительностью одиночного импульса $a_{\text{УП}}$ не должно быть меньше чем

$$a_{\text{УП}} \geq \frac{cT_0}{t_{\text{УВ}}^2} \quad (13)$$

Оценивание максимально допустимого $a_{\text{УП}}$. Максимальное значение величины навязываемого ускорения не должно превышать допустимого значения $a_{\text{УП, max}} \leq a_{\text{доп}}$, которое определяется возможностями полета ВЦ с перегрузками (максимальные перегрузки на планер и пилота самолета). Современные самолеты рассчитаны на величину перегрузки не меньшую чем 10 ед [11], однако длительное действие (несколько секунд) таких перегрузок на живой организм (пилота самолета) в первую очередь приводит к нарушениям контрастной, световой и цветовой

чувствительности органов зрения. Критичным также для летчика считают градиент нарастания перегрузки, диапазон изменения которого находится в пределах от 0,5 ед/с до 10 ед/с [11].

Максимальное значение будем считать $5g$, т.е. $\approx 50 \text{ м/с}^2$.

Протяженность ОШП по элементам частоты находится в пределах

$$\Delta f_{\text{ОШП}} \approx \frac{2}{\lambda} \frac{cT_0}{t_{\text{ув}}} \dots \frac{100}{\lambda} \cdot t_{\text{ув}}. \quad (14)$$

Время увода $t_{\text{ув}}$, как правило, составляет 3...5 секунд [9].

Оценивание времени запаздывания шумового импульса и протяженности ОШП.

Радиальная протяженность ОШП составляет большую часть периода $0,5 \dots 0,7 T_{\text{П}}$ [11]. Значение $t_{r_{\text{ОШП}}}$ выбирается на постановщике помех из необходимости обеспечить попадание ОС в область маскируемых элементов дальности и частоты.

Заключение

Синтезирован байесовский оптимальный алгоритм обнаружения и измерения параметров протяженной по дальности коррелированной ОШП, действующей в составе КИМ-помехи на измерители ИД РЛС сопровождения. Совместное решение задачи обнаружения-измерения на основе двухфункционального решающего правила позволяет формировать решение об обнаружении, оценку параметров ОШП $\alpha_{\text{ОШП}} = \|t_{r_{\text{ОШП}}} \quad T_{0_{\text{ОШП}}} \quad \Delta f_{\text{ОШП}}\|^T$.

Представленный подход обеспечивает повышение эффективности функционирования измерителей ИД РЛС в условиях воздействия комбинированных помех, не требуя использования дополнительного временного ресурса на адаптацию к изменяющимся их параметрам. Достоинством синтезированного алгоритма является решение задачи обнаружения с одновременным оцениванием параметров маскирующей составляющей КИМ-помехи. Разработанный адаптивный алгоритм может быть реализован в современных и перспективных ИД РЛС сопровождения.

Список использованных источников

1. Куприянов, А. И. Радиоэлектронная борьба / А. И. Куприянов. – М. : Вузовская книга, 2013. – 360 с.
2. Van Brunt, Leroy. V. Applied ECM. Vol. 1, 2 / Leroy. V. Van Brunt – EW Engineering Inc, 1972. – 1700 р.
3. Защита радиолокационных систем от помех. Состояние и тенденции развития / под ред. А. И. Канащенкова и В. И. Меркулова. – М. : Радиотехника, 2003. – 416 с.
4. Чигирь, И. В. Анализ воздействия комбинированной имитирующей и маскирующей помехи на системы сопровождения по дальности и скорости радиолокаторов точного измерения координат / И. В. Чигирь, С. А. Горшков, Н. К. Кузьмичев, // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2018. – № 1 (58). – С. 71–81.
5. Чигирь, И. В. Обоснование способа защиты моноимпульсных импульсно-доплеровских радиолокаторов сопровождения от комбинированных имитирующих и маскирующих помех самоприкрытия / И. В. Чигирь // Сб. науч. стат. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2021. – № 41. – С. 92–99.
6. Трифонов, А. П. Совместное различие сигналов и оценка их параметров на фоне помех / А. П. Трифонов, Ю. С. Шинаков. – М. : Радио и связь, 1986. – 264 с.
7. Ширман Я. Д., Манжос В. Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. – М. : Радио и связь, 1981. – 416 с.
8. Куликов, Е. И., Трифонов, А. П. Оценка параметров сигналов на фоне помех / Е. И. Куликов, А. П. Трифонов. – М. : Сов. радио, 1978. – 296 с.
9. Сосулин, Ю. Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации. Учеб. пособие для вузов / Ю. Г. Сосулин. – М. : Радио и связь, 1992. – 304 с.
10. Ширман, Я. Д. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справ./ Я. Д. Ширмана [и др.]. под ред. Я. Д. Ширмана. – М. : Радиотехника, 2006. – 560 с.
11. Пантохов, А. П. Авиационная медицина : учеб. пособие / А. П. Пантохов, Ю. А. Соколов. – Минск : БГМУ, 2011. – 355 с.