

Первичная обработка РЛ сигнала

Цивлин Д.

9 апреля 2019 г.

Содержание

1	Введение	4
2	Согласованный фильтр	4
3	Фильтр Доплера	4
3.1	Оценка уровня шума	5
3.2	Пороговое обнаружение	6
3.3	Разрешение множественных целей	7

Обозначения

c	скорость света в вакууме
d_l	дальность цели, соответствующая временному дискрету l
f_c	несущая частота излучения РЛС
ic	индекс кандидата на обнаружение цели
itg	бегущий индекс цели
$kc(ic)$	индекс доплеровского канала для кандидата ic
$kmtg(itg)$	доплеровский канал, соответствующий максимуму сигнала цели itg
$ktg(itg)$	центр масс цели itg по измерению k
l	индекс временного дискрета
$lc(ic)$	индекс временного дискрета для кандидата ic
$lmtg(itg)$	дискрет времени, соответствующий максимуму сигнала цели itg
$ltg(itg)$	центр масс цели itg по измерению l
n	номер периода
N_p	число периодов в одном стробе
N_T	число временных дискретов в одном периоде
N_τ	число временных дискретов в импульсе
N_{FFT}	число точек быстрого преобразования Фурье
nc	общее число кандидатов на обнаружение цели
ntg	общее количество целей
T_s	интервал дискретизации времени
$tglmax$	максимальное количество временных дискретов, соответствующих одной цели
$tgs(itg)$	число кандидатов для цели itg
$thr(k, l)$	порог обнаружения
u_l	копия зондирующего импульса
v_k	скорость цели, соответствующая доплеровскому каналу k
w_n	оконная функция при междупериодной доплеровской обработке
$x_l^{(n)}$	временная реализация принятого сигнала на периоде n

$y_{2m}(k, l)$ квадрат модуля амплитуды сигнала для индекса доплеровского канала k и индекса дискрета времени l

$y_{2mc}(ic)$ квадрат модуля амплитуды сигнала для кандидата ic

$y_{2mtg}(itg)$ максимум квадрата модуля сигнала для цели itg

$Y_l^{(k)}$ сигнал на выходе доплеровского фильтра k

$y_l^{(n)}$ сигнал на выходе согласованного фильтра для периода n

1 Введение

В данной работе проводится анализ зарегистрированных изделием РЛ сигналов, предлагается алгоритм их первичной обработки. В качестве результата предлагаются результаты обнаружения движущихся целей для элементарных этапов сканирования пространства или **стробов**.

Далее перечислим параметры сканирования. Интервал дискретизации времени $T_s = 0.12$ мкс. Несущая частота $f_c = 10^4$ МГц. Рассматриваются сигналы в цифровом представлении, соответствующем цифровому преобразованию частоты вниз на величину несущей частоты. Зондирующий импульс u_l задаётся в виде последовательности комплексных отсчётов

$$u_l, \quad l = 0, \dots, N_\tau - 1, \quad (1)$$

где $N_\tau = 8$ – число временных дискретов в импульсе. В пределах одного периода зондирования n принятый сигнал $x_l^{(n)}$ представляется последовательностью комплексных отсчётов

$$x_l^{(n)}, \quad l = 0, \dots, N_T - 1, \quad (2)$$

где $N_T = 80$ – число временных дискретов в одном периоде, $n = 0, \dots, N_p - 1$ – номер периода, $N_p = 1100$ – число периодов в одном стробе.

2 Согласованный фильтр

Фильтрация принятого сигнала в пределах одного периода определяется по формуле

$$y_l^{(n)} = \sum_{j=0}^{N_\tau-1} x_{l+j}^{(n)} u_j. \quad (3)$$

Форма копии зондирующего импульса $u_l = 1$, $l = 0, \dots, 7$.

3 Фильтр Доплера

Доплеровское представление определяется по формуле:

$$Y_l^{(k)} = \frac{1}{N_{FFT}} \sum_{n=0}^{N_{FFT}} w_n y_l^{(n)} \exp \left\{ -\frac{2\pi i k n}{N_{FFT}} \right\}, \quad (4)$$

где N_{FFT} – число точек быстрого преобразования Фурье (БПФ). Для определения N_{FFT} используется Алгоритм 1.

Алгоритм 1 Определение числа точек БПФ

- 1: $N_{FFT} \leftarrow 1$
 - 2: **while** $N_{FFT} < N_p$
 - 3: $N_{FFT} \leftarrow N_{FFT} \cdot 2$
 - 4: **end while**
-

Также в случае $N_p < N_{FFT}$ величина $y_l^{(n)}$ доопределяется нулями:

$$y_l^{(n)} = 0, \quad n = N_p, \dots, N_{FFT} - 1. \quad (5)$$

Величина w_n обозначает оконную функцию, которая снижает величину боковых лепестков в доплеровских каналах вблизи максимума сигнала. Для определенности выберем оконную функцию Хэмминга:

$$w_n = \frac{25}{46} - \frac{21}{46} \cos\left(\frac{2\pi n}{N_p - 1}\right), \quad n = 0, \dots, N_p - 1. \quad (6)$$

Для целей описания алгоритмов введём обозначение $y2m(k, l) = \left|Y_l^{(k)}\right|^2$.

3.1 Оценка уровня шума

Рассмотрим оценку уровня шума в скользящем окне. Оценочную величину обозначим $n2m(k, l)$. Далее определим Алгоритм 2

Алгоритм 2 Определение уровня шума в скользящем окне

```

1: for  $k \leftarrow 0, N_{FFT} - 1$  do
2:   for  $l \leftarrow 0, N_T - 1$  do
3:      $n2m(k, l) \leftarrow 0$ 
4:     for  $k1 \leftarrow k - 7, k + 7$  do
5:       if  $k1 < 0$  then
6:          $\bar{k}1 \leftarrow k1 + N_{FFT}$ 
7:       else
8:          $\bar{k}1 \leftarrow k1$ 
9:       end if
10:       $n2m(k, l) \leftarrow n2m(k, l) + y2m(\bar{k}1, l)$ 
11:    end for
12:    for  $k1 \leftarrow k - 2, k + 2$  do
13:      if  $k1 > N_{FFT}$  then
14:         $\bar{k}1 \leftarrow k1 - N_{FFT}$ 
15:      else
16:         $\bar{k}1 \leftarrow k1$ 
17:      end if
18:       $n2m(k, l) \leftarrow n2m(k, l) + y2m(\bar{k}1, l)$ 
19:    end for
20:     $n2m(k, l) \leftarrow n2m(k, l) / 12$ 
21:  end for
22: end for

```

Алгоритм 2 проиллюстрирован на рисунке 1. Для усреднения уровня шума выбираются 12 доплеровских каналов вокруг рассматриваемого канала. Для исключения влияния полезного сигнала на оценку шума из усреднения исключаются рассматриваемый канал и два его ближайших соседа.

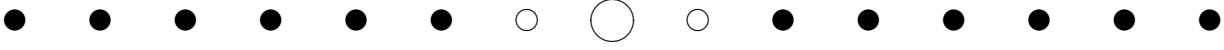


Рис. 1: Схема усреднения уровня шума по доплеровским частотам в скользящем окне. Центральный доплеровский канал обозначен незаполненным кругом бóльшего радиуса. Соседние каналы не участвуют в усреднении (незаполненные круги слева и справа). Для усреднения выбираются последующие шесть каналов с каждой стороны от центрального (заполненные круги).

3.2 Пороговое обнаружение

Для принятия решения о наличии сигнала цели в доплеровском фильтре k и временном дискрете l будем предполагать, что комплексная амплитуда (4) является суммой (комплексного) сигнала цели s_{tg} и (комплексного) гауссовского шума n_{Gauss} :

$$Y = s_{tg} + n_{Gauss} . \quad (7)$$

Проверим эту гипотезу H_1 (7) относительно "нулевой" гипотезы H_0 , в которой сигнал цели отсутствует. Введём априорные распределения вероятности:

$$p_s(s_{tg}) = \frac{1}{\pi \Xi^2} \exp \left\{ -\frac{|s_{tg}|^2}{\Xi^2} \right\} \quad (8)$$

и

$$p_n(n_{Gauss}) = \frac{1}{\pi \sigma_n^2} \exp \left\{ -\frac{|n_{Gauss}|^2}{\sigma_n^2} \right\} . \quad (9)$$

Будем считать, что (неизвестный) сигнал цели распределён практически равномерно: $\Xi \gg \sigma_n$, и сформулируем отношение правдоподобия:

$$l(Y) = \frac{P\{Y|H_1\}}{P\{Y|H_0\}} . \quad (10)$$

Интегрированием (11) по случайной амплитуде сигнала s_{tg} получаем:

$$\langle l(Y) \rangle = \frac{\sigma_n^2}{\Xi^2} \exp \left\{ \frac{|Y|^2}{\sigma_n^2} \right\} \quad (11)$$

или в логарифмическом масштабе

$$\ln \langle l(Y) \rangle = \text{const} + \frac{|Y|^2}{\sigma_n^2} . \quad (12)$$

Таким образом, логарифмическое отношение правдоподобия зависит от отношения сигнала и шума в элементе разрешения (k, l) .

Для однозначного определения порога обнаружения $thr(k, l)$ рассмотрим вместо (12) вероятность ложной тревоги

$$P_{f.a.} \equiv P\{|Y|^2 > thr | H_0\} = \exp \left\{ -\frac{thr}{\sigma_n^2} \right\} . \quad (13)$$

Вместо истинного значения дисперсии шума σ_n^2 в алгоритме будем использовать его оценку $n2m(k, l)$. Окончательно, для элемента разрешения (k, l) получаем порог обнаружения в виде

$$thr(k, l) = n2m(k, l) \cdot \ln \left(\frac{1}{P_{f.a.}} \right). \quad (14)$$

Обозначим через $ic=0, \dots, nc-1$ индекс кандидата на обнаружение цели, nc – общее число кандидатов. Далее введём вспомогательные массивы индексов $lc(ic)$ – индекс временного дискрета для кандидата ic , $kc(ic)$ – индекс доплеровского канала для кандидата ic . Квадрат модуля амплитуды сигнала для каждого кандидата также обозначим через вспомогательный массив $y2mc(ic)$. Сформулируем алгоритм порогового обнаружения (Алгоритм 3):

Алгоритм 3 Пороговое обнаружение

```

1:  $nc \leftarrow 0$ 
2: for  $k \leftarrow 0, N_{FFT} - 1$  do
3:   for  $l \leftarrow 0, N_T - 1$  do
4:     if  $y2m(k, l) > thr(k, l)$  then
5:        $kc(nc) \leftarrow k$ 
6:        $lc(nc) \leftarrow l$ 
7:        $y2mc(nc) \leftarrow y2m(k, l)$ 
8:        $nc \leftarrow nc + 1$ 
9:     end if
10:  end for
11: end for

```

3.3 Разрешение множественных целей

После оценки уровня шума и процедуры порогового обнаружения необходимо установить соответствие между кандидатами, т.е. координатами (k, l) , для которых произошло превышение порога и отдельными целями. Обозначим общее количество целей через ntg , бегущий индекс цели через itg . В рамках цели itg максимум квадрата модуля сигнала обозначим через $y2mtg(itg)$, соответствующий дискрет времени через $lmtg(itg)$ и соответствующий доплеровский канал $kmtg(itg)$. Для разделения различных целей между собой введём максимальное количество временных дискретов, соответствующих одной цели $tgmax=16$, центр масс цели по индексу временного дискрета $ltg(itg)$, центр масс цели по индексу доплеровского канала $ktg(itg)$, число кандидатов для цели itg $tgs(itg)$. Алгоритм 4 описывает процедуру разделения целей.

Для представления результатов первичной обработки сигнала целесообразно ввести дальность цели, соответствующую временному дискрету l по формуле

$$d_l = \frac{1}{2} l \cdot c T_s, \quad (15)$$

а также скорость цели, соответствующую доплеровскому каналу k :

$$v_k = \begin{cases} k \cdot c / (2f_c N_{FFT} T_s N_T), & \text{если } k < N_{FFT}/2; \\ (k - N_{FFT}) \cdot c / (2f_c N_{FFT} T_s N_T), & \text{если } k \geq N_{FFT}/2. \end{cases} \quad (16)$$

В выражениях (15)–(16) $c=3 \cdot 10^8$ м/с обозначает скорость света в вакууме.

Алгоритм 4 Разделение целей

```

1:  $ntg \leftarrow 0$ 
2: for  $ic \leftarrow 0, nc - 1$  do
3:    $flag \leftarrow 0$ 
4:   for  $itg \leftarrow 0, ntg - 1$  do
5:      $ltg\_ \leftarrow ltg(itg)$ 
6:      $lc\_ \leftarrow lc(ic)$ 
7:     if  $|lc(ic) - ltg\_| > tglmax$  then
8:       continue
9:     end if
10:     $ktg\_ \leftarrow ktg(itg)$ 
11:     $kc\_ \leftarrow kc(ic)$ 
12:     $kdiff = kc(ic) - ktg\_$ 
13:    if  $kdiff > N_{FFT}/2$  then
14:       $kdiff \leftarrow kdiff - N_{FFT}$ 
15:    end if
16:    if  $kdiff < -N_{FFT}/2$  then
17:       $kdiff \leftarrow kdiff + N_{FFT}$ 
18:    end if
19:    if  $|kdiff| > 1$  then
20:      continue
21:    end if
22:     $flag \leftarrow 1$  ▷ кандидат принадлежит цели  $itg$ 
23:     $kc\_ \leftarrow ktg\_ + kdiff$ 
24:     $tgs\_ \leftarrow tgs(itg) + 1$ 
25:     $ktg(itg) \leftarrow (ktg(itg) \cdot tgs(itg) + kc\_)/tgs\_$ 
26:     $ktg(itg) \leftarrow ktg(itg) \% N_{FFT}$ 
27:     $ltg(itg) \leftarrow (ltg(itg) \cdot tgs(itg) + lc\_)/tgs\_$ 
28:     $tgs(itg) \leftarrow tgs\_$ 
29:    if  $y2mc(ic) > y2mtg(itg)$  then
30:       $y2mtg(itg) \leftarrow y2mc(ic)$ 
31:       $lmtg(itg) \leftarrow lc(ic)$ 
32:       $kmtg(itg) \leftarrow kc(ic)$ 
33:    end if
34:  end for
35:  if  $flag = 0$  then ▷ кандидат не принадлежит ни одной цели
36:     $ltg(ntg) \leftarrow lc(ic)$ 
37:     $ktg(ntg) \leftarrow kc(ic)$ 
38:     $tgs(ntg) \leftarrow 1$ 
39:     $y2mtg(ntg) \leftarrow y2mc(ic)$ 
40:     $lmtg(ntg) \leftarrow lc(ic)$ 
41:     $kmtg(ntg) \leftarrow kc(ic)$ 
42:     $ntg \leftarrow ntg + 1$ 
43:  end if
44: end for

```

Список алгоритмов

1	Определение числа точек БПФ	4
2	Определение уровня шума в скользящем окне	5
3	Пороговое обнаружение	7
4	Разделение целей	8