

УДК 621.396.96

КОМПЕНСАЦИОННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ СЛОЖНЫХ СИГНАЛОВ, ОТРАЖЕННЫХ ДВИЖУЩИМИСЯ ОБЪЕКТАМИ

К. т. н. Е. А. Чемес, А. П. Кузнецов, Д. С. Барбан

Одесский национальный политехнический университет
Украина, г. Одесса
each41@mail.ru

В работе получены аналитические выражения и количественные результаты, показывающие, что при разрешении перекрывающихся во времени и по спектру сложных сигналов, отраженных движущимися объектами, необходимо учитывать изменения длительности сигналов, а также эффекты, вызванные ускоренным движением отражателей. Это позволяет производить разрешение сигналов с амплитудами, диапазон изменения которых может быть увеличен на десятки децибел.

Ключевые слова: сигнал, взаимная функция неопределенности, разрешение, боковые лепестки, главный пик, компенсационный метод.

Использование в радиолокационных системах сложных сигналов позволило улучшить разрешающие способности по дальности и скорости, привело к увеличению дальности действия радиолокационных средств. В то же время, возможности разрешения перекрывающихся боковыми лепестками взаимная функция неопределенности (ВФН) сложных сигналов, амплитуды которых изменяются в большом динамическом диапазоне, являются ограниченными, ибо боковые лепестки мощных сигналов являются помехами при обнаружении более слабых. Например, динамический диапазон разрешения сигналов с линейным изменением частоты составляет всего 13 дБ, а для фазоманипулированных (ФМ) сигналов он ограничен величиной $\sqrt{B} = \sqrt{\tau \Delta f}$, где B , τ , Δf – база, длительность и ширина спектра сигнала соответственно. Для увеличения динамического диапазона разработаны методы, основанные на оптимизации ВФН сигнала и фильтра [1], компенсации мешающих сигналов [2]. Но их эффективность исследовалась при использовании моделей, не учитывающих изменение длительности сигналов при отражении от движущихся объектов, а также изменение характеристик вследствие ускоренного движения отражателей. Целью данной работы является учет данных явлений при определении эффективности компенсационного метода.

Найдем зависимость уровня компенсации мешающих сильных сигналов q_a от ускорения движущегося объекта, как отношение мощностей входного $P_{вх}$ и разностного P_p сигналов: $q_a^2 = P_{вх} / P_p$.

Пусть, для определенности, обрабатывается сигнал с амплитудой A и длительностью T_c . Величина девиации частоты $f_a(t)$, вызываемая движением объекта с ускорением a , определяется выражением [1, 2] $f_a(t) = 2at / \lambda$, где t – время, λ – длина волны зондирующего колебания. При этом изменение фазы $\varphi_a(t)$ происходит по закону $\varphi_a(t) = 2\pi \int f_a(t) dt = 2\pi at^2 / \lambda$.

С учетом этого представим входной $u_{вх}(t)$ и компенсирующий $u_k(t)$ сигналы выражениями: $u_{вх}(t) = A \exp(j(\omega t + 2\pi at^2 / \lambda))$, $u_k(t) = A \exp(j\omega t)$, где ω – частота зондирующего сигнала. Вычтя из входного сигнала компенсирующий, найдем мощность остатка вычитания:

$$P_p(t) = 2A^2 [1 - \cos(2\pi at^2 / \lambda)].$$

Для исключения зависимости $P_p(t)$ от времени усредним ее на интервале T_c .

$$P_p = \frac{2A^2 T_c}{T_c} \int_0^{T_c} (1 - \cos \alpha t^2) dt = 2A^2 \left(1 - \frac{1}{T_c \sqrt{\alpha}} \int_0^{\sqrt{\alpha}} \cos x^2 dx\right) = 2A^2 \left[1 - \frac{\sqrt{\pi}}{T_c \sqrt{2\alpha}} C(T_c \sqrt{\alpha})\right],$$

где $\alpha = 2\pi a / \lambda$, $C(T_c \sqrt{\alpha})$ – косинус-интеграл Френеля.

Упростим выражение, выразив $C(T_c \sqrt{\alpha})$ через сумму, и ограничимся ее первым слагаемым.

Подставив результат в выражение $q_a^2 = P_{ex} / P_p$, определим эффективность компенсации при ус-
корении отражающего объекта: $q_a \approx \sqrt{5\lambda} / 2\pi a T_c^2$.

Расчеты показывают, что, например, для двух значений длительности сигнала $T_{c1}=10^{-4}$ с, $T_{c2}=10^{-2}$ с, при $\lambda = 0,1$ м и $a = 5$ м/с уровень компенсации составляет: $q_{a1} = 117$ дБ и $q_{a2} = 37,1$ дБ. При тех же λ и T_c , но при $a = 50$ м/с уровни компенсации уменьшаются примерно на 20 дБ.

Перейдем к рассмотрению влияния трансформации длительности сигнала на эффективность компенсационного метода, оцениваемую выражением $q_a^2 = P_{ex} / P_p$.

Движение объекта с радиальной скоростью v_r приводит к изменению длительности отраженно-
го сигнала на величину [1, 2] $\Delta\tau_c = 2T_c v_r / C$, где C — скорость распространения радиоволн.

Если не учитывать $\Delta\tau_c$, то компенсирующий и входной сигналы отличаются по длительности, и на этих участках они не вычитаются. Найдем среднюю мощность остатка вычитания при обработке ФМ ра-
диочастотного сигнала. Остатки будут при этом не только в конце сигнала, но и между элементарными
позициями, фазы которых отличаются на 180° , что приведет к дополнительному ухудшению компенса-
ции. При числе позиций, равном N , количество смен фазы составит приблизительно $N/2$ [1]. Предположив
далее, что моменты смены фаз распределены по длительности сигнала равномерно и происходят, напри-
мер, между 1-й и 2-й, 3-й и 4-й, ..., $(2n-1)$ -й и $2n$ -й позициями, где $n = 1, 2, \dots, (N-1)/2$, можно опреде-
лить длительность n -го некомпенсированного импульса $\Delta\tau_n = 2v_r(2n-1) \tau_c / C$, где τ_c — длительность
элементарной позиции сигнала. Общая длительность некомпенсированного остатка $\tau_{нк}$ определится
суммированием $\Delta\tau_n$ в диапазоне изменения n :

$$\Delta\tau_{нк} = \tau_c \frac{2v_r}{C} \sum_{n=1}^{(N-1)/2} (2n-1) + N\tau_c \frac{2v_r}{C} = \frac{\tau_c v_r (N-1)^2}{2C} + N\tau_c \frac{2v_r}{C}.$$

Второе слагаемое представляет длительность остатка вычитания, возникающего вследствие не-
совпадения последних позиций вычитаемых сигналов. Амплитуда данного выброса равна амплитуде
входного (компенсирующего) колебания, а остальных — в два раза больше. С учетом этого можно
найти отношение мощности $P_{вх}$ к средней мощности разностного сигнала $P_{ср.р}$, представляющее зави-
симость эффективности компенсации при учете трансформации длительности сигнала:

$$q_q = (P_{вх} / P_{ср.р})^{0,5} = [C / (2v_r (N-1 + 1/N))]^{0,5} \approx (C / 2v_r N)^{0,5}.$$

По данной формуле получены следующие количественные результаты: при $v_r = 8$ и $0,33$ км/с и $N = 63$ $q_q = 24,8$ дБ и $38,7$ дБ; при том же v_r , но $N = 1023$, $q_q = 12,6$ дБ и $26,5$ дБ.

Итоги проведенных аналитических исследований, проиллюстрированные расчетами, состоят в
том, что без учета эффектов, вызываемых движением отражателей, увеличение динамического диапа-
зона (до 40...60 дБ) не может быть достигнуто только выбором параметров (длительность, число по-
зиций) сложного зондирующего колебания, то есть без учета изменений отраженного движущимися
объектами сигнала. В заключение отметим, что рассмотренные здесь изменения параметров сигналов
не учитываются при согласованной обработке.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. / Под ред. Я. Д. Ширмана.–
Москва: Радиотехника, 2007.
2. Чемес Е. А. Компенсационные методы и устройства разрешения фазоманипулированных сигналов.–
Одесса: ОЦНТИ, 2003.– 188 с.

E. A. Chemes, A. P. Kuznecov, D. S. Barban

Compensation resolution of complex signals reflected by moving objects

The paper presents analytical expressions and numerical results showing that the resolution of overlapping in
time and spectrum complex signals reflected by moving objects requires taking into account changes in the
duration of signals, as well as the effects caused by the rapid movement of the reflectors. This allows for the
resolution of signals with amplitudes with the variation range which may be increased by ten decibels.

Keywords: *signal, mutual function of vagueness (MFV), permission, sidelobes, main peak, compensative method.*