

УДК 621.396.96

Е.А. Пивовар

АНАЛИЗ ПРЯМОГО СШП СИГНАЛА И МЕТОДЫ ЕГО КОМПЕНСАЦИИ В ИНТЕРЕСАХ ПОДПОВЕРХНОСТНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ ОБЪЕКТОВ РЕЗОНАНСНЫХ РАЗМЕРОВ

Проведен анализ тракта распространения прямого сигнала для задач подповерхностной радиолокации. Рассмотрены методы, позволяющие проводить компенсацию прямого сигнала и возникающие при этом ошибки. Показано изменение отношений “полезный сигнал” – “шум + помеха” при рассогласовании базового расстояния между ПП АС.

Ключевые слова: подповерхностная радиолокация, сверхширокополосный (СШП) сигнал, тракт распространения прямого сигнала, методы компенсации прямого сигнала, показатели качества.

Проведено аналіз тракту розповсюдження прямого сигналу для задач підповерхневої радіолокації. Розглянуто методи, що дозволяють проводити компенсацію прямого сигналу та помилки, що виникають при цьому. Показано зміну відношення “корисний сигнал” – “шум + перешкода” при неузгодженості базової відстані між ПП АС.

Ключові слова: підповерхнева радіолокація, надширокопосмуговий (НШС) сигнал, тракт поширення прямого сигналу, методи компенсації прямого сигналу, показники якості.

Analysis of the path of dissemination of a direct signal for solving of the tasks of subsurface radiolocation is carried out. Methods, used for the compensation of a direct signal, as well as the errors, arising at the same time, are considered. Change of the attitudes “useful signal” – “noise + interference” is shown at mismatch of basic distance between RR AS.

Keywords: subsurface radiolocation, ultrawideband (UWB) signal, direct signal path of dissemination of direct signal, methods of direct signal compensation, quality ratings.

При решении задач подповерхностной радиолокации одним из наиболее мощных, наблюдаемых в точке приема, колебаний, является прямой сигнал, падающий в приемный тракт непосредственно из передающего. Прямой сигнал, маскируя слабый полезный, отраженный от подповерхностного объекта, затрудняет, либо делает невозможным его обнаружение. Таким образом, возникает необходимость анализа прямого сигнала на предмет возможности дальнейшего его устранения.

Для получения и анализа прямого сигнала использовалось математическое моделирование. Приемно-передающая (ПП) антенная система (АС) представляла собой пару элементарных диполей, идентичных на прием и передачу, находящаяся над границей раздела сред и разнесенная в пространстве. При этом влияние

сигнала, отраженного от границы раздела сред не учитывалось. Вектор-момент диполей рассматривался при двух ориентациях $(0,1,0)$ и $(1,0,0)$. В качестве возбуждающего сигнала на входе передающей антенны рассматривался знакопеременный, в диапазоне от 100 МГц до 1 ГГц.

Анализ прямого сигнала

Особенностью прямого сигнала при подповерхностной радиолокации является малое расстояние между приемной и передающей антеннами. При этом колебания, обусловленные наводимыми в приемной антенне токами для ближней зоны, претерпевают существенные изменения по сравнению с аналогичными колебаниями, наблюдаемыми антенной в дальней зоне.

При малых расстояниях велика доля низкочастотных составляющих спектра сигнала. С увеличением базового расстояния амплитуды низкочастотных составляющих спектра, обусловленные реактивными составляющими поля в ближней зоне, быстро уменьшаются. Так, в результате анализа прямых сигналов, было получено, что формирование сигнала из совокупности активных и реактивных полей происходит при разnose ПП АС на расстояние порядка 1 м. Дальнейшее увеличение базового расстояния будет приводить лишь к уменьшению мощности принимаемого сигнала при неизменной форме импульса. Кроме базового расстояния на величину прямого сигнала существенное влияние оказывает ориентация ПП АС.

Так при ориентации вектор-моментов $(1,0,0)$ и разnose ПП АС на расстояние дальней зоны в приемнике прямой сигнал наблюдаться не должен, так как диполь не излучает вдоль своей оси. Однако для случая ближней (либо промежуточной) зоны, наличие реактивной составляющей поля оказывает существенное влияние, и для соответствующего положения антенн относительно друг друга при уменьшении базового расстояния приемная антенна регистрирует наличие прямого сигнала. Таким образом, для ближней зоны прямой сигнал в приемнике будет присутствовать для различной ориентации ПП АС, так как в приемной антенне будут наводиться токи, обусловленные реактивными низкочастотными полями, имеющими место, вблизи передающей антенны и быстро уменьшающимися по мере увеличения базы. Проведенное моделирование позволяет получить частотные характеристики (ЧХ) соответствующего тракта распространения, которые в дальнейшем используются для корректировки ЧХ фильтра, подключенного к излучающей антенне с целью компенсации прямого сигнала, наблюдаемого в приемной антенне.

Методы компенсации прямого сигнала

Рассмотрим полезный сигнал, отраженный от объекта типа противотанковой мины (ПТМ) М15, на фоне прямого сигнала (рис. 1). Основная проблема в этом случае – большое затухание полезного сигнала и, как следствие, маскировка его боковыми лепестками прямого сигнала. Одним из возможных вариантов уменьшения влияния прямого сигнала является временное стробирование. Однако для подповерхностной радиолокации, осуществляемой на малых расстояниях (высотах и глубинах), временной сдвиг между прямым и полезным сигналом может быть недостаточным для полного устранения прямого сигнала. Повысить эффективность компенсации в этом случае можно путем увеличения частотного диапазона излучаемого сигнала с целью сокращения его длительности во временной области.

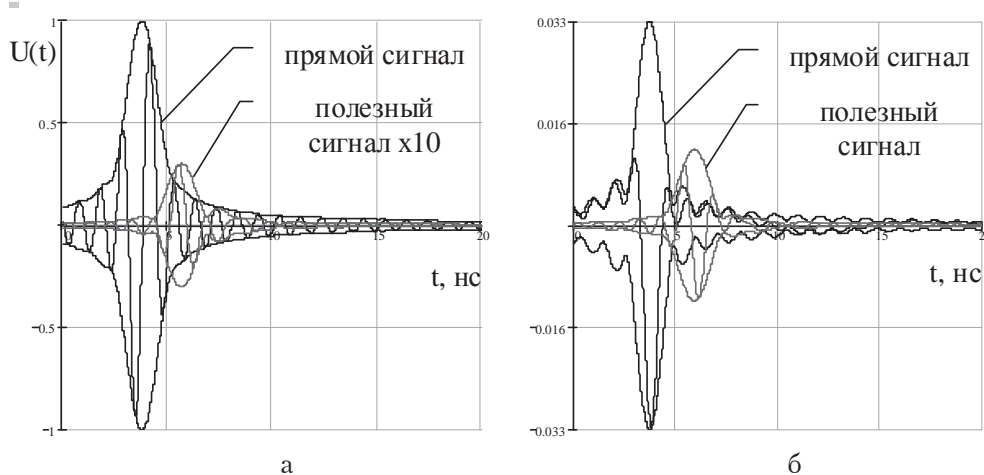


Рис. 1. Нормированные прямые сигналы и полезные, отраженные от металлической мины M15, установленной в серый суглинок с плотностью $1,2 \text{ г/см}^3$ на глубину $0,20 \text{ м}$, при различных ориентациях ПП антенн: а $(0,1,0)$ и б $(1,0,0)$

Дальнейшее подавление прямого сигнала можно осуществить путем вычитания сигнала возбуждения антенны, прошедшего через четырехполюсник с ЧХ тракта распространения прямого сигнала, полученного при жестко зафиксированной базе. При этом форма компенсационного сигнала будет по отношению к реальному определяться видом ЧХ четырехполюсника, а амплитуда – амплитудой импульса возбуждения.

В силу ряда факторов, например, при изменении температурного режима, жестко фиксированное базовое расстояние может изменяться в некотором диапазоне. Так, при ориентации ПП антенн $(0,1,0)$ вычитание ожидаемого прямого сигнала дает возможность получить превышение полезного сигнала над некомпенсированными остатками прямого до 20 раз. При этом разброс ожидаемого и реального базового расстояния от -11 мм до $+18 \text{ мм}$ дает превышение полезного сигнала не хуже чем в 10 раз.

Для данного положения объекта, но при ориентации ПП АС $(1,0,0)$ вычитание ожидаемого прямого сигнала позволяет получить превышение полезного сигнала над остатками некомпенсированного прямого до 500 раз. При отличии ожидаемого и реального сигнала по базе на $\pm 20 \text{ мм}$ превышение полезного над остатками прямого не хуже чем в 25 раз. Таким образом, вычитание прямого ожидаемого сигнала из принятого позволяет существенно уменьшить его влияние на полезный сигнал.

Рассмотрим показатели качества обнаружения полезного сигнала при компенсации прямого. При наличии рассогласования между реальным прямым сигналом и компенсационным (полезный сигнал считаем известным), кроме флуктуационной составляющей появляется систематическая (помеха), которая не изменяет дисперсию, но смещает математические ожидания для каждого канала на соответствующую величину

$$Z_{\Delta \text{пр.}i} = \int_{-\infty}^{+\infty} (U_{\text{пр.реал.}}(t) - U_{\text{пр.ож.}}(t)) \cdot U_{\text{об.}i}(t) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} \Delta U_{\text{пр.}}(t) \cdot U_{\text{об.}i}(t) dt \quad (1)$$

Таким образом, наличие некомпенсированных остатков прямого сигнала приводит к смещению математических ожиданий и, соответственно, функций

распределения на величину $Z_{\Delta np.i}$ при неизменной дисперсии. Приемные каналы при этом остаются настроенными (как и в случае отсутствия прямого – полной компенсации) на ожидаемые полезные сигналы, поэтому пороги обнаружения – различия (границы определения вероятности того или иного случайного события) остаются неизменными, при смещении всей совокупности графиков функций распределения на величину $Z_{\Delta np.i}$.

В этом случае, когда прямой сигнал не полностью скомпенсирован, отношение сигнал-шум представляет собой отношение “полезный сигнал” – “шум + помеха”, где математическое ожидание полезного сигнала остается неизменным, а разброс возможных значений относительно него (среднеквадратичное отклонение) смещен на $Z_{\Delta np.i}$:

$$q_{np.i} = \frac{M_i}{\sqrt{D_z + Z_{\Delta np.i}}} \quad (2)$$

Таким образом, при наличии рассогласования между реальным и компенсационным прямыми сигналами отношение “полезный сигнал” – “шум + помеха” уменьшается в $\frac{q_{opt.i}}{q_{np.i}}$ раз, по отношению к отношению сигнал-шум при полной компенсации прямого (оптимальному для данного канала):

$$\frac{q_{opt.i}}{q_{np.i}} = \frac{M_i}{\sqrt{D_z}} \cdot \frac{\sqrt{D_z + Z_{\Delta np.i}}}{M_i} = \frac{\sqrt{D_z + Z_{\Delta np.i}}}{\sqrt{D_z}} = 1 + \frac{Z_{\Delta np.i}}{\sqrt{D_z}} \quad (3)$$

Пусть оптимальное отношение сигнал-шум в первом канале, настроенном на прием сигнала от мины М15, установленной на глубину 0,20 м, при полной компенсации прямого задано и равно 10, ориентация ПП АС (0,1,0). Тогда график зависимости отношения “полезный сигнал” – “шум + помеха” от рассогласования базового расстояния ПП АС будет иметь вид (рис. 2, а).

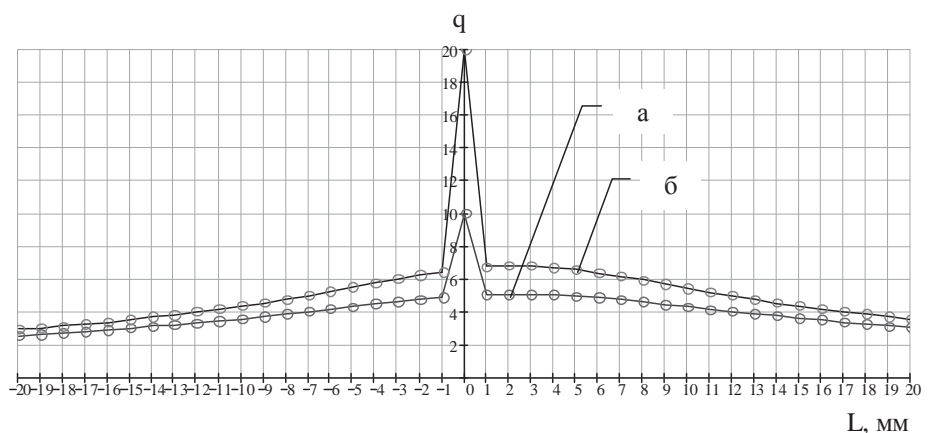


Рис. 2. Зависимость отношения “полезный сигнал” – “шум + помеха” от рассогласования базового расстояния ПП АС для канала, настроенного на оптимальный прием сигнала, отраженного от мины М15, установленной на глубине 0,20 м при ориентации ПП антенн (0,1,0): а – $q_{opt1}=10$, б – $q_{opt1}=20$.

Как видно из графика (рис. 2, а), при рассогласовании базового расстояния хотя бы на 1 мм, отношение “полезный сигнал” – “шум + помеха” уменьшается с 10 (для оптимального приема) до порядка 5, хотя амплитуда полезного сигнала в данной точке превышает остатки прямого в 20 раз. Это говорит о том, что на отношение сигнал-шум оказывает влияние интегральная сумма всего сигнала по области рассматривания (существования). При увеличении отношения сигнал-шум для случая оптимального приема не удастся существенно увеличить отношение “полезный сигнал” – “шум + помеха” при рассогласовании базовых расстояний (рис. 2, а, б). Это связано с тем, что, увеличивая энергетику передающей системы, мы тем самым уменьшаем влияние внутренних шумов, однако и полезный и помеховый сигналы увеличиваются в равной степени.

Далее, с точки зрения оправданного увеличения энергетики радиолокатора подповерхностного зондирования, целесообразно рассматривать отношения Q отношений “полезный сигнал” – “шум + помеха” в соответствующих каналах, при рассогласовании принятого сигнала с ожидаемым и наличии не полностью скомпенсированных прямых сигналов, к оптимальному отношению сигнал-шум в данном канале (рис. 3–4).

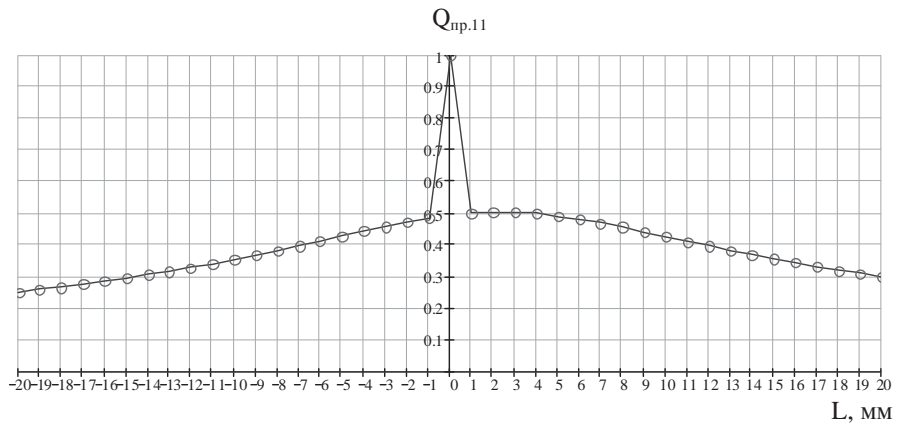


Рис. 3. Зависимость отношения $Q_{пр.11}$ отношений “полезный сигнал” – “шум + помеха” к оптимальному отношению сигнал-шум $q_{opt1}=10$ от рассогласования базового расстояния ППАС для канала, настроенного на оптимальный прием сигнала, отраженного от мины М15, установленной на глубине 0,20 м при ориентации ПП антенн (0,1,0).

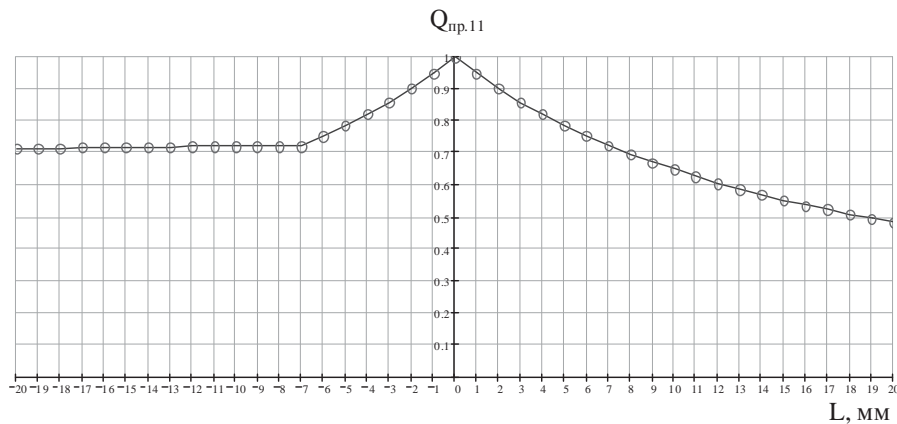


Рис. 4. Зависимость отношения $Q_{пр.11}$ отношений “полезный сигнал” – “шум + помеха” к оптимальному отношению сигнал-шум $q_{opt1}=10$ от рассогласования базового расстояния ППАС для канала, настроенного на оптимальный прием сигнала, отраженного от мины М15, установленной на глубине 0,20 м при ориентации ПП антенн (1,0,0).

Как видно из данных графиков, изменение ориентации ПП АС с (0,1,0) на (1,0,0) позволяет увеличить отношение $Q_{пр.11}$ при рассогласовании базового расстояния.

Тот факт, что при расчете отношений сигнал-шум влияние оказывает вся область существования сигналов, позволяет предполагать, что в сочетании со стробированием остатков прямого сигнала увеличится Q ($Q_{пр.11}$). При этом стробированию подвергается и часть полезного сигнала (полученная за счет обратного преобразования Фурье от ограниченного спектра принятого сигнала), однако эта часть вносит значительно меньший вклад для полезного сигнала, по сравнению с остатками прямого.

Зависимости отношения $Q_{пр.11}$ при рассогласовании базового расстояния с применением стробирования для различных случаев ориентации ПП АС представлены на рис. 5–6.

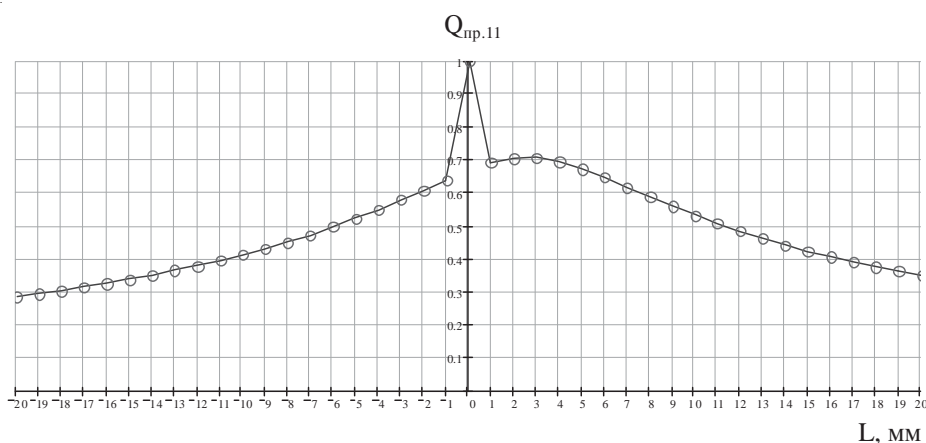


Рис. 5. Зависимость отношения $Q_{пр.11}$ отношений “полезный сигнал” – “шум + помеха” к оптимальному отношению сигнал-шум $q_{опт1}=10$ от рассогласования базового расстояния ППАС для канала, настроенного на оптимальный прием сигнала, отраженного от мины М15, установленной на глубине 0,20 м при ориентации ПП антенн (0,1,0). Дополнительно осуществлено стробирование.

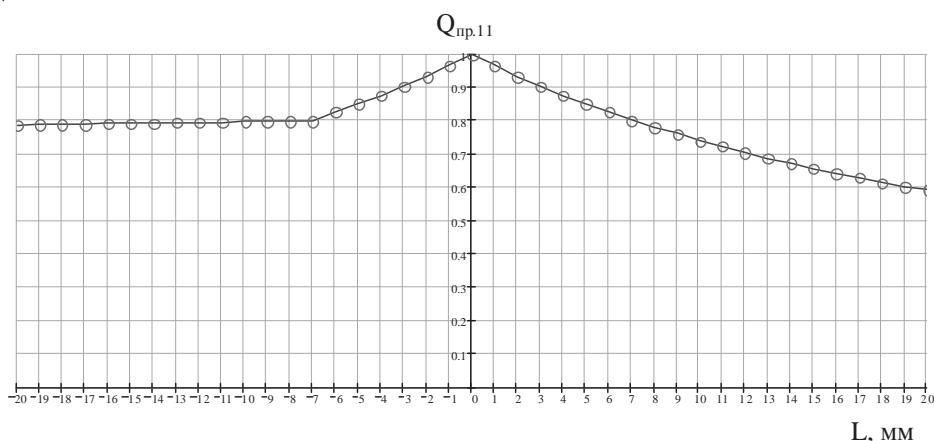


Рис. 6. Зависимость отношения $Q_{пр.11}$ отношений “полезный сигнал” – “шум + помеха” к оптимальному отношению сигнал-шум $q_{опт1}=10$ от рассогласования базового расстояния ППАС для канала, настроенного на оптимальный прием сигнала, отраженного от мины М15, установленной на глубине 0,20 м при ориентации ПП антенн (1,0,0). Дополнительно осуществлено стробирование.

Как следует из графиков стробирование позволяет на 10 % увеличить отношение $Q_{\text{пр.11}}$ для обеих ориентаций ПП АС.

Таким образом, достижение заданных показателей качества обнаружения и различения при заданном отношении сигнал-шум возможно при условии стробирования принятой смеси полезного и прямого сигналов с последующим вычитанием ожидаемого прямого сигнала. Вопрос о точности компенсации прямого сигнала можно решить в данном случае двумя путями. Первый – наличие нескольких каналов. Данный способ требует увеличения аппаратных затрат, причем чувствительность каналов должна быть достаточной для учета изменения расстояний порядка 1 мм. В полевых условиях, при особой специфике работы, это потребует значительного количества каналов, что в свою очередь увеличит временные затраты. Второй путь – увеличение энергетики РЛ. Так, при заданном отношении сигнал-шум (в отсутствие прямого) равном 10, наличие некомпенсированных остатков прямого сигнала уменьшает его (рис. 2, а). Однако изначально заданное при отсутствии прямого сигнала отношение сигнал-шум равное 12, уже позволяет получить отношение сигнал-шум при наличии не полностью скомпенсированного прямого равное 10, при разбросе базового расстояния ± 5 мм.

Проведенный анализ позволяет утверждать, что компенсация прямого сигнала по приведенной методике может оказаться достаточно эффективной. Однако это не единственный способ исключить его из принимаемого сигнала. На практике применяют ряд мер, например, по экранированию, либо поляризационной развязке ПП антенн, чтобы уменьшить взаимное влияние. Следовательно, предложенный вариант позволяет рассматривать компенсацию прямого сигнала в наилучших условиях, без применения каких-либо дополнительных мер.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Сухаревский О.И.* Рассеяние электромагнитных волн подповерхностными объектами резонансных размеров / О.И. Сухаревский, Г.С. Залевский // Радиопизика и радиоастрономия. – 1998. – Т. 3. – № 1. – С. 37–42.
2. *Сухаревский О.И.* Частотные и импульсные отклики подповерхностных объектов / О.И. Сухаревский, Г.С. Залевский, А.В. Музыченко // Радиотехника (Москва). – 2001. – № 6. – С. 6–13.
3. *Турсунходжаев Х.А.* Обнаружение и идентификация подповерхностных объектов / Х.А. Турсунходжаев, О.И. Сухаревский, Г.С. Залевский // Инновационные технологии и технические решения для борьбы с терроризмом : Труды семинара, Харьков, 4–5 июня 2002 г. – С. 49–52.

Отримано 28.02.2012