

УДК 681.883.45

Оценка влияния доплеровского расширения полосы частот на ошибку оценки фазы гидроакустического (ГА) сигнала

Н.Д. Гладких

Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”,
пр. Победы, 37, Киев-56, 03056, Украина.

В работе было проведено математическое моделирование п-лучевого идеализированного ГА канала, и компьютерное моделирование идеализированного 12-ти лучевого ГА канала. Получено значение ошибки оценки фазы за счет Доплеровского расширения спектра сигнала при движении приёмника или передатчика с тангенциальной составляющей скорости в диапазоне от 0 до 6-ти узлов. Полученные результаты позволяют оценить влияние движения носителя ГА связи на ошибку оценки фазы сигнала, излученного по методу двойной фазовой манипуляции (ДФМ). Библ. 5, рис. 4.

Ключевые слова: гидроакустическая связь, метод двойной фазовой манипуляции, доплеровское расширение спектра, ошибка оценки фазы сигнала.

Введение

По оценкам специалистов Международной гидрографической организации, только на 16% площади Мирового океана проведены съемки, которые позволяют определять подводную топографию, для 22% имеются данные, которые дают основания анализировать основные элементы морского дна, а на 62% имеется лишь некоторая информация о морском дне. Конечно же, такой информации мало и существует необходимость более детального изучения Мирового океана. Наиболее интересными с точки зрения осуществления гидроакустической (ГА) связи на данный момент являются области «мелкого моря». Это прибрежная часть морей и океанов, на которой добывают полезные ископаемые, а именно углеводороды: нефть, природный газ. Для обслуживания буровых вышек, картографии дна, проведение геологических изысканий на морском шельфе используются автономные необитаемые подводные аппараты.

Для их работы необходимо обеспечить малозатратную, высокоскоростную, надежную подводную связь. Среди всех возможных вариантов обеспечения такой связью, на сегодняшний день, наиболее перспективной является

цифровая гидроакустическая связь, осуществляемая по методу ДФМ с линейным законом изменения несущей частоты.

Для разработчиков, в теоретическом плане, на сегодняшний день стоят такие задачи:

1. Устранения существующих физико-математических идеализаций в моделировании сред океана. Будущие модели должны учитывать:

- неоднородность реальных сред;
- нелинейный характер гидрофизических и гидродинамических процессов;
- временные изменения свойств сред;
- активность сред (их возможность порождать взаимодействующие поля);

2. Фактического создания математической гидрофизики – внутренне целостной и независимой совокупности математических методов и моделей, которые могут использоваться для описания и анализа всех реальных гидрофизических полей и сред;

3. Создания в рамках математической гидрофизики единой теории интерпретации данных всего комплекса натуральных океанографических, гидроакустических и гидрометеорологических исследований. Чтобы отвечать потребностям практики, такая теория должна учитывать:

- трехмерность реальной среды;
- неточность и неравномерность имеющихся данных о гидрофизических полях Мирового океана [3].

Для долгосрочного стратегического мониторинга прибрежной зоны и исследований в области геофизики, геотехники, химии, биохимии, океанографии, биологии и рыбного хозяйства в рамках крупных европейских проектов (MARS, ESONET, NEPTUNE) выполняется развертывание таких сетей на обширных морских территориях. В рамках этих проектов предусматривается возможность быстрого развертывания подводных сетей в местах антропогенных и природных бедствий для своевременного обеспечения данными государственных структур, ответственных за данный регион.

В Украине, в соответствии с Концепцией создания системы освещения подводной обстановки в морских оперативных зонах, также начата работа по созданию подводных сенсорных устройств, предусматривающих возможность объединения в сети быстрого развертывания и мало-затратного изменения местоположения [4].

Всего существует достаточное количество работ, посвященных вопросам осуществления связи через ГА канал. Однако в этих работах приводятся лишь общие рекомендации, освещается проблематика связи, задается направление дальнейшего развития.

Среди факторов влияющих на оценку фазы ГА сигнала следует выделить искажения, которые возникают в результате движения носителей связи. А именно движения, которые вызваны волнением моря и течениями. В результате такого воздействия корабль или автономный обитаемый подводный аппарат движется с

небольшой скоростью и такое движение, к тому же, носит бессистемный, случайный характер. В связи с чем, не может быть учтено при синхронизации средств связи и будет негативно влиять на оценку фазы сигнала.

В качестве развития данного вопроса проведен расчет ошибки оценки фазы сигнала за счет доплеровского расширения спектра.

Постановка задачи

При осуществлении ГА связи возникает ряд нетипичных для цифровой связи проблем, а именно:

- широкий профиль многолучевости ГА канала;
- существенное доплеровское расширение частотного спектра;
- пространственные замирания акустического сигнала и т.п.

Проиллюстрируем типичную схему ГА связи в мелком море рисунком.

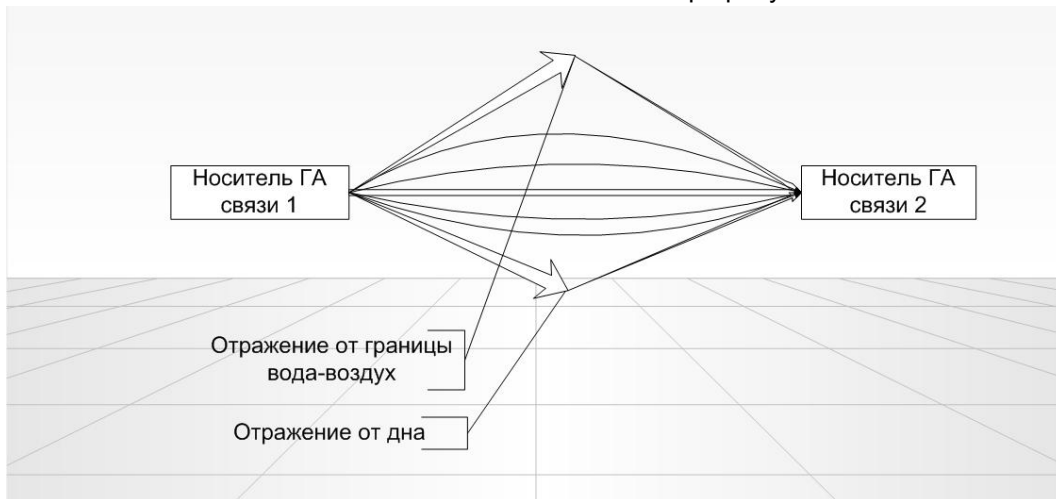


Рис.1 Распространение ГА сигнала в мелком море

При распространении акустического сигнала в ГА канале на вход приемника приходит множество копий исходного акустического сигнала, которые пришли разными путями. Поскольку ГА связь может осуществляться в движении и условия связи будут постоянно изменяться, удобно представить, что копии исходного акустического сигнала, пришедши по разным путям, характеризуются случайными значениями задержки, фазового смещения и амплитуды.

Для моделирования ГА связи в мелком море используют приближения лучевой акустики [4]:

Геометрические размеры ГА канала связи, возможных преград, расстояний связи и т.п. существенно больше наибольшей используемой длины волны.

Звук распространяется по прямолинейным траекториям, лучам.

Не учитывается частотная дисперсия распространения звука.

Такие приближения позволяют построить математическую и компьютерную модель ГА связи.

Математическая модель распространения и обработки ГА сигнала, созданного по методу ДФМ

Для обеспечения заданных требований наилучшим образом подходит метод двойной фазовой манипуляции (ДФМ), который детально описан в работе [4]. Сутью этого метода является передача по ГА каналу акустического сиг-

нала, несущая частота которого изменяется с течением времени по наперед заданному закону, а информация закодирована в скачкообразных изменениях мгновенной фазы сигнала. Таким образом, по наличию или отсутствию скачкообразного изменения фазы акустического сигнала в заданный заранее момент времени, приемник принимает решение о том, передается ли цифровой «0» или «1».

Излучаемый передатчиком акустический сигнал в используемом методе ДФМ имеет вид:

$$x(t) = A \cdot \cos(\omega_H t + Gt^2 + \varphi_U) \quad (1)$$

где: A – амплитуда сигнала, $G = \frac{(\omega_в - \omega_H)}{2T}$, ω_H

– нижняя или начальная граничная частота связи, $\omega_в$ – верхняя граничная частота связи, φ_U – информационный компонент фазы, T – длина одного пакета данных. При осуществлении связи передаваемые данные закодированы в фазе сигнала, а именно в разнице между соседними значениями мгновенной фазы сигнала, взятыми через равные промежутки времени: $\varphi_n - \varphi_{n-1}$. Если эта разница находится в некотором наперед заданном интервале, например $180^\circ \pm 45^\circ$, то в этом промежутке времени передан цифровой символ «1», в противном случае передан цифровой «0». Таким образом, для раскодирования передаваемого сообщения необходимо анализировать мгновенные значения функции $\varphi_U = \varphi(t)$.

Давайте проанализируем акустический сигнал, приходящий на вход приёмника ($r(t)$). Он состоит из суммы двух компонент: синхронной $r_c(t)$ и несинхронной $r_{нс}(t)$.

$$r(t) = r_c(t) + r_{нс}(t) \quad (2)$$

$$r_c(t) = A_1 \cos[\omega K t + G(Kt)^2 + \varphi_1(t)] \quad (3)$$

$r_c(t)$ — первый луч, пришедший к приёмнику по кратчайшему пути, с которым синхронизируется приемник. Это полезный сигнал несущий передаваемую информацию.

$$r_{нс}(t) = \sum_{i=2}^n A_i \cos[\omega K(t + \tau_i) + G(K(t + \tau_i))^2 + \varphi_i(t)] \quad (4)$$

$r_{нс}(t)$ – остальные n лучей, пришедшие к приёмнику с различными случайными временными задержками τ_i и амплитудами A_i . Это помеха, обусловленная многолучевостью и доплеровским расширением спектра.

Здесь и далее $K = 1 \pm \frac{V}{c}$ — коэффициент

Доплера, V — тангенциальная составляющая скорости движения подвижного носителя связи, c — скорость звука в воде, $\varphi_1 = \varphi_U$.

В общем случае, синхронным может быть любой из пришедших на вход приемника лучей. Наиболее удобно для этих целей выбирать луч, содержащий большего всего энергии. Таким образом, увеличивается дальность связи. Если нет приоритета по обеспечению дальности связи, выбирают тот, который отстоит от соседних лучей на большее значение времени $\Delta \tau = |\tau_i - \tau_{i \pm 1}|$. При таком выборе уменьшается влияние соседних лучей на синхронный луч и связь получается более помехоустойчивой.

В любом случае, нас интересует именно синхронный компонент. Рассмотрим подробнее, как происходит обработка акустического сигнала, преобразованного в аналоговый электрический сигнал посредством ГА преобразователя в синхронном квадратурном детекторе (СКД). При помощи такого детектора наиболее удобно производить анализ принятого сигнала.

СКД состоит из двух каналов. В одном канале электрический сигнал перемножается на синфазный ему сигнал и проходит через интегратор, получаем R_c – синфазный компонент, пропорциональный реальной части входного сигнала. Во втором канале происходит перемножение на сигнал в квадратуре и после интегрирования получаем – противофазный компонент, пропорциональный мнимой составляющей сигнала. Арктангенс отношения этих величин дает мгновенное значение фазы сигнала. Структура СКД подробно представлена на рис.2.

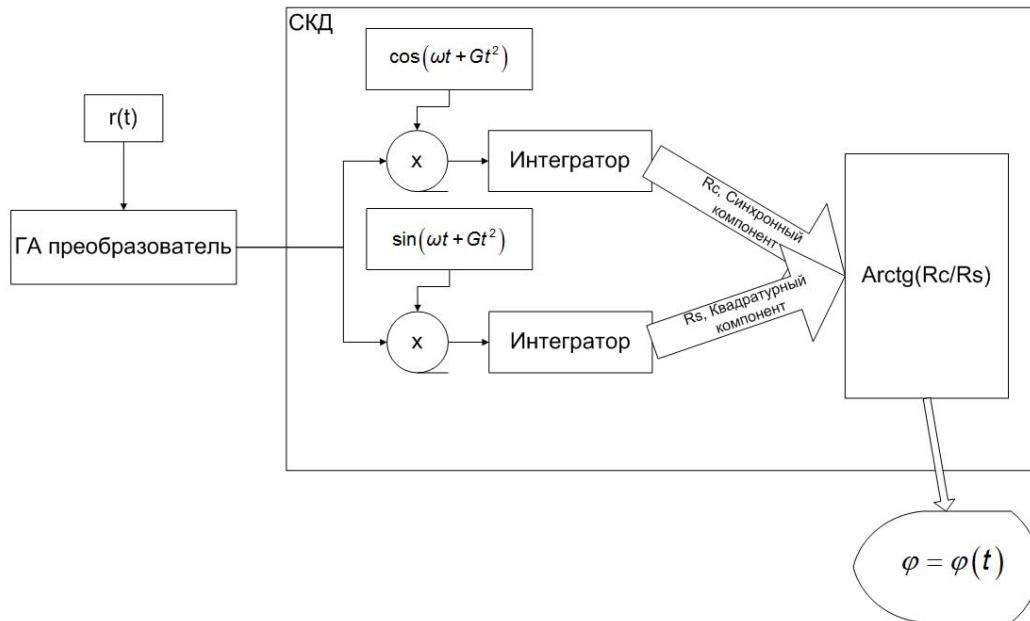


Рис. 2. Синхронный квадратурный детектор

Рассмотрим случай, когда на вход приемника приходит только синхронный луч, то есть это случай, когда помеха привнесенная свойствами ГА канала отсутствует. Выражение (4) равно нулю. В таком случае синфазный компонент R_c :

$$R_c = \int_0^T A_1 \cos[\omega Kt + G(Kt)^2 + \varphi_1] \times \cos(\omega t + Gt^2) dt$$

$$R_c = \frac{A_1}{2} \int_0^T \cos(\omega t(K-1) + Gt^2(K^2-1) + \varphi_1) dt + \frac{A_1}{2} \int_0^T \cos(\omega t(K+1) + Gt^2(K^2+1) + \varphi_1) dt \quad (5)$$

Выражение (5) является достаточно громоздким, для облегчения его анализа рассмотрим поочередно каждую составляющую. Первая часть выражения (5):

$$R_{c1} = \frac{A_1}{2} \int_0^T \cos(\omega t(K-1) + Gt^2(K^2-1) + \varphi_1) dt$$

$$= \frac{A_1}{2} \int_0^T \cos(\varphi_0' + \varphi_1) dt =$$

$$= \frac{A_1}{2} \int_0^T \cos(\varphi_0') \cos(\varphi_1) dt -$$

$$- \frac{A_1}{2} \int_0^T \sin(\varphi_0') \sin(\varphi_1) dt =$$

$$= \frac{A_1}{2} \left[\cos(\varphi_1) \int_0^T \cos(\varphi_0') dt - \sin(\varphi_1) \int_0^T \sin(\varphi_0') dt \right]$$

В работе [4] доказано следующее соотношение:

$$\cos(\varphi_1) \int_0^T \cos(\varphi_0') dt \gg \sin(\varphi_1) \int_0^T \sin(\varphi_0') dt \quad (6)$$

Исходя из которого:

$$R_{c1} = \frac{A_1}{2} \cos(\varphi_1) \int_0^T \cos(\varphi_0') dt \quad (7)$$

Вторая часть интеграла (5) после аналогичных операций имеет вид:

$$R_{c2} = \frac{A_1}{2} \left[\cos(\varphi_1) \int_0^T \cos(\varphi_0'') dt \right], \quad (8)$$

где:

$$\begin{cases} \omega_H t(K-1) + Gt^2(K^2-1) = \varphi_0' \\ \omega_H t(K+1) + Gt^2(K^2+1) = \varphi_0'' \end{cases} \quad (9)$$

Возвращаясь к СКД, квадратурный выход, R_s :

$$R_s = \int_0^T A_1 \cos(\omega Kt + G(Kt)^2 + \varphi_1) \times \sin(\omega t + Gt^2) dt =$$

$$= \frac{A_1}{2} \int_0^T \sin(\omega t(K-1) + Gt^2(K^2-1) + \varphi_1) dt +$$

$$+ \frac{A_1}{2} \int_0^T \sin(\omega t(K+1) + Gt^2(K^2+1) + \varphi_1) dt =$$

$$= \frac{A_1}{2} \int_0^T \sin(\varphi_0' + \varphi_1) dt + \frac{A_1}{2} \int_0^T \sin(\varphi_0'' + \varphi_1) dt, \quad (10)$$

Аналогичным образом рассмотрим вначале первую, а потом вторую составляющую выражения (10):

$$R_{s1} = \frac{A_1}{2} \int_0^T \sin(\varphi_0' + \varphi_1) dt =$$

$$= \frac{A_1}{2} \cos(\varphi_1) \int_0^T \sin(\varphi_0') dt + \frac{A_1}{2} \sin(\varphi_1) \times$$

$$\int_0^T \cos(\varphi_0') dt =$$

$$= \frac{A_1}{2} \left[\sin(\varphi_1) \int_0^T \cos(\varphi_0') dt \right] \quad (11)$$

Выражение (10) получено с учетом:

$$\cos(\varphi_1) \int_0^T \sin(\varphi_0') dt \ll \sin(\varphi_1) \int_0^T \cos(\varphi_0') dt \quad (12)$$

что доказывается в работе [4]. Тогда вторая составляющая выражения (10) имеет вид:

$$R_{s2} = \frac{A_1}{2} \left[\sin(\varphi_1) \int_0^T \cos(\varphi_0'') dt \right], \quad (13)$$

Мгновенное значение информационной составляющей фазы сигнала получается, как арктангенс отношения мнимой составляющей сигнала к реальной составляющей:

$$\varphi_u = \arctan\left(\frac{R_{s1} + R_{s2}}{R_{c1} + R_{c2}}\right) = \varphi_1, \quad (14)$$

В таком виде доплеровская добавка не вносит искажение в оценку фазы сигнала с точностью до верности выражений (6) и (12). На выходе СКД получается функция информационной составляющей фазы сигнала, которая соответствует передаваемой передатчиком. Но в реальных ГА каналах на вход приемника приходит множество лучей, кроме синхронного луча. Несинхронный луч отличается наличием случайной временной задержки τ_i и случайным значением амплитуды A_i . Для того, чтобы проанализировать реакцию СКД на такой сигнал рассмотрим этот случай подробно. Для несинхронного i -го луча:

$$r_i(t) = A_i \cos(\omega K(t + \tau_i) + G(K(t + \tau_i))^2 + \varphi_i), \quad (15)$$

$$R_{c_i} = \frac{A_i}{2} \cos(\varphi_i) \int_0^T \cos(\varphi_0^{(ii)}) dt + \frac{A_i}{2} \cos(\varphi_i) \int_0^T \cos(\varphi_0^{(iii)}) dt. \quad (16)$$

$$R_{s_i} = \frac{A_i}{2} \sin(\varphi_i) \int_0^T \cos(\varphi_0^{(ii)}) dt + \frac{A_i}{2} \sin(\varphi_i) \int_0^T \cos(\varphi_0^{(iii)}) dt. \quad (17)$$

В общем виде R_s и R_c являют собой сумму i -ых компонентов. Тогда значение мгновенной фазы на выходе СКД получит вид:

$$\varphi' = \arctan \frac{\frac{A_1}{2} \sin(\varphi_1) \int_0^T \cos(\varphi_0') dt + \frac{A_1}{2} \sin(\varphi_1) \int_0^T \cos(\varphi_0'') dt + \sum_{i=2}^n R_{s_i}}{\frac{A_1}{2} \cos(\varphi_1) \int_0^T \cos(\varphi_0') dt + \frac{A_1}{2} \cos(\varphi_1) \int_0^T \cos(\varphi_0'') dt + \sum_{i=2}^n R_{c_i}}, \quad (18)$$

Интегралы в выражении (18) аналитически не вычисляются. Из (18) видно, что такое отношение не является мгновенным значением фазы синхронного луча, поскольку все последующие лучи также вносят свой вклад в виде сумм:

$\sum_{i=2}^n R_{s_i}$, и $\sum_{i=2}^n R_{c_i}$. Для определения влияния доплеровского расширения полосы частот сигнала на ошибку оценки фазы рассмотрим случай относительно неподвижных носителей связи.

Акустический сигнал на входе приёмника при неподвижных носителях имеет вид:

$$r_H(t) = A_1 \cos(\omega t + Gt^2 + \varphi_1) + \sum_{i=2}^n A_i \cos(\omega(t + \tau_i) + G(t + \tau_i)^2 + \varphi_i). \quad (19)$$

Синхронный и квадратурный компоненты:

$$R_{c_H} = \frac{A_1}{2} \cos(\varphi_1) + \frac{A_1}{2} \int_0^T \cos(2\omega t + 2Gt^2 + \varphi_i) dt, \quad (20)$$

$$R_{s_H} = \frac{A_1}{2} \sin(\varphi_1) + \frac{A_1}{2} \int_0^T \sin(2\omega t + 2Gt^2 + \varphi_i) dt, \quad (21)$$

Рассмотрев все несинхронные компоненты, по аналогии с (13)

$$\varphi_H' = \arctan \frac{\frac{A_1}{2} \sin(\varphi_1) \int_0^T \cos(\varphi_0') dt + \frac{A_1}{2} \sin(\varphi_1) \int_0^T \cos(\varphi_0'') dt + \sum_{i=2}^n R_{s_{Hi}}}{\frac{A_1}{2} \cos(\varphi_1) \int_0^T \cos(\varphi_0') dt + \frac{A_1}{2} \cos(\varphi_1) \int_0^T \cos(\varphi_0'') dt + \sum_{i=2}^n R_{c_{Hi}}}. \quad (22)$$

Для расчета величины Допплеровских искажений оценки фазы используется следующее выражение:

$$\Delta\varphi_{dop} = |\varphi' - \varphi_H'|, \quad (23)$$

Компьютерная модель

В работе был проведен расчет ошибки оценки фазы сигнала за счет Допплеровского расширения спектра при движении носителей связи с взаимной скоростью в диапазоне скоростей: 0..6 узлов, это примерно 0..3 метра в секунду. Такой диапазон скоростей взят, как результат случайного воздействия волн, течений и ветра на носители связи. Поскольку такое воздействие является случайным, его невозможно учесть на этапе синхронизации средств связи.

Расчет проводился методами математического моделирования с использованием средств электронно-вычислительной техники и программного комплекса Matlab.

В качестве модели был взят 12-ти лучевой идеализированный канал со случайными временными и амплитудными смещениями несинхронных лучей. Такой канал приводится как

пример стандартной модели для моделирования и оценки свойств цифрового канала связи в работе [5]. Синхронный луч, по условию задачи приходит в нулевой момент времени, его амплитуда является наибольшей и равна 1. Все остальные лучи – после первого, со случайной временной задержкой в пределах длительности одного цифрового символа. Амплитуды сигнала на входе приемника нормированы.

Для моделирования взят ансамбль из 100 экспериментов, в каждом случае амплитуда и задержка лучей были сгенерированы случайным образом. Результаты моделирования сравнивались со случаем, когда на вход приёмника приходит один луч без доплеровского расширения спектра (идеальная ситуация). Разница между полученным значением фазы сигнала в смоделированной ситуации и фазы в идеальном случае является отклонением, вызванным эффектом доплера и явлением многолучевости. По 100 экспериментам мной было взято среднее значение отклонения оценки фазы сигнала стационарных от подвижных носителей связи и полное отклонение. Полученная зависимость от тангенциальной составляющей скорости движения носителя связи представлена на рис.3, 4.

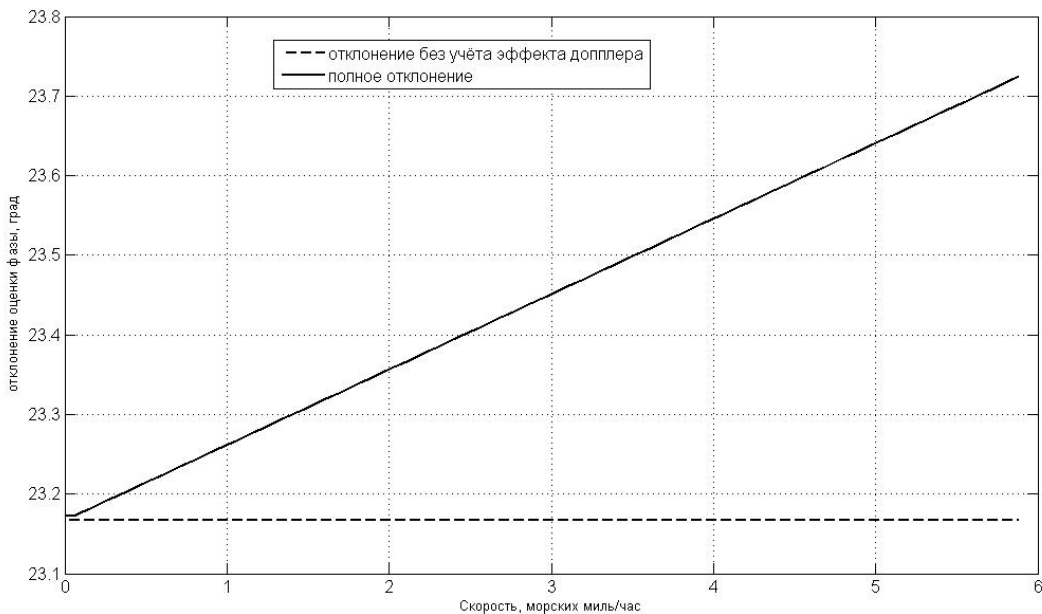


Рис. 3. Полное отклонение оценки фазы для случая с учётом движения носителей связи и без такого

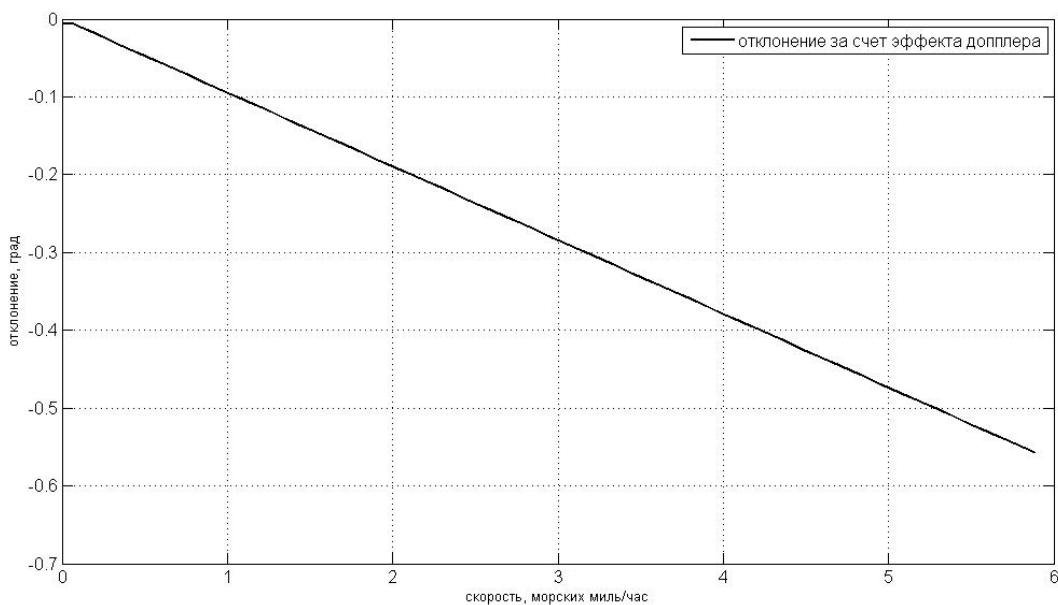


Рис. 4. отклонение вызванное эффектом доплера

Выводы

В работе было проведено математическое моделирование n-лучевого идеализированного ГА канала, и компьютерное моделирование идеализированного 12-ти лучевого ГА канала. Получено значение ошибки оценки фазы за счет доплеровского расширения спектра сигнала при движении приёмника или передатчика с тангенциальной составляющей скорости в диапазоне от 0 до 6-ти узлов. Полученные при помощи компьютерного моделирования значения

нанесены на график. Как видно из рис.3, абсолютная ошибка оценки фазы в целом возрастает с ростом скорости носителей связи. Движение средств связи в заданном диапазоне скоростей вносит ошибку до 1 градуса. В то же самое время наложение несинхронных компонент может вызвать погрешность оценки фазы сигнала до 23,5 градусов в наиболее сложных случаях. А значит, что доплеровская составляющая ошибки оценки фазы сигнала, хоть и является наиболее сложной, с точки зрения аналитического анализа, на практике не дает сколько-

нибуть существенного ускладнення, менше 0,24% від повного відхилення. Відзначаю одну важливу особливість СКД і його математичної моделі: при вирахуванні функції арктангенса для діапазону значень координати абсцисс більше π виникають точки, де значення тангенса намагаються до нескінченності. І значення кута, обчислені через арктангенс, можуть мати суттєву похибку. Для усунення даного ускладнення в наступному буде проаналізовано групове час затримки, похідна функції $\varphi_U(t)$. В наступному, також, буде розглянуто модель клинообразного ГА каналу. З цієї моделі буде отримано в аналітичному вигляді вираження для доступної для зв'язі смуги частот.

Література

1. *Kebkal K.G.* Estimation of phase error limits for PSK-modulated sweep-spread carrier signal / K.G. Kebkal, R. Bannasch, A.G. Kebkal IEEE/MTS Conference TECHNO OCEAN'04: Proceedings. – Kobe, Japan, 2004. – P. 748-756.
2. *Абаренов С.П., Ерофеев Ю.Г., Коваленко С.С., Криволапов Г.И., Криволапов Т.Г., Кяслер В.Э., Рылов Р.Н.* Некоторые результаты экспериментов по передаче сигналов управления и цифровой информации по гидроакустическим каналам связи на мелководье и вблизи отражающих границ // Всероссийская научно-техническая конференция. Научное и техническое обеспечение исследований и освоения шельфа Северного Ледовитого океана. – Новосибирск 2012. – ст. 175-180.
3. *Гончар А.И.* Океанографические исследования // Гідроакустичний журнал. – 2004. — № 1. — С. 9-12.
4. *Кебкал К.Г.* Теоретичне обґрунтування і практична реалізація засобів цифрового зв'язку для гідроакустичних середовищ з характеристиками підвищеної складності: автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.09.08 /; Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т". – К., 2011. – 40 с.
5. *Скляр Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр – М.: «Вильямс», 2003. – 1104 с .

УДК 681.883.45

Оцінка впливу доплерівського розширення смуги частот на похибку оцінки фази гідроакустичного (ГА) сигналу

Н.Д.Гладкіх,

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут",
пр. Перемоги, 37, Київ-56, 03056, Україна.

Проведено математичне та комп'ютерне моделювання оцінки фази сигналу, створеного за методом подвійної фазової маніпуляції, для 12-ти променевого ідеалізованого ГА каналу в мілководді при русі носія зв'язку зі швидкістю в діапазоні 0-6 вузлів. При моделюванні проведено порівняння оцінки фази сигналу стаціонарних і рухомих носіїв зв'язку. В результаті отримано графік залежності помилки оцінки фази сигналу від тангенціальної складової швидкості руху. Бібл. 5, рис. 4.

Ключові слова: гідроакустичний зв'язок, метод подвійної фазової маніпуляції, доплерівське розширення спектру, помилка оцінки фази сигналу.

Assessing the impact of the expansion of the Doppler bandwidth for error estimation phase hydroacoustic (HA) signal

N.D. Gladkikh

National Technical University of Ukraine 'Kyiv Polytechnic Institute',
pr. Peremogy, 37, Kyiv-56, 03056, Ukraine.

The mathematical and computer modeling of phase estimation of the signal, that is produced by the method of DPM, for 12-ray idealized HA channel in shallow water when carrier is moving with the speed range of 0-6 knots. In modeling is given the comparison of phase estimation of the signal in case of stationary and moving carriers of communication. The result is a plot of the estimation error signal phase on the tangential component of the motion velocity. Reference 5, figures 4.

Key words: *hydroacoustic communication, double phase manipulation method, Doppler phase shift, estimation of phase error.*

1. *Kebkal K.G.* Estimation of phase error limits for PSK-modulated sweep-spread carrier signal / K.G. Kebkal, R. Bannasch, A.G. Kebkal IEEE/ MTS Conference TECHNO OCEAN'04: Proceedings. – Kobe, Japan, 2004. – P. 748-756.
2. *Abarenov S.P., Erofeeva J.G., Kovalenko S.S., Krivolapov G.L., Krivolapov T.G., Kyasper V.E., Rylov R.N.* Some results of experiments on the transfer of control signals and digital information on sonar channels in shallow water and close to the reflectors // International Scientific and Technical Conference. Scientific and technical support for research and development of the shelf of the Arctic Ocean. - Novosibirsk, 2012. - Art. 175-180.
3. *Honchar A.I.* Oceanographic research // Hydroacoustic magazine. – 2004. — № 1. — Art. 9-12.
4. *Kebkal K.H.* Theoretical background and practical implementation of digital communication for sonar environments with characteristics of high complexity: Dissertation. ... Dr. techn. Science: 05.09.08 /; National Polytechnic University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Inst." - Kyiv.2011. - 40 p.
5. *Sklar B.* Digital communication. Theoretical basis and practical application / B.Sklar - Moscow: "Williams", 2003. - 1104 p.

Поступила в редакцию 22 ноября 2012 г.