

УДК 681.883.022: 681.883.65

## ВЫБОР ТИПА ЗОНДИРУЮЩЕГО СИГНАЛА ДЛЯ АКТИВНОГО ГИДРОЛОКАТОРА С ПОМОЩЬЮ ТЕОРИИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В КАНАЛАХ СВЯЗИ

**Н. Н. Семенов,**

соискатель

**Б. П. Белов,**

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

*В современной гидролокации не существует однозначного решения, какой тип сигнала послышки является для данной системы оптимальным. Это связано с тем, что водная среда насыщена специфическими шумами, является неоднородной, допускает многолучевое распространение и отражение от дна и поверхности. В статье рассматривается один из возможных алгоритмов выбора оптимального для определенной задачи типа сигнала послышки.*

**Ключевые слова** — гидролокатор, эхо-сигнал, сигнал послышки, обнаружение, локация, сравнение сигналов, модуляция, шумы, информативность.

### Введение

Существует большое количество работ по гидроакустике и радиолокации, где расписаны различные сигналы послышки, которые могут использоваться при построении гидролокатора [1–9]. Но среди этих книг и статей нет единого алгоритма выбора подходящего сигнала для конкретной задачи. Предлагается один из возможных алгоритмов, опирающийся на уравнения Шеннона и Котельникова для передачи информации в зашумленном канале, которым и является водная среда. Чем больше информации будет содержаться в сигнале послышки, тем больше информации об объекте локации можно будет выделить из эхо-сигнала.

### Модель сигнала и шума

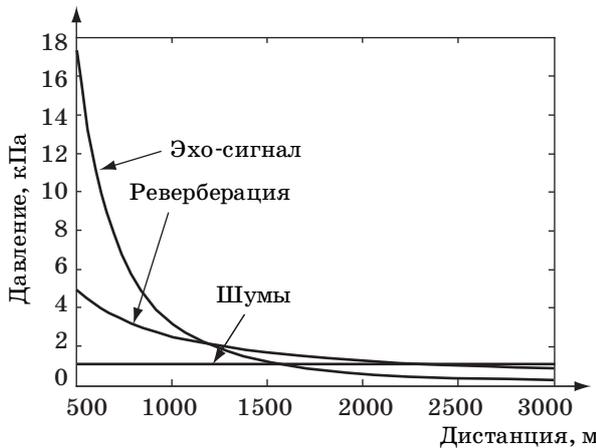
Основной характеристикой гидролокаторов является дальность обнаружения, которая зависит от мощности излучаемого сигнала, уровня акустических помех и условий распространения звука в водной среде. Дальность обнаружения обычно определяют по величине порогового эхо-сигнала, т. е. эхо-сигнала минимальной интенсивности, различимого на фоне помех [1, 9].

Гидроакустическая антенна (ГА), погруженная на заданную глубину и имеющая определен-

ный геометрический размер, может создавать акустическое давление не более некоторого критического значения, выше которого начинается кавитация [10]. Поэтому основное ограничение на излучаемый сигнал — максимальное акустическое давление. Вторым ограничением является ширина полосы частот, которые без искажений передаются и принимаются гидролокатором. Как известно, максимальную чувствительность ГА имеет вблизи частоты механического резонанса, и увеличить ширину области максимальной чувствительности можно только снижением добротности колебательного контура, т. е. снижая его чувствительность [10].

Если помеха и сигнал независимы, то пороговый сигнал определяется отношением полной энергии полезного сигнала к мощности помехи в данном частотном интервале. Таким образом, дальность обнаружения в условиях случайных помех для систем с различными видами модуляции будет одинаковой, если одинакова их полная энергия излучаемых сигналов [8].

Если основная помеха — хаотическое отражение сигнала от неоднородностей среды (так называемая реверберационная помеха), то относительный пороговый сигнал обнаружителя не зависит от мощности излучаемого сигнала, а определяется исключительно шириной полосы его частот.



■ Рис. 1. Соотношение мощностей эхо-сигнала и шумов

Мощности сигнала и реверберационной помехи связаны между собой, и в этом случае более эффективны системы с частотной или фазовой модуляцией сигнала и с шумовой посылкой [10].

График зависимости соотношения мощностей полезного эхо-сигнала и различных шумов показан на рис. 1. Здесь хорошо видны три зоны: ближняя (когда мощность эхо-сигнала выше любой помехи), средняя (когда мощность эхо-сигнала оказывается меньше реверберационной помехи) и дальняя (мощность эхо-сигнала меньше и реверберационной помехи, и естественных шумов моря) [10].

Но наряду с самим фактом обнаружения сигнала в гидролокации появляется дополнительный набор требований по точности определения дистанции, различению эхо-сигналов от рядом стоящих объектов и определению параметров движения этих объектов (наличия доплеровского смещения частоты эхо-сигнала).

### Простые и сложные сигналы

Для описания «сложности» сигнала существует понятие «база сигнала» [6]

$$B = W_e T_e, \quad (1)$$

где  $W_e$  — ширина полосы частот, используемых сигналом;  $T_e$  — длительность посылки.

Эффективная полоса сигнала  $W_e$  определяется следующим способом [1]:

$$W_e = \frac{\left[ \int_{-\infty}^{\infty} (U(\omega))^2 d\omega \right]^2}{4\pi \int_{-\infty}^{\infty} (U(\omega))^4 d\omega}, \quad (2)$$

где  $U(\omega)$  — спектральное представление сигнала посылки.

Это позволяет представить постоянную разрешения по запаздыванию (а следовательно, и по дальности) в виде [1]

$$\delta t = 1 / (2W_e). \quad (3)$$

Таким образом, если желательно иметь одну величину, наилучшим образом характеризующую способность сигнала по дальности, то такой величиной будет эффективная полоса сигнала. [Заметим, что длительность сигнала не входит в явной форме в выражение (3) для разрешающей способности по дальности].

А разрешающую способность по доплеровской частоте можно записать как [1]

$$\delta f = 1 / (2T_e), \quad (4)$$

где  $T_e$  — эффективная длительность, определяемая как

$$T_e = \frac{\left[ \int_{-\infty}^{\infty} |u(t)|^2 dt \right]^2}{\int_{-\infty}^{\infty} |u(t)|^4 dt}, \quad (5)$$

где  $u(t)$  — сигнал посылки.

То есть разрешающая способность по доплеровской частоте зависит только от длительности сигнала и в общем случае никак не зависит от эффективной полосы частот сигнала, что видно из (4).

Если в выражение (1) подставить выражения длительности и ширины полосы сигнала посылки через точность определения дистанции и смещения частоты, получится выражение [11]

$$B = T_e W_e = \frac{1}{2\delta f} \frac{1}{2\delta t} = \frac{1}{4\delta f \delta t}. \quad (6)$$

Из (6) видно, что чем больше база сигнала, тем выше точность определения дистанции и смещения частоты эхо-сигнала.

Простые сигналы — отрезок синусоиды (длительностью  $T$  и шириной полосы  $1/T$ ) и короткий импульс, имитирующий математическую дельта-функцию (бесконечно малой длительности и широкой полосы) [12]. База таких сигналов близка или равна 1. Простые сигналы позволяют с высокой точностью определять либо дистанцию, либо частоту, но не оба параметра одновременно.

Следовательно, для получения максимального количества информации об объекте локации по одному эхо-сигналу необходимо использовать сложные сигналы, т. е. сигналы, база которых много больше 1. Согласно [10], при использовании сигналов с базой больше 100 по причине многолучевого распространения, неоднородности водной среды и подвижности объекта локации возможны проблемы с когерентным приемом, необходимым для получения максимального соотношения сиг-

нал/шум на выходе согласованного фильтра. Использование ГЧМ-сигнала (с гиперболической частотной модуляцией) позволяет применять теоретически сигнал любой сложности, но только за счет инвариантности к сдвигу частоты. Поэтому такой сигнал для гидролокатора в данной статье не рассматривался. Частично-когерентный прием тоже теоретически позволяет использовать сигнал любой сложности, но для малогабаритного гидролокатора с ограничением на эффективную полосу сигнала увеличение сложности может привести к увеличению длительности посылки, что увеличит размер «мертвой зоны» вокруг гидролокатора и при этом практически не даст выигрыша по точности определения частоты.

Следовательно, необходимо остановиться на когерентном приеме сложного сигнала и принять сложность сигнала равной 100.

### Анализ помехоустойчивости и спектрально-энергетической эффективности гидролокатора

Рассмотрим один из подходов к решению задачи выбора вида манипуляции, заимствованный из теории передачи информации. Результатом данного подхода может быть установление компромиссного варианта, т. е. типа сигнала, соединяющего в себе физическую реализуемость, энергетическую эффективность излучения и высокую точность определения обоих параметров локации (дистанции и частоты). Воспользуемся диаграммами, изображенными на рис. 2 и 3 [8].

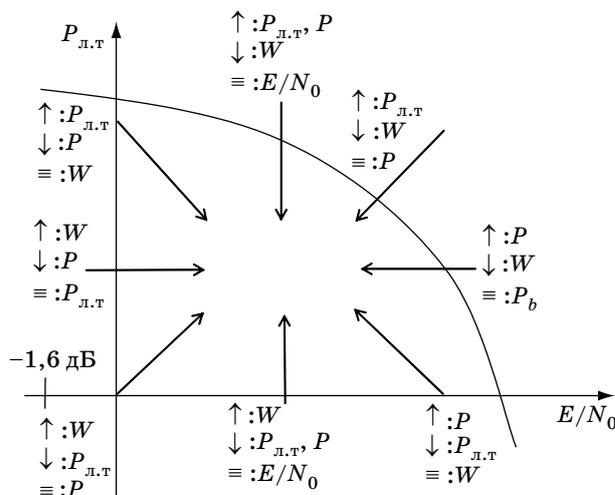
Рис. 2 представляет собой семейство кривых помехоустойчивости, т. е. зависимостей вероятности ошибки ложного обнаружения (или ложной тревоги)  $P_{л.т}$  от отношения энергии  $E$ , затрачиваемой на передачу, к спектральной плотности шума  $N_0$  (отношение сигнал/помеха — ОСП); рис. 3 — диаграмму спектрально-энергетической эффективности, т. е. семейство зависимостей удельной скорости передаваемой информации  $R_b/W$  от  $E/N_0$  (ОСП).

Направления стрелок и соответствующие метки указывают общий эффект от перемещения рабочей точки по направлению, указанному стрелкой, при соответствующем выборе вида модуляции. Взаимному размену подлежат параметры  $P_{л.т}$ ,  $R_b/W$  (удельная скорость передачи информации в полосе  $W$ ),  $P$  (мощность сигнала).

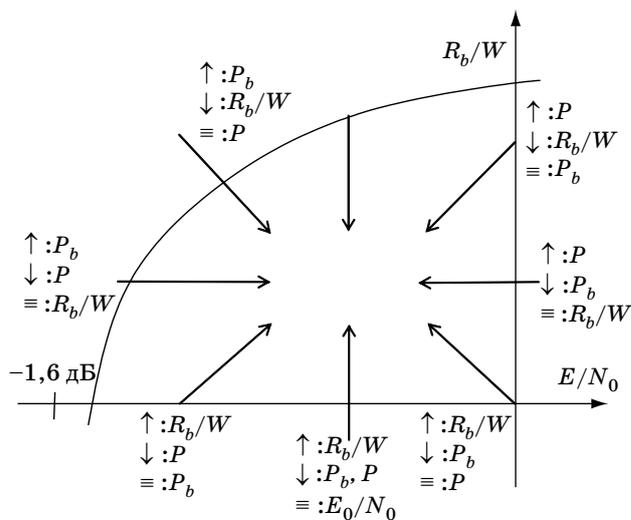
С точки зрения гидролокации,  $R_b$  является параметром разрешения эхо-сигналов по дистанции, т. е.

$$R_b = 1/T_b = c/\Delta r,$$

где  $T_b$  — время передачи одной дискреты модуляции, если модуляция дискретная, или  $T_b = 1/W_e$ ,



■ Рис. 2. Помехоустойчивость сигнала (зависимость вероятности ошибки ложного срабатывания  $P_{л.т}$  от ОСП):  $\uparrow$  — улучшение;  $\downarrow$  — ухудшение;  $\equiv$  — неизменность



■ Рис. 3. Спектрально-энергетическая эффективность сигнала (зависимость разрешающей способности от ОСП):  $\uparrow$  — улучшение;  $\downarrow$  — ухудшение;  $\equiv$  — неизменность

если модуляция непрерывная;  $c$  — скорость звука в воде;  $\Delta r$  — разрешение по дистанции.

На диаграммах указано минимальное значение удельных энергетических затрат, равное  $-1,6$  дБ и определяемое из формулы Шеннона для пропускной способности абстрактного канала связи с ограниченной полосой  $W$ , средней мощностью посылки  $P$  и помехой в виде аддитивного белого гауссова шума.

На диаграмме спектрально-энергетической эффективности (см. рис. 3) построена предельная кривая, определяемая выражением

$$\frac{E}{N_0} = \frac{2^{R_b/W} - 1}{R_b/W}. \quad (7)$$

Это выражение следует из формулы Шеннона при подстановке  $C = R_b$ . Тогда для идеального вида модуляции рост энергетических затрат при увеличении спектральной эффективности происходит по экспоненциальному закону. Минимально возможное значение удельных энергетических затрат определяется путем вычисления предела:

$$\left(\frac{E}{N_0}\right)_{\min} = \lim_{R_b/W \rightarrow 0} \frac{2^{R_b/W} - 1}{R_b/W} = \ln 2 = -1,6 \text{ дБ}. \quad (8)$$

Двигаясь к пределу Шеннона на рис. 2, можно обеспечить снижение вероятности ошибки  $P_{л.т}$  или удельных энергетических затрат за счет расширения полосы. Напротив, двигаясь к пределу Шеннона на рис. 3, можно повысить спектральную эффективность за счет увеличения удельных энергетических затрат или вероятности ошибки ложного обнаружения  $P_{л.т}$ . Поскольку обычно бывает заданным значение  $P_{л.т}$ , то наибольший интерес представляют собой стрелки, отмеченные как ( $\equiv: P_{л.т}$ ) — по две на рис. 2 и 3. Эти рисунки, иллюстрирующие возможность взаимного размена различных показателей вида модуляции, лишь качественно демонстрируют основные закономерности, проявляющиеся при подобном размене. Для получения более точных данных необходим детальный анализ.

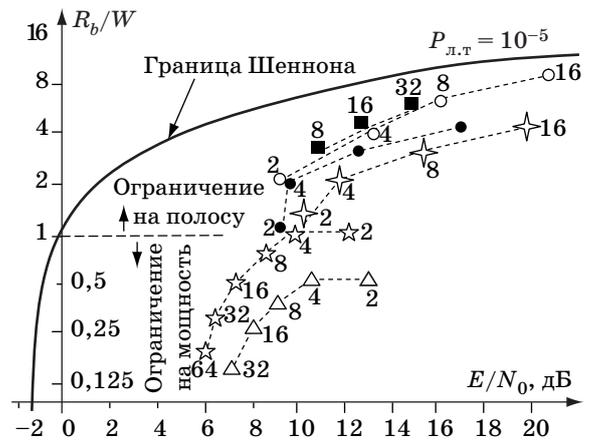
### Результаты моделирования

Для сравнения различных видов модуляции примем следующие ограничения, характерные для реально существующей ГА:

- 1) частота несущей 20 кГц;
- 2) ширина полосы частот не более 10 % (2 кГц);
- 3) максимально допустимое акустическое давление излучателя (максимальная амплитуда сигнала)  $10^5$  Па, ограничивающее энергию сигнала посылки.

Построенные с учетом ограничений сигналы смешивались с равномерным шумом, ограниченным полосой работы гидролокатора (для имитации работы приемного тракта гидролокатора), и затем подавались на согласованный фильтр.

Результаты подобного сравнения представлены на рис. 4. Здесь предполагается заданным значение вероятности ложного обнаружения  $P_{л.т} = 10^{-5}$ . Вероятность ложного обнаружения использовалась при выставлении порога обнаружения сигнала на выходе согласованного фильтра. ОСП вычислялось через энергию одной дискретности модулированного сигнала. Цифры 2, 4, 8, 16 и 32



■ Рис. 4. Сравнение различных видов модуляции: ○ — AM-ОБП; ● — ФМ (когерентная); ■ — AM-ФМ; ☆ — ОФМ; ☆ — МЧМ; △ — ЧМ (некогерентная)

на графиках показывают количество возможных позиций кода в каждой дискрете посылки. Для каждой точки графика было проведено не менее 32 испытаний, позволяющих определить ОСП, при котором сигнал с заданным  $R_b/W$  принимается с вероятностью  $P_{л.т}$ . Цифра 32 была получена эмпирически, так как при меньших значениях результат имеет большой разброс значений, а при больших значениях результат меняется не более чем на 2–3 %.

Шумоподобные полосовые сигналы имеют низкую энергетическую эффективность (при ограничении на максимальное давление излучателя) в сравнении с модулированными гармоническими сигналами, и поэтому их использование в качестве зондирующего сигнала для малогабаритного гидролокатора не рассматривается.

Из приведенных на рис. 4 данных следует, что AM (амплитудная модуляция), ФМ (фазовая манипуляция) и ОФМ (относительная фазовая манипуляция) являются спектрально-эффективными видами модуляции, поскольку соответствующие точки располагаются выше разграничительной линии  $R_b/W = 1$ . Часть диаграммы, расположенная выше этой линии, соответствует ситуации, когда основное ограничение приходится на имеющуюся полосу частот. Поэтому увеличение спектральной эффективности может быть достигнуто за счет увеличения числа позиций модуляции  $M$ . При заданной  $P_{л.т}$  побочным эффектом является увеличение удельных энергетических затрат.

С другой стороны, при ЧМ (частотной модуляции) неэффективно используется имеющаяся полоса, поскольку соответствующие ей точки располагаются ниже разграничительной линии  $R_b/W = 1$ . Для данного вида модуляции характер-

ны повышенные значения показателя энергетической эффективности.

Многопозиционная частотная модуляция (МЧМ) эффективнее ЧМ, как видно из рис. 4, но ее имеет смысл использовать только в системах с основным ограничением на максимальную мощность.

Следует отметить различный характер размена показателей спектральной и энергетической эффективности в областях, лежащих выше и ниже разграничительной линии. В соответствии с формой предельной кривой Шеннона в области, лежащей выше разграничительной линии, этот размен носит плавный характер. Поэтому за увеличение спектральной эффективности (точности определения дистанции) приходится расплачиваться существенным снижением энергетической эффективности. Напротив, в области, лежащей ниже разграничительной линии, небольшие потери энергетической эффективности приводят к заметному увеличению спектральной эффективности.

Из приведенных данных следует, что АМ-ОБП (амплитудная модуляция с одной боковой полосой) является асимптотически оптимальным видом модуляции для области диаграммы, характеризующейся ограничением на частотный ресурс системы. Ортогональная модуляция в сочетании с когерентной демодуляцией является асимптотически оптимальным видом модуляции для области диаграммы, характеризующейся ограничением на энергетический ресурс системы.

## Выводы

В заключение необходимо сделать ряд замечаний практического характера, которые подтверждаются данными моделирования, приведенными на диаграмме спектрально-энергетической эффективности. Если прием и излучение сигнала ограничены по полосе частот, определяемой ГА, то в таких системах целесообразно использовать многопозиционные сигналы с АМ (амплитудной модуляцией), ФМ (фазовой манипуляцией) или АМ-ФМ (амплитудно-фазовой модуляцией) в сочетании с когерентной демодуляцией. Примечательна точка, характеризующая 8-позиционную АМ-ФМ, поскольку этот вид модуляции имеет заметные преимущества перед 8-позиционной ФМ. Что касается 8-позиционной ФМ и многопозиционной АМ-ОБП, то они обладают примерно одинаковыми характеристиками размена показателей спектральной и энергетической эффективности. Однако наибольший эффект использования полосы в случае АМ-ОБП достигается за счет увеличения удельных энергетических затрат. АМ-ОБП при  $M = 2$  и ФМ при  $M = 4$  имеют одинаковые и достаточно высокие показатели (поскольку сигналы имеют одинаковую форму).

Таким образом, наилучшие показатели соотношения информативности и энергетической эффективности для малогабаритного гидролокатора имеют ФМ-сигналы с небольшим (не больше четырех) числом состояний (ФМ-2, ФМ-4).

## Литература

1. Берковиц Р. Современная радиолокация. М.: Сов. радио, 1969. 570 с.
2. Витерби Э. Д. Принципы когерентной связи. М.: Сов. радио, 1970. 392 с.
3. Котельников В. А. Теория потенциальной помехоустойчивости / ГЭИ. М., 1956. 151 с.
4. Фалькович С. Е. Оценка параметров сигнала. М.: Сов. радио, 1970. 336 с.
5. Куликов Е. И., Трифонов А. П. Оценка параметров сигналов на фоне помех. М.: Сов. радио, 1978. 242 с.
6. Вайнштейн Л. А., Зубаков В. Д. Выделение сигналов на фоне случайных помех. М.: Сов. радио, 1960. 448 с.
7. Быховский М. А. Потенциальная помехоустойчивость разделения двух сигналов с ЧМ. М.: Электросвязь, 1979. 277 с.
8. Амиантов И. Н. Избранные вопросы статистической теории связи. М.: Сов. радио, 1971. 416 с.
9. Бакут П. А. и др. Вопросы статистической теории радиолокации: В 2 т. / Под ред. Г. П. Тартаковского. М.: Сов. радио, 1963–1964.
10. Евтютов А. П., Митько В. Б. Инженерные расчеты в гидроакустике. Л.: Судостроение, 1988. 520 с.
11. Амиантов И. Н. Применение теории решений к задачам обнаружения сигналов и выделения сигналов из шумов / ВВИА им. Жуковского. М., 1958. 578 с.
12. Тихонов В. И. Оптимальный прием сигналов. М.: Радио и связь, 1972. 320 с.