Управление зоной квазипучности поля в океанической среде в рамках модели GS6: формирование, локализация и практическая реализация для односторонней передачи команд

Аннотация

В работе рассматривается применение модели GS6 для формирования локализованных зон повышенной интенсивности (квазипучностей) акустического поля в неоднородной океанической среде. На базе уравнения $U_{yy} - U_{xx} - 2RU_{xy} + 4U = 0$ и его решений в виде суперпозиции разрешённых мод показана возможность управления положением максимума интенсивности в заданной области

пространства. Предложена адаптация модели к условиям дальней гидроакустической связи на частоте 1 кГц с амплитудной модуляцией огибающей 1–100 Гц. Приведены практические расчёты дальности, параметров сигнала и рекомендаций по реализации односторонней передачи коротких команд от береговой станции к субмарине.

1. Уравнение модели GS6 и разрешённые моды

Основой модели GS6 служит дифференциальное уравнение в частных производных:

$$U_{yy} - U_{xx} - 2RU_{xy} + 4U = 0$$

При значении параметра $R = 0$ уравнение принимает вид:

$$U_{yy} - U_{xx} + 4U = 0$$

Для данного уравнения существует точное решение в виде линейной комбинации трёх разрешённых мод, обеспечивающих формирование пространственных пучностей:

$$U(x,y) = C_1 \cos(2y)$$

$$+ C_2 \cos(-y - x\sqrt{3})$$

$$+ C_3 \cos(-y + x\sqrt{3})$$

Каждая мода соответствует определённому направлению распространения и интерференционной структуре. Суперпозиция этих мод позволяет формировать локальные максимумы поля (пучности) в заданных точках пространства за счёт конструктивной интерференции. В замкнутых системах это приводит к образованию стационарных пучностей; в океанической среде — к квазистационарным зонам повышенной интенсивности.

2. Формирование пучности и условие её локализации

Пучность поля определяется как точка (или область) локального максимума интенсивности $I(x, y) = |U(x, y)|^2$. Условием существования пучности является обращение в нуль градиента интенсивности:

$$\frac{\partial I}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial I}{\partial y} = 0$$

В рамках модели GS6 это условие реализуется подбором коэффициентов C_1, C_2, C_3 (аналог амплитуд A_m) и фазовых соотношений (аналог φ_m), обеспечивающих синфазное сложение вкладов мод в целевой точке (x_0, y_0).

В океанической среде из-за неоднородности и нестационарности среды строгое равенство нулю градиента недостижимо. Поэтому вводится понятие **зоны квазипучности**: области, в которой градиент интенсивности

мал по сравнению с его характерным значением на трассе:

$$\left|\frac{\partial I}{\partial x}\right| < \varepsilon, \quad \left|\frac{\partial I}{\partial y}\right| < \varepsilon$$

где ε — пороговый уровень, определяемый масштабом неоднородностей среды.

3. Адаптация модели GS6 к океанической среде

Океан представляет собой волновод с переменным профилем скорости звука $c(z)$, отражениями от поверхности и дна, а также изменяющимися во времени параметрами среды. Прямое применение решения $U(x, y)$ в чистом виде невозможно, однако его структура сохраняется как **интерференционная модель** для описания суперпозиции доминирующих путей распространения.

Три разрешённые моды GS6 интерпретируются как три основных пути:

- $m = 1$: прямой луч;
- $m = 2$: отражение от поверхности;
- $m = 3$: отражение от дна.

Пространственная часть поля записывается в виде:

$$U_0(x,z) = A_1 \cos(k_{x1}x + k_{z1}z + \varphi_1)$$

$$+ A_2 \cos(k_{x2}x + k_{z2}z + \varphi_2)$$

$$+ A_3 \cos(k_{x3}x + k_{z3}z + \varphi_3)$$

Волновые числа k_{xm}, k_{zm} определяются исходя из геометрии трассы и профиля $c(z)$. В простейшем лучевом приближении:

$$k_{xm} = k\cos\theta_m, \quad k_{zm} = k\sin\theta_m$$

где $k = 2\pi f / c$, $f = 1$ кГц, $c \approx 1500$ м/с, θ_m — характерные углы распространения.

Подбор A_m, φ_m осуществляется так, чтобы обеспечить синфазное сложение в целевой точке (x_0, z_0), что максимизирует интенсивность:

$$I(x_0, z_0) = \left| \sum_{m=1}^{3} A_m e^{i\Phi_m} \right|^2, \quad \Phi_m = k_{xm} x_0 + k_{zm} z_0 + \varphi_m$$

Максимум достигается при условии:

$$\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_3 \pmod{2\pi}$$

Фиксируя $\varphi_1 = 0$, фазы φ_2, φ_3 выражаются через разности волновых чисел и координаты целевой точки:

$$\varphi_2 = (k_{x1} - k_{x2})x_0 + (k_{z1} - k_{z2})z_0 \pmod{2\pi}$$

$$\varphi_3 = (k_{x1} - k_{x3})x_0 + (k_{z1} - k_{z3})z_0 \pmod{2\pi}$$

Амплитуды A_m выбираются с учётом баланса между высотой пика и шириной зоны квазипучности, а также ограничения на суммарную излучаемую мощность $\sum A_m^2 = P_0$.

---

4. Сигнал и передача коротких команд

Для передачи коротких команд используется амплитудная модуляция (АМ) несущей частоты $f_c = 1\ \text{кГц}$ низкочастотной огибающей $s(t)$ в диапазоне 1–100 Гц:

$$U(t, x, z) = U_0(x, z) \cdot [1 + m \cdot s(t)] \cdot \cos(2\pi f_c t)$$

Интенсивность поля:

$$I(t, x, z) \propto U_0^2(x, z) \cdot [1 + m \cdot s(t)]^2$$

Пространственная структура (зоны квазипучностей) определяется $U_0^2(x, z)$, а временная — огибающей $[1 + m \cdot s(t)]^2$. Это позволяет независимо управлять геометрией пучностей (через A_m, φ_m) и информационной составляющей (через $s(t)$).

Структура команды и устойчивость приёма

Поскольку обратная связь отсутствует, устойчивость приёма достигается за счёт:

- **Избыточности:** каждый символ передаётся многократно (минимум 3 раза) или кодируется помехоустойчивым кодом.
- **Накопления:** приёмник накапливает энергию сигнала на интервале $T_{\text{нак}}$, что повышает отношение сигнал/шум:

$$G_{\text{накопл}} = 10 \log_{10}(T_{\text{нак}} / T_{\text{симв}}) \text{ дБ}$$

- **Узкополосной фильтрации:** полоса приёмника $\Delta f \approx 1\text{–}2$ Гц для подавления шума.

Длительность символа $T_{\text{симв}}$ выбирается сопоставимой со временем пребывания субмарины в зоне квазипучности:

$$T_{\text{симв}} \lesssim \frac{L_{\text{зоны}}}{v_{\text{лодки}}}$$

При $L_{\text{зоны}} \sim 2\text{–}3$ м, $v_{\text{лодки}} \approx 2{,}5\text{–}5$ м/с получаем $T_{\text{симв}} \approx 0{,}4\text{–}1{,}2$ с.

---

5. Практические расчёты

Параметры системы

- Несущая частота: $f_c = 1$ кГц.
- Мощность передатчика: $P = 5$ кВт.

- Диаграмма направленности: узкая, усиление $G = 30–100$ (15–20 дБ).
- Эффективная излучаемая мощность: $P_{\text{эфф}} = P \cdot G = 150\ 000–500\ 000\ \text{Вт}$.
- Порог обнаружения: $I_{\min} \approx 10^{-9}\ \text{Вт}/\text{м}^2$ (узкополосная фильтрация + накопление).

Оценка дальности

Интенсивность на расстоянии r для узконаправленного пучка:

$$I(r) \approx \frac{P_{\text{эфф}}}{2\pi r^2}$$

Условие обнаружения:

$$\frac{P_{\text{эфф}}}{2\pi r^2} \geq I_{\min} \Rightarrow r^2 \leq \frac{P_{\text{эфф}}}{2\pi I_{\min}}$$

Подставляя $P_{\text{эфф}} = 300\ 000$ Вт, $I_{\min} = 10^{-9}$ Вт/м^2:

$$r^2 \leq \frac{3 \cdot 10^5}{2\pi \cdot 10^{-9}} \approx 4{,}8 \cdot 10^{13} \Rightarrow r \leq 7 \cdot 10^6 \text{ м} = 7000 \text{ км}$$

Это идеализированная оценка. В реальных условиях (шум, многолучевость, федингг) практическая дальность устойчивой доставки коротких команд составляет:

- **Сотни километров** в подводном звуковом канале при стабильной гидрологии.

- **Десятки километров** в сложных условиях (мелководье, высокий шум).

Пример подбора параметров для целевой точки

Пусть целевая точка: $x_0 = 10\ \text{км} = 10^4\ \text{м}$, $z_0 = 50\ \text{м}$. Углы распространения: $\theta_1 = 0^\circ, \theta_2 = -5^\circ, \theta_3 = +10^\circ$. Скорость звука $c = 1500\ \text{м/с}$, тогда $k = 2\pi \cdot 1000/1500 \approx 4{,}19\ \text{рад/м}$.

Волновые числа:

- $k_{x1} = k, k_{z1} = 0$
- $k_{x2} = k\cos(-5^\circ), k_{z2} = k\sin(-5^\circ)$
- $k_{x3} = k\cos(10^\circ), k_{z3} = k\sin(10^\circ)$

Фазы в целевой точке (без учёта φ_m):

- $\Phi_1 = kx_0$
- $\Phi_2 = k_{x2}x_0 + k_{z2}z_0$
- $\Phi_3 = k_{x3}x_0 + k_{z3}z_0$

При $\varphi_1 = 0$:

- $\varphi_2 = \Phi_1 - \Phi_2 \pmod{2\pi}$
- $\varphi_3 = \Phi_1 - \Phi_3 \pmod{2\pi}$

Такой подбор фаз обеспечивает синфазное сложение и максимум интенсивности в точке $(10\ \text{км}, 50\ \text{м})$.

---

6. Практические рекомендации

1. **Гидрология как основа.** Перед расчётом мод и подбором A_m, φ_m необходимо получить профиль скорости звука $c(z)$ (данные GDEM/Levitus или натурные CTD-измерения).

2. **Формирование зон доставки.** На основе $c(z)$ рассчитать 3 доминирующие моды (прямой луч + 2 отражения) и подобрать A_m, φ_m так, чтобы максимумы интенсивности приходились на ожидаемые районы патрулирования.
3. **Узкая диаграмма и «запирание» в канале.** Направить пучок так, чтобы он распространялся в подводном звуковом канале, что резко повышает эффективную дальность.

4. **Узкополосная АМ и накопление.** Использовать полосу приёмника $\Delta f \approx 1\text{–}2\ \text{Гц}$ и накопление на $T_{\text{нак}} \approx 3\text{–}5\ \text{с}$ для выигрыша 10–15 дБ.
5. **Избыточность и кодирование.** Короткие команды передавать с многократными повторами и простым помехоустойчивым кодированием.
6. **Сезонная адаптация.** Пересчитывать A_m, φ_m по сезонным данным $c(z)$ для поддержания зон квазипучностей в нужных районах.

7. **Тестовые передачи.** Провести серию тестовых передач для эмпирической оценки вероятности приёма в разных точках района.

7. Заключение

Модель GS6 позволяет формировать локализованные зоны повышенной интенсивности поля за счёт интерференции трёх разрешённых мод. Адаптация этой модели к океанической среде сводится к интерпретации мод как доминирующих путей распространения и подбору амплитуд и фаз для максимизации интенсивности в целевой области. Для односторонней передачи коротких команд это даёт

возможность заранее сформировать «зоны доставки», в которых даже кратковременное пребывание субмарины обеспечивает надёжный приём за счёт накопления и избыточности. Практические расчёты показывают, что при мощности 5 кВт и узкой диаграмме направленности дальность устойчивой связи может достигать сотен километров в благоприятных условиях.

Следует учитывать важный аспект, связанный с выбором частоты модулирующей огибающей. При использовании амплитудной модуляции в инфразвуковом диапазоне 1–10 Гц возможно возбуждение резонансных колебаний в биологических тканях: частоты указанного диапазона сопоставимы с собственными частотами ряда внутренних органов человека. Это означает, что применение АМ на данных частотах несёт двойственный эффект: с одной стороны, обеспечивает передачу команд связи, с другой —

потенциально способно вызывать физиологические реакции экипажа субмарины вплоть до утраты работоспособности. Таким образом, выбор полосы модулирующих частот должен учитывать не только технические критерии

(помехоустойчивость, длительность символа, накопление), но и медико-физиологические ограничения. В прикладных реализациях целесообразно смещать рабочую полосу модуляции в верхнюю часть рассматриваемого диапазона (ближе к 100 Гц) либо применять дополнительные меры, исключающие нежелательное воздействие на экипаж.

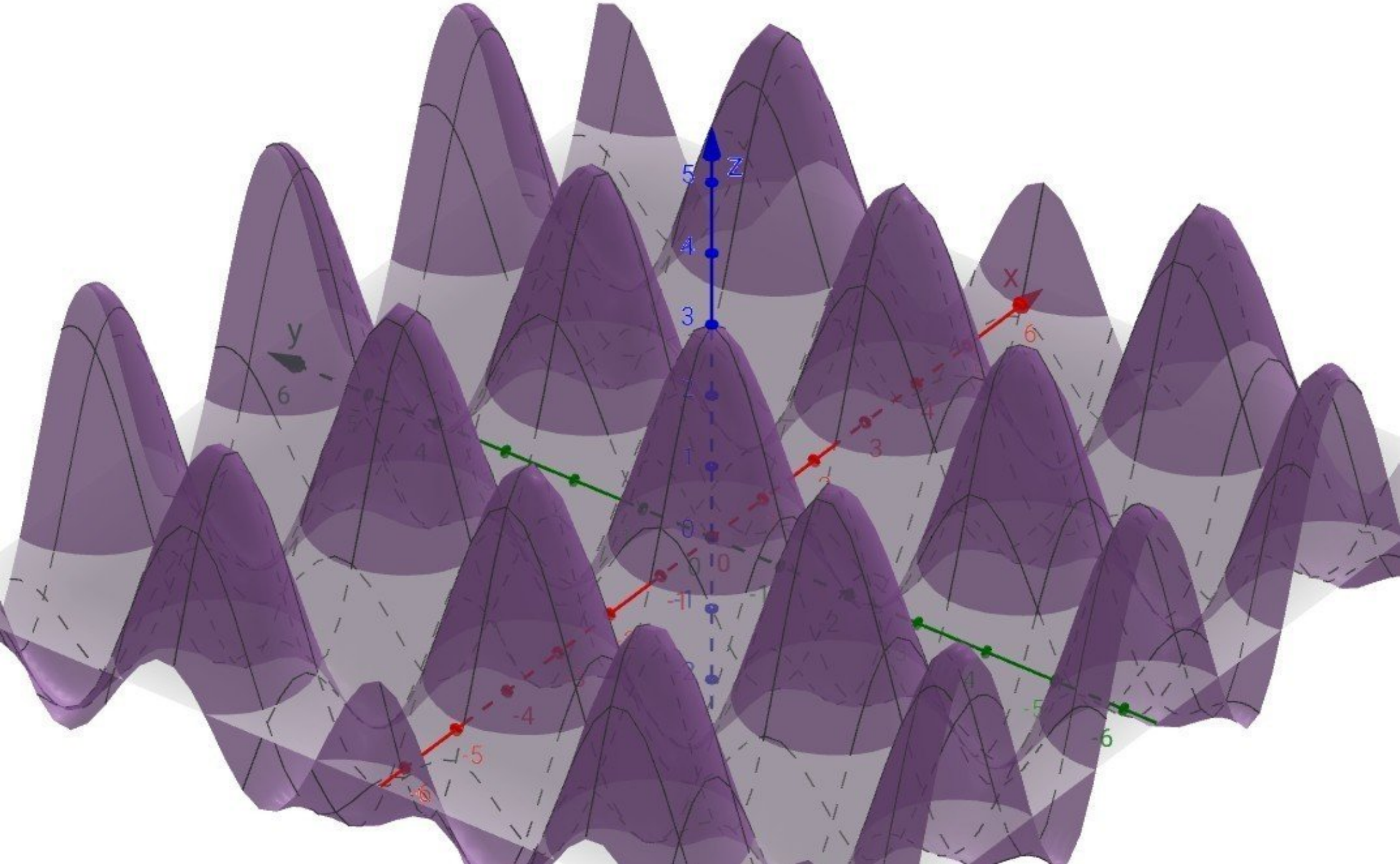
z
5
4
3
x
6
y
6
-4
-5
-6

рис. X, пространственное распределение поля при равных коэффициентах суперпозиции характеризуется выраженной периодичностью: локальные максимумы отделены друг от друга областями деструктивной интерференции, где амплитуда поля существенно снижена.

симметричная суперпозиция мод ($c_1 = c_2 = c_3$) формирует регулярную решётку максимумов (рис. X), предложенный метод позволяет целенаправленно перераспределить энергию, локализуя единственную пучность в произвольной точке пространства за счёт подбора коэффициентов c_k из условия $\nabla U(x_0, y_0) = 0$».