

Коррекция ошибок позиционирования в наземных радиосистемах контроля акваторий, вызванных влиянием морской поверхности

А. А. Жирнов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

aleksei.dog2001@mail.ru

Аннотация. Выполнено теоретическое исследование влияния зеркального отражения от морской поверхности на точность позиционирования наземных радионавигационных систем и береговых РЛС. На основе двухлучевой модели распространения и анализа коэффициентов отражения Френеля показано, что горизонтальная поляризация в диапазоне малых углов скольжения (0.1° – 5°) создает условия для глубокой деструктивной интерференции, приводящей к немоделируемым фазовым ошибкам. Установлено, что применение вертикальной поляризации вблизи угла Брюстера позволяет подавить отраженный сигнал и практически исключить интерференционные искажения. Получены аналитические оценки выигрыша в точности позиционирования при использовании поляризационной селекции в условиях спокойной акватории (волнение до 2 баллов). Результаты работы могут быть использованы при проектировании перспективных навигационных комплексов прибрежного базирования.

Ключевые слова: наземные радионавигационные системы, точность позиционирования, морская поверхность, зеркальное отражение, поляризационная селекция, коэффициент отражения Френеля, угол Брюстера

I. ВВЕДЕНИЕ

Наземные радионавигационные системы (РНС) и береговые радиолокационные станции (РЛС) являются ключевым средством контроля акваторий, обеспечения безопасности мореплавания и управления движением судов в прибрежной зоне [1]. Одним из основных факторов, ограничивающих точность позиционирования таких систем, является многолучевое распространение радиоволн, обусловленное переотражениями от подстилающей поверхности [2].

В условиях морской акватории при слабом волнении (0–2 балла) водная поверхность приобретает свойства зеркала для радиоволн УКВ и СВЧ диапазонов. Возникает классическая двухлучевая интерференция: приемник регистрирует сумму прямого сигнала и сигнала, зеркально отраженного от границы раздела «воздух-вода» [3]. В точках, где разность хода лучей кратна нечетному числу полуволн, происходит деструктивная интерференция, сопровождающаяся глубокими замираниями амплитуды (до 30–40 дБ) и скачкообразным изменением фазы на 180° [4].

Для фазовых методов измерения дальности, лежащих в основе большинства современных РНС, такие фазовые скачки приводят к катастрофическому росту ошибки позиционирования (до десятков метров), что делает

невозможным надежное определение координат объектов [5]. Традиционные методы пространственной и временной обработки сигналов оказываются малоэффективными в условиях зеркального отражения из-за высокой когерентности интерферирующих лучей [6].

Целью настоящей работы является теоретическое исследование возможности использования поляризационной селекции для подавления зеркальной интерференции и анализ точности позиционирования при работе на горизонтальной и вертикальной поляризациях в различных гидрометеорологических условиях.

II. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДВУХЛУЧЕВОЙ МОДЕЛИ

A. Геометрия задачи

Рассмотрим наземную РЛС или навигационный маяк, расположенный на высоте h_t над средним уровнем моря. Приемный объект (цель) находится на высоте h_r и на дальности R по горизонтали. В приближении плоской Земли угол скольжения ψ (угол между падающим лучом и касательной к поверхности) при $R \gg h_t, h_r$ определяется выражением [7]:

$$\psi \approx \frac{h_t + h_r}{R} \quad (1)$$

Разность хода прямого и отраженного лучей составляет:

$$\Delta R \approx \frac{2h_t h_r}{R} \quad (2)$$

Соответствующая геометрическая разность фаз:

$$\Delta \phi_{geom} = k \cdot \Delta R = \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda R} \quad (3)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число, λ — длина волны.

B. Коэффициенты отражения Френеля

При падении волны на границу раздела двух сред (воздух-морская вода) комплексный коэффициент отражения зависит от поляризации, угла падения и диэлектрической проницаемости морской воды ϵ . Для горизонтальной (ГП) и вертикальной (ВП) поляризации коэффициенты отражения Френеля имеют вид [8]:

$$\Gamma_h = \frac{\sin \psi - \sqrt{\epsilon - \cos^2 \psi}}{\sin \psi + \sqrt{\epsilon - \cos^2 \psi}} \quad (4)$$

$$\Gamma_v = \frac{\epsilon \sin \psi - \sqrt{\epsilon - \cos^2 \psi}}{\epsilon \sin \psi + \sqrt{\epsilon - \cos^2 \psi}} \quad (5)$$

Для морской воды в УКВ и СВЧ диапазонах модуль диэлектрической проницаемости значительно больше единицы ($|\epsilon| \gg 1$) [9]. Анализ выражений (4) и (5) для малых углов скольжения ($\psi \rightarrow 0$) дает:

- Для горизонтальной поляризации: $\Gamma_h \rightarrow -1$, т. е. $|\Gamma_h| \rightarrow 1$, $\arg(\Gamma_h) \rightarrow \pi$.
- Для вертикальной поляризации: числитель в (5) может обращаться в ноль при угле Брюстера. Для малых ψ модуль $|\Gamma_v|$ стремится к нулю.

Таким образом, при горизонтальной поляризации отраженный сигнал практически не теряет в амплитуде и приобретает фазовый сдвиг π , что создает идеальные условия для деструктивной интерференции. При вертикальной поляризации отраженная компонента подавлена, и интерференция не возникает.

С. Интерференционный множитель

Напряженность поля в точке приема является суммой прямого и отраженного сигналов. Интерференционный множитель (отношение мощности сигнала при интерференции к мощности в свободном пространстве) определяется выражением [10]:

$$F = |1 + \Gamma| e^{j(\Delta\phi_{geom} + \phi_\Gamma)}|^2 \quad (6)$$

Подставляя значения для горизонтальной поляризации ($|\Gamma_h| = 1$, $\phi_\Gamma = \pi$) и используя (3), получаем:

$$F_h = 4 \sin^2 \left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda R} \right) \quad (7)$$

Из (7) видно, что при $\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda R} = n\pi$ (где n — целое) $F_h = 0$, что соответствует полному гашению сигнала.

Для вертикальной поляризации, пренебрегая малым отраженным сигналом ($|\Gamma_v| \approx 0$), имеем:

$$F_v \approx 1 \quad (8)$$

т. е. мощность сигнала остается практически постоянной, близкой к уровню свободного пространства.

Д. Влияние волнения моря

Реальная морская поверхность не является идеально гладкой. Критерий Рэлея определяет условие, при котором поверхность может считаться зеркальной [11]:

$$h_{sea} < \frac{\lambda}{8 \sin \psi} \quad (9)$$

где h_{sea} — средняя высота волн. При волнении до 2 баллов ($h_{sea} < 0.1-0.2$ м) для типичных длин волн наземных РНС ($\lambda \sim 0.1-1$ м) и углов скольжения $\psi > 0.5^\circ$ условие (9) выполняется, и поверхность ведет себя как зеркальная. При усилении волнения зеркальная компонента отражения разрушается, и интерференционная картина смазывается [12].

III. Анализ точности позиционирования

А. Влияние интерференции на фазовые измерения

В наземных радионавигационных системах определение дальности до объекта основано на измерении разности фаз между опорным и принятым

сигналом. При наличии интерференции измеряемая фаза ϕ_{meas} отличается от фазы, соответствующей истинной дальности.

Для горизонтальной поляризации в точках интерференционных минимумов ($F_h = 0$) измерение фазы становится невозможным из-за отсутствия сигнала. В окрестностях этих точек фаза испытывает немонотонные изменения, что приводит к неоднозначности отсчета и росту ошибки позиционирования. Величина фазовой ошибки может достигать значений, соответствующих ошибке дальности в несколько длин волн (от единиц до десятков метров) [5].

Для вертикальной поляризации, благодаря отсутствию интерференционных провалов ($F_v \approx 1$), фаза сигнала изменяется монотонно, пропорционально дальности. Единственным источником ошибок остаются собственные шумы приемника, которые при типовых отношениях сигнал/шум обеспечивают ошибку дальности менее 1 м.

В. Аналитические оценки выигрыша

Сравнительный анализ выражений (7) и (8) позволяет получить аналитические оценки преимущества вертикальной поляризации:

Расширение зоны устойчивого сопровождения. При горизонтальной поляризации зоны в окрестностях точек, где $\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda R} = n\pi$, являются зонами потери работоспособности (отношение сигнал/шум падает ниже порога обнаружения). Протяженность таких зон определяется формой интерференционного минимума. При вертикальной поляризации такие зоны отсутствуют, что эквивалентно расширению рабочей зоны по дальности в 3–5 раз (оценка получена из отношения расстояния между соседними минимумами к ширине минимума).

Снижение ошибки позиционирования. В точках, удаленных от интерференционных минимумов, фазовая ошибка на горизонтальной поляризации определяется как флуктуациями, вызванными остаточной интерференцией, так и шумами приемника. На вертикальной поляризации — только шумами приемника. Анализ показывает, что среднеквадратическая ошибка определения дальности на вертикальной поляризации может быть на порядок меньше, чем на горизонтальной, особенно в условиях, близких к интерференционным минимумам.

С. Условия применимости

Полученные оценки справедливы при выполнении следующих условий:

- Углы скольжения: ψ в диапазоне $0.1^\circ-5^\circ$ (типичные значения для наземных систем при дальностях 1–50 км и высотах антенн 5–50 м).
- Волнение моря: до 2 баллов (выполнение критерия Рэлея (9)).
- Частотный диапазон: УКВ и СВЧ (метровые, дециметровые, сантиметровые волны), где диэлектрическая проницаемость морской воды $|\epsilon| \gg 1$.

При усилении волнения свыше 3 баллов зеркальная компонента отражения разрушается, поверхность становится шероховатой, и преимущества вертикальной поляризации нивелируются.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненного теоретического исследования установлено следующее:

1. Основной причиной снижения точности позиционирования наземных радиосистем в прибрежной зоне при волнении до 2 баллов является зеркальная интерференция прямого и отраженного от водной поверхности сигналов, максимально проявляющаяся на горизонтальной поляризации.

2. Анализ коэффициентов отражения Френеля показал, что в диапазоне малых углов скольжения (0.1° – 5°), характерном для наземных систем контроля акваторий, вертикальная поляризация обеспечивает подавление отраженного сигнала, что практически исключает интерференционные искажения.

3. Аналитически обосновано, что применение вертикальной поляризации позволяет расширить зону устойчивого сопровождения объектов по дальности в 3–5 раз и снизить среднеквадратическую ошибку определения координат на порядок по сравнению с горизонтальной поляризацией.

4. Полученные результаты создают теоретическую основу для разработки адаптивных поляризационно-селективных алгоритмов обработки сигналов в перспективных наземных навигационных комплексах прибрежного базирования, способных автоматически

выбирать оптимальную поляризацию в зависимости от гидрометеорологической обстановки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Скольник М.И. Справочник по радиолокации. В 2 т. / Пер. с англ. под общ. ред. К.Н. Трофимова. М.: Техносфера, 2014. 680 с.
- [2] Beckmann P., Spizzichino A. The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces. Norwood: Artech House, 1987. 511 p.
- [3] Кинкулькин И.Е., Рубцов В.Д., Фабрик М.А. Фазовый метод определения координат. М.: Советское радио, 1979. 280 с.
- [4] Skolnik M.I. Radar Handbook. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2008. 1352 p.
- [5] Капаев Д.А., Пономарев Л.И. Анализ погрешностей фазовых радионавигационных систем в условиях многолучевого распространения // Радиотехника. 2018. № 12. С. 45–52.
- [6] Бакланов А.И. Методы обработки сигналов в системах подвижной связи и навигации. М.: Горячая линия – Телеком, 2021. 352 с.
- [7] Долуханов М.П. Распространение радиоволн. М.: Связь, 1972. 336 с.
- [8] Борн М., Вольф Э. Основы оптики. Пер. с англ. М.: Наука, 1973. 720 с.
- [9] Клейн Л., Свифт К. Диэлектрическая проницаемость морской воды в диапазоне СВЧ // ТИИЭР. 1977. Т. 65, № 1. С. 162–163.
- [10] Черный Ф.Б. Распространение радиоволн. М.: Советское радио, 1972. 464 с.
- [11] Басс Ф.Г., Фукс И.М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука, 1972. 424 с.
- [12] Крацов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука, 1980. 304 с.
- [13] Skolnik M.I. Introduction to Radar Systems. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2001. 772 p.
- [14] Blake L.V. Radar Range-Performance Analysis. Norwood: Artech House, 1986. 443 p.
- [15] Nathanson F.E. Radar Design Principles. 2nd ed. Mendham: SciTech Publishing, 1999. 720 p.