

Моделирование цифровой информационно-измерительной системы с неортогональным разделением каналов для анализа помехоустойчивости систем навигации движущегося объекта

С. Г. Егоров

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

sgegorov@gmail.com

Аннотация. В докладе рассмотрена структура и основные характеристики цифровой информационно-измерительной системы, использующей неортогональное разделение каналов при навигации движущегося объекта. Приведены соотношения, позволяющие оценить точность системы при определении дальности до движущегося объекта. Представлены результаты имитационного моделирования системы, учитывающие различные характеристики согласованных фильтров, параметры нелинейности, возможность смены модуляции, а также выигрыш от применения многоантенного способа приёма-передачи и неортогональных методов множественного доступа. Кроме того, проанализированы сценарии пропадания сигнала и их влияние на общую помехоустойчивость. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и оптимизации систем связи и навигации, работающих в условиях интенсивных помех и ограниченных ресурсов канала.

Ключевые слова: радионавигация, пеленгация, источник радиоизлучения, дальность, местоопределение, кодовое разделение каналов, неортогональный доступ

1. ЦИФРОВАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА

Информационно измерительные системы применяются в различных системах для слежения за движущимися объектами, такие системы могут быть как радиолокационными, так и радиолокационно-оптическими. Для оценки параметров движения высокодинамичных или маневренных объектов необходимо совместное применение радиолокационных и оптико-электронных средств [1].

В работе [2] проведен анализ мультисенсорного радара для контроля морской поверхности. Система состоит из приемника, который использует сигнал, излучаемый передатчиками, в качестве которых могут использоваться базовые станции систем UMTS и ЧМ-радиостанции.

В статье [3] проанализированы возможности кооперативной обработки измерений в многопозиционных радиотехнических системах, показано, что использование всех измерений дальностей и их сумм повышает точность оценки координат и дальности, особенно при использовании дополнительных каналов приема и накоплении данных,

и обеспечивает преимущества по сравнению с моностатическими системами.

В работе [4] рассмотрен вариант решения задачи инерционного сопровождения траектории воздушного судна радиолокационно-оптической системой слежения, и получены аналитические выражения и проведены сравнительные расчеты точности определения дальности.

А. Позиционирование в системах с КРК

Время прохождения пилот-сигнала от приемопередающего пункта (ППП) до объекта навигации:

$$T_i = \Delta t - T_c \cdot 64 \cdot PN_i$$

где T_c – длительность одного чипа, PN_i – смещение псевдо-случайной последовательности i -го ППП, Δt – измеренный интервал времени. Тогда дальность от i -го ППП до объекта можно выразить, как [5], [6]

$$R_i = C \cdot T_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}$$

где C – скорость света, $\{x_i, y_i\}$ – координаты ППП, R_i – дальность от объекта до ППП; обозначив

$$\mathbf{D} = 2 \begin{pmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} R_1^2 - R_2^2 - x_1^2 + x_2^2 - y_1^2 + y_2^2 \\ R_1^2 - R_3^2 - x_1^2 + x_3^2 - y_1^2 + y_3^2 \end{pmatrix},$$

текущие относительные пространственные координаты объекта можно рассчитать:

$$\mathbf{Z} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = (\mathbf{D}^T \mathbf{D})^{-1} \mathbf{D}^T \cdot \mathbf{C}.$$

В. Описание имитационной модели

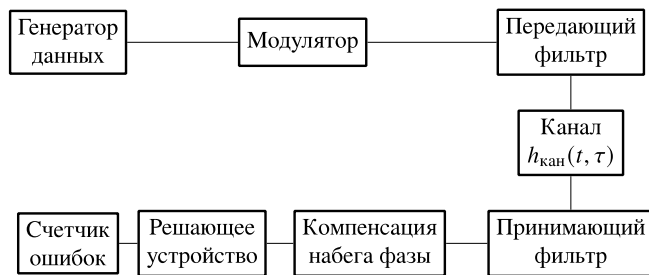


Рис. 1. Схема проведения моделирования

При разработке модели использовалась методика имитационного статистического моделирования системы с кодовым разделением каналов (КРК) [7]. В разработанной модели (рис. 1), при проведения имитационного эксперимента учитываются следующие особенности системы: параметры нелинейности, несколько видов модуляции, формирующий фильтр систем с КРК (рис 2), выигрыш от использования многоантенного способа приема-передачи, современных технологий неортогонального множественного доступа (т.е. системы NOMA описанные, например в [8]).

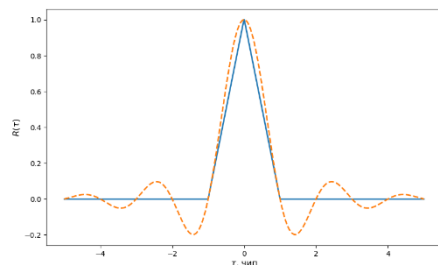


Рис. 2. ИХ фильтра для систем с КРК

С использованием разработанной цифровой модели системы с КРК выполнено имитационное моделирование процесса цифровой радионавигации [9] с использованием пилот-канала. Принцип использования пилот канала в системах с КРК описан в цикле статей [10], [11].

С. Результаты расчетов

Предложены алгоритмы определения параметрических координат морского объекта с помощью однопозиционного активного радиодальномера (рис.3), а также представлены полученные аналитические выражения для программного сопровождения судна в радиолокационно-оптической системе при пропадании информации о дальности до цели в радиолокационном канале слежения (рис.4). [4] и для способа измерения с использованием активного локатора [12]

Как показано ранее в [3], для достижения точности оценки дальности до объекта, аналогичной трехпозиционной системе, в однопозиционной системе требуется 14 отсчетов, при этом временной баланс трехпозиционной системы уменьшается по сравнению с однопозиционной в 14 раз.

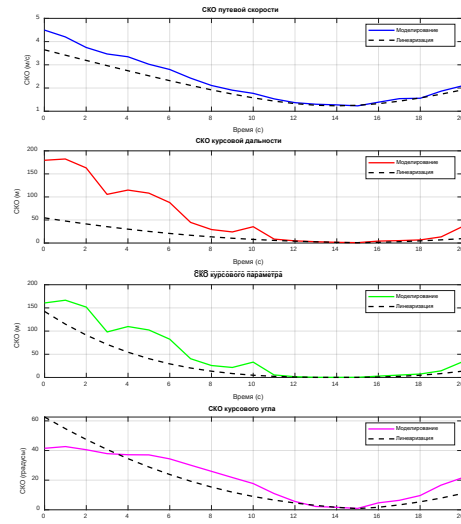


Рис. 3. Графики средноквадратической ошибки (СКО) определения параметров движущегося объекта

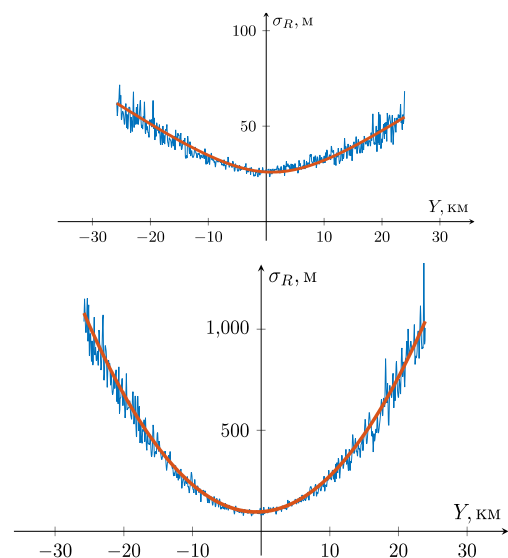


Рис. 4. СКО определения дальности при использовании инерциального сопровождения траектории

На рис. 5 изображены зависимости коэффициента битовых ошибок от коэффициента распределения мощности α_1 между двумя неортогональным группами в системе NOMA. Расчеты выполнены при выходной мощности 27дБм. Полученная зависимость показывает компромисс в распределении мощности между двумя группами. Дальний абонент «Ближний» абонент достигает лучших показателей BER при малых α_1 . График наглядно показывает, как оптимальное распределение мощности α_1 может балансировать качество связи для обоих пользователей в системе NOMA.

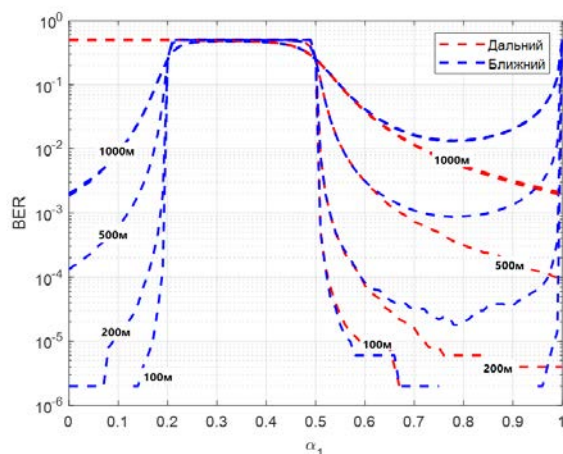


Рис. 5. Зависимость вероятности ошибки в двух неортогональных групп от коэффициента распределения мощности.

II. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В докладе был показан реализованный алгоритм программного модуля формирования выходной траекторной измерительной информации для радиолокационной и оптико-электронной измерительной системы для систем связи с КРК, который генерирует как идеальные, так и зашумленные измерения дальности, имитируя работу реальных средств сопровождения. Результаты моделирования проиллюстрированы графиками. Дальнейшей темой работы может быть: - реализация алгоритма цифровой фильтрации измерений, что позволит повысить точность слежения за объектами и надежность их сопровождения; разработка алгоритма оценки зоны наблюдения информационно-измерительной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Буренок В.М., Поляков В.И., Найденов В.Г. Математические методы и модели в теории информационно измерительных систем. Москва: Машиностроение, 2011. 336 с.
- [2] Malanowski M. et al. Land and sea clutter from FM-based passive bistatic radars // IET Radar Sonar & Navi. 2014. Vol. 8, № 2. P. 160–166.
- [3] Borisov E.G., Egorov S. Analysis of Options of Cooperative Processing of Measurements in Long-Range Multistatic Radar System // Indian Journal of Science and Technology. 2016. Vol. 9, № 42
- [4] Борисов Е.Г., Егоров С.Г. Инерционное сопровождение траектории воздушного судна радиолокационно-оптической системой слежения // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 1. P. 6–11.
- [5] Hepsaydir E. Analysis of mobile positioning measurements in CDMA cellular networks // RAWCON 99. 1999 IEEE Radio and Wireless Conference (Cat. No.99EX292). Denver, CO, USA: IEEE, 1999. P. 73–76.
- [6] Hepsaydir E. Mobile positioning in CDMA cellular networks // Gateway to 21st Century Communications Village. VTC 1999-Fall. IEEE VTS 50th Vehicular Technology Conference (Cat. No.99CH36324). Amsterdam, Netherlands: IEEE, 1999. Vol. 2. P. 795–799.
- [7] Harada H., Prasad R. Simulation and software radio for mobile communications. Boston, Mass.: Artech House, 2002. 467 p.
- [8] В. Б. Крейнделин и др. Неортогональный множественный доступ (NOMA) как основа систем связи 5G и 6G. Москва: Горячая Линия-Телеком, 2024. 264 p.
- [9] Фарина А., Студер Ф. Фарина А. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей: Пер. с англ. А. М. Бочкарева / Под ред. А. Н. Юрьева. - М.: Радио и связь, 1993. - 320 с.: ил. / ed. Юрьев А.Н.; trans. Бочкарев А.М. Радио и связь, 1993. 320 p.
- [10] Khalife J., Kassas Z.M. Navigation With Cellular CDMA Signals—Part II: Performance Analysis and Experimental Results // IEEE Trans. Signal Process. 2018. Vol. 66, № 8. P. 2204–2218.
- [11] Khalife J., Shamaei K., Kassas Z.M. Navigation With Cellular CDMA Signals—Part I: Signal Modeling and Software-Defined Receiver Design // IEEE Trans. Signal Process. 2018. Vol. 66, № 8. P. 2191–2203.
- [12] Патент РФ № 2759199 / Е. Г. Борисов, С. Г. Егоров, О. С. Голод. Способ измерения параметров движения объекта активным локатором: № 2020122456 : заявл. 30.06.2020 : опубл. 10.11.2021.