

Возможности повышения качества эфемеридно-временного обеспечения навигационных систем путём применения обработки сигналов с компенсацией помех на основе ортогональных преобразований

В. С. Конищев

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского

konvitcer@protonmail.com

Аннотация. Проведен анализ возможного влияния помех в канале передачи эфемеридно-временной информации. Рассмотрены принципы компенсации помех с помощью ортогональных преобразований. Предложен способ выбора дискретного ортогонального преобразования при компенсации помех. Проанализированы направления модернизации наземного комплекса управления навигационных систем.

Ключевые слова: дискретное ортогональное преобразование; компенсация помех; матрица корреляции помех; безусловная энтропия; наземный комплекс управления; поддержка эфемеридного времени

I. ВВЕДЕНИЕ

Эфемеридно-временное обеспечение навигационных систем представляет собой комплекс организационных, технических и технологических мероприятий, которые обеспечивают определение эфемеридной и частотно-временной информации и как передачу ее навигационными космическими аппаратами (КА) потребителям в составе навигационного кадра, так и передачу её станциями наземного комплекса управления на борт КА. Целью развития эфемеридно-временного обеспечения навигационных систем является повышение точности, передаваемой потребителям эфемеридной и частотно-временной информации, непосредственно определяющей точность их навигационных определений. Точность эфемеридно-временной информации чрезвычайно важна при решении навигационной задачи методом высокоточного абсолютного определения местоположения. Учитывая тот факт, что эфемеридно-временная информация передаётся на борт навигационного космического аппарата через радиоканал, то можно логично предположить, что на него воздействуют различные виды помех. С момента появления и развития радиосвязи для борьбы с помехами применяют различные виды фильтрации (режекция), различные типы адаптивных приемников, пространственную и поляризационную селекцию сигнала и помехи, компенсацию помех методом

оценки частоты и фазы мешающего воздействия, обработку сигналов с изменением пространства преобразований сигналов и многие другие способы [1]. При использовании цифровой обработки сигнала средствами современных высокопроизводительных процессоров с возможностью проведения параллельных вычислений высокий интерес вызывает метод компенсации преднамеренных помех на основе ортогональных преобразований принятой смеси сигнала и мешающих воздействий. Алгоритмы, построенные на применении ортогональных преобразований, в настоящее время считаются наиболее перспективными для решения новых задач, возникающих в связи с ужесточением требований, предъявляемых к таким параметрам радиоэлектронных систем, как помехоустойчивость, точность и быстрдействие.

II. ВОЗМОЖНОСТЬ КОМПЕНСАЦИИ ПОМЕХ В КАНАЛЕ ПЕРЕДАЧИ ЭФЕМЕРИДНО-ВРЕМЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ С ПОМОЩЬЮ ДИСКРЕТНЫХ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

Одним из важнейших свойств дискретных ортогональных преобразований является концентрация энергии спектра в относительно небольшом числе спектральных компонент. Причем если сигнал и помеха имеют различные базисные функции, то дискретное ортогональное преобразование смеси сигнала и помехи в базисе сигнала сосредоточит спектр сигнала в узкой полосе по сравнению с полосой, занимаемой помехой в этом базисе. С другой стороны, дискретное ортогональное преобразование в базисе помехи, наоборот, сосредоточит спектр помехи в узкой полосе по сравнению с полосой, занимаемой сигналом. Указанное свойство дискретных ортогональных преобразований позволяет решить задачу компенсации помех путем полосовой фильтрации или режекции соответствующего участка спектра. Концентрация энергии спектра помехи в узком диапазоне частот с использованием дискретных ортогональных преобразований является, по сути, декорреляцией коррелированной помехи (т.е. помехи с неравномерной

спектральной плотностью в полосе обрабатываемого сигнала). Причем чем уже полоса сосредоточения спектра помехи, тем значительнее ее подавление.

Оптимальность же применения преобразования можно понимать как его способность к концентрации большей части энергии дискретной помехи в малом количестве коэффициентов-трансформант. В этом смысле задача выбора преобразования принимает вид задачи, в которой надо найти такое преобразование, чтобы для заданного набора отбрасываемых (подавляемых) коэффициентов-трансформант их суммарная дисперсия (энергия) была максимальной. Такой подход к анализу эффективности применения дискретных ортогональных преобразований для компенсации помех универсален, он может дать разные результаты сравнения преобразований при различном количестве отбрасываемых коэффициентов.

Для иллюстрации декоррелирующих свойств ДКП приведем расчетные значения средней избыточной энтропии, соответствующие некоторым дискретным преобразованиям вектора X , который состоит из 16 компонент и описывается моделью марковского процесса первого порядка с ковариационной матрицей:

$$K_x = \sigma^2 R_x = \sigma^2 \begin{bmatrix} 1 & \rho & \dots & \rho^{N-1} \\ \rho & 1 & \dots & \rho^{N-2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \rho^{N-1} & \rho^{N-2} & \dots & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где σ^2 – дисперсии отдельных компонент случайного вектора X .

На рис. 1 отражены результаты сравнения следующих ортогональных преобразований: ДПФ, дискретное преобразование Хаара (ДПХ), дискретное преобразование Уолша (ДПУ), дискретное косинусное преобразование (ДКП). Как видно из рис. 1, из рассмотренных дискретных ортогональных преобразований ДКП обладает наиболее близкими характеристиками к оптимальному преобразованию Карунена–Лоэва. Преимущество ДКП над ДПФ, ДПУ, ДПХ и дискретным преобразованием Хартли существенно для всех значений параметра ρ . Этим объясняется широкое применение ДКП во многих приложениях.

Широкое распространение ДКП связано с его высокой декоррелирующей способностью при обработке дискретных сигналов, имеющих статистику марковского процесса. Ковариационная матрица K_x вектора X , являющегося реализацией стационарного марковского процесса первого порядка, определена нами в виде матрицы (1).

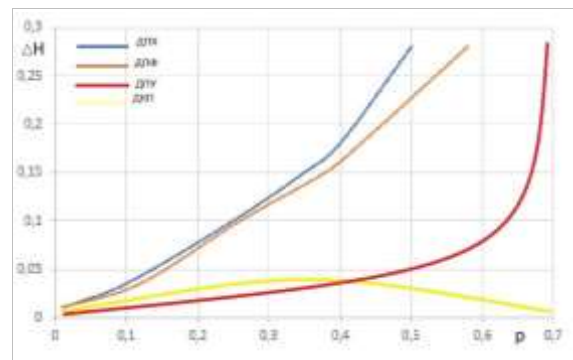


Рис. 1. Результаты сравнения ортогональных преобразований

Целью применения ортогональных преобразований является перевод вектора помехи, компоненты которого коррелированы, в вектор с менее коррелированными компонентами. Именно с этой точки зрения и рассматривается вопрос эффективности применения ортогональных преобразований в схемах компенсации преднамеренных помех. При этом несомненную важность имеет неравномерное распределение энергии по компонентам преобразованного вектора, т. е. когда основная часть энергии помехи концентрируется в малом количестве компонент-трансформант и может впоследствии достаточно легко компенсирована различными методами.

Для концентрации основной энергии сигнала в малом числе коэффициентов обобщенного спектра необходимо построить такой полный ортогональный базис, который позволяет достаточно точно представить непрерывный сигнал в виде конечной суммы с малым числом слагаемых. В этом случае, отбросив (исключив из обработки) коэффициенты дискретного спектра, номера индексов которых близки к номеру, соответствующему максимальному значению, можно обеспечить максимальное подавление преднамеренной помехи. Для эффективной компенсации помех важно локализовать энергию в одном из базисов. При этом, чем выше степень «локализации» помехи, т. е. чем в меньшем числе компонент сосредоточена большая часть ее энергии, тем более значительно она может быть компенсирована. Диапазон частот, в котором сконцентрирована энергия спектра помехи тем уже, чем более она декоррелирована по сравнению с ее представлением во временном базисе. Максимальная степень декорреляции достигается применением дискретного ортогонального преобразования Карунена–Лоэва, возможности которого на практике ограничены. Отсутствие быстрых алгоритмов вычисления и зависимость параметров оптимального преобразования Карунена–Лоэва от структуры корреляционной матрицы K_x преобразуемого процесса вынуждают использовать на практике другие ортогональные преобразования. Критерий, по которому может быть оценена эффективность применения ортогональных преобразований W для компенсации преднамеренных помех, основан на понятии средней избыточной энтропии $\Delta H(W, K_x)$. Чем больше значение этой величины, тем ниже эффективность декорреляции. Для оптимального

преобразования Карунена–Лоэва значение параметра $\Delta H(W, K_x)$ равно нулю. Таким образом, среди «сверхбыстрых» преобразований дискретное косинусное преобразование потенциально наиболее эффективно для декорреляции данных, описываемых моделью дискретного марковского процесса [2].

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие отечественных космических навигационных систем и достижение ими высочайшего уровня точностных характеристик является важнейшей задачей, решаемой современной наукой в интересах национальной безопасности Российской Федерации и укрепления её лидирующих позиций в области глобальной спутниковой навигации, а одна из навигационных систем является особо важной государственной инфраструктурой [3, 4]. Рассмотренные перспективные направления совершенствования её эфемеридно-временного

обеспечения реализуются в рамках федеральной целевой программы «поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2021 – 2030 годы». С учетом других направлений развития навигационных систем, направление повышения качества сигналов передачи эфемеридно-временной информации непосредственно связано с повышением точности навигационных определений потребителей и повышением других технических качеств системы в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] ГЛОНАСС. Модернизация и перспективы развития / под ред. А.И. Перова, М.: Радиотехника, 2020. 1072 с.: 46 с.
- [2] Милстайн Л.Б. Методы подавления помех в системах радиосвязи с широкополосными сигналами // ТИИЭР. 1988. Т. 76, № 6. С. 19-36.
- [3] Бакитько Р.В., Болденков Е.Н., Булавский Н.Т. и др. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. М: Радиотехника. 2010. 800 с.
- [4] Слипченко В.И. Войны шестого поколения. М.: Вече. 2002. 216 с.